





**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI**

**VULNÉRABILITÉ DE LA BIODIVERSITÉ DES AIRES  
PROTÉGÉES DU QUÉBEC AUX CHANGEMENTS  
CLIMATIQUES**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en Gestion de la faune et de ses habitats  
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© **MARYLÈNE RICARD**

**Mai 2014**



**Composition du jury :**

**Dominique Arseneault, président du jury, Université du Québec à Rimouski**

**Dominique Berteaux, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski**

**Martin-Hugues St-Laurent, codirecteur de recherche, Université du Québec à  
Rimouski**

**François Brassard, examinateur externe, Ministère du Développement durable, de  
l'Environnement, de la Faune et des Parcs**

Dépôt initial le 8 janvier 2014

Dépôt final le 4 mai 2014



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.





## ***REMERCIEMENTS***

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Dominique, pour m'avoir guidée et encouragée à développer confiance et autonomie tout au long de ce projet. Merci pour ta simplicité, ta bienveillance et pour avoir su plus d'une fois me ramener à l'essentiel. J'aimerais également remercier Martin-Hugues, mon codirecteur, pour sa disponibilité hors du commun, ses conseils précieux et son indéfectible enthousiasme, éléments essentiels pour tenir bon dans ce long marathon. Merci à Nicolas pour ton dévouement, ta gentillesse et ton expertise à chacune des étapes de ce projet. Merci à Yanick pour nos conversations qui m'ont plus d'une fois remise sur les rails. Merci à Dominique Arseneault et à François Brassard pour avoir généreusement accepté de faire partie du comité d'évaluation de ce mémoire. Du fond du cœur, merci à Camille, Sylvain, l'Éclair jaune et Isabelle, qui avez rendu mon quotidien doux et lumineux au cours de ces quelques années. Un merci immense à Sylvain pour ses qualités de super-héros et surtout pour avoir réussi à me faire aimer R! Finalement, je souhaite remercier tous les membres des laboratoires de Dominique, Joël et Martin-Hugues pour leur présence, leur aide et leur amitié tout au long de mon parcours.

La réalisation de ce projet n'aurait pas été possible sans le soutien logistique et financier des organismes suivants : Canards Illimités Canada, Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, Ministère de l'Environnement, du Développement durable, de la Faune et des Parcs du Québec, Ministère des Ressources naturelles du Québec, consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, RBC Banque Royale, Université du Québec à Rimouski et Université Laval.



## *RÉSUMÉ*

Plusieurs études révèlent que les changements climatiques amènent les espèces à ajuster leur répartition spatiale en réponse au déplacement de leur niche climatique. La gestion des aires protégées est directement concernée par les enjeux écologiques découlant des changements climatiques. Leurs impacts sur la biodiversité – tant actuels que potentiels – doivent être intégrés aux modes de gestion des réseaux d'aires protégées et l'évaluation de la vulnérabilité de la biodiversité constitue la première étape d'un processus d'adaptation de ces modes de gestion. La présente étude visait le développement et l'application d'une méthode permettant d'évaluer la vulnérabilité envers les changements climatiques de la biodiversité du réseau d'aires protégées du Québec méridional. Puisque la limite nord des aires de répartition de nombreuses espèces se trouve au Québec et que les contraintes climatiques imposées par les basses températures devraient s'atténuer, nous prédisions que les conditions climatiques présentes dans les aires protégées du Québec pourraient devenir favorables à un nombre plus important d'espèces dans le futur. Nos objectifs spécifiques consistaient (1) à évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur la biodiversité des aires protégées et (2) à évaluer l'efficacité du réseau d'aires protégées à préserver la biodiversité actuelle. Nous avons utilisé les résultats du projet CC-Bio, dans lequel la niche climatique de 529 espèces d'oiseaux, d'amphibiens, d'arbres et d'autres plantes vasculaires a été modélisée et projetée sous différents scénarios climatiques futurs. Nous avons calculé les gains, pertes et taux de renouvellement potentiels des espèces ainsi que les changements potentiels de représentativité des espèces au sein du réseau d'aires protégées. Nos résultats suggèrent que les conditions climatiques des aires protégées du Québec pourraient devenir favorables à plus d'espèces d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle. Plusieurs espèces seraient susceptibles d'étendre leur aire de répartition vers le nord, augmentant du même coup leur représentativité dans le réseau d'aires protégées. Nos modèles prédisent également des changements majeurs dans la composition des communautés biologiques. La pression que les changements climatiques exercent sur la répartition des espèces souligne le besoin de mettre en place des stratégies de conservation à des échelles locale, nationale et internationale pour atteindre les objectifs de conservation.

Mots clés : aire protégée; aire de répartition; biodiversité; changements climatiques; conservation; modèle bioclimatique; renouvellement des espèces; vulnérabilité



## ***ABSTRACT***

Studies from around the world reveal that climate change is driving plant and animal species to modify their distribution range according to shifting climate niche. Protected areas are directly concerned by issues arising from climate change. Current and potential impacts on biodiversity must be considered in management of protected area networks, and assessing the vulnerability of biodiversity is the first step for adapting protected area management to climate change context. We developed and applied a methodology to assess the vulnerability to climate change of the biodiversity of protected areas in southern Quebec. Because the northern range boundary of many species is located in Quebec, and because the cold climatic constraints should be relaxed in the future, we predicted that many species would see their suitable climate space expanding inside the protected areas of Quebec. We evaluated (1) the potential impacts of climate change on biodiversity of protected areas and (2) the efficiency of protected area network to preserve current biodiversity. We used results of the CC-Bio project in which ecological niche has been modeled and projected under various future climatic scenarios for 529 species (birds, amphibians, trees, and other vascular plants). We then calculated future potential species gains, losses, and turnover in protected areas, and potential changes in species representation across the protected area network. Our results suggest climatic conditions in protected areas of southern Quebec could become suitable for many new species by the end of the 21<sup>st</sup> century. Many species could extend their distribution range northward, thus increasing species representation in protected area network. Our models also predicted major changes in species composition in protected areas. Such pressure exerted by climate change on species distribution ranges highlights the need to implement conservation strategies on each local, national and transboundary scales to achieve conservation targets.

Keywords : biodiversity; climate change; conservation; distribution range; ecological niche model; protected area; species turnover; vulnerability



## *TABLE DES MATIÈRES*

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>vii</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xi</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>xiii</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>xv</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA BIODIVERSITÉ : DÉFIS ET OCCASIONS POUR UN RÉSEAU NORDIQUE D'AIRES PROTÉGÉES</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2 CLIMATE CHANGE IMPACTS ON BIODIVERSITY: CHALLENGES AND         OPPORTUNITIES FOR A NORTHERN PROTECTED AREA NETWORK</b> .....	<b>15</b>
<b>CHAPITRE 2 CONCLUSION</b> .....	<b>55</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>59</b>





## ***LISTE DES FIGURES***

- Figure 1 : Schéma conceptuel de la vulnérabilité des espèces aux changements climatiques. La vulnérabilité d'une espèce est fonction de sa sensibilité (en jaune) et de son exposition aux changements du climat (en orange), et peut être modulée par la gestion adaptative (en vert). Tout impact réalisé (en rouge) est susceptible de produire des effets de rétroaction et des effets en cascade dans l'écosystème (en bleu) (adapté de Williams *et al.*, 2008).....5
- Figure 2 : Exemple de modèle de niche bioclimatique pour le Grand pic (*Dryocopus pileatus*) (données tirées du projet CC-Bio). .....8



## ***INTRODUCTION GÉNÉRALE***

### **Les changements climatiques et leurs impacts sur la biodiversité**

Le plus récent rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) indique que l'air à la surface de la planète a été plus chaud au cours de chacune des trois dernières décennies que durant l'ensemble des autres décennies depuis 1850. Les températures ont augmenté partout dans le monde et de façon plus marquée dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord. À titre d'exemple, les années 1983 à 2012 furent vraisemblablement la période de 30 ans la plus chaude que l'hémisphère nord ait connu au cours des 1 400 dernières années (GIEC, 2013). Les changements climatiques se font également sentir sur la circulation atmosphérique, la variabilité climatique et les événements climatiques extrêmes, les cycles de précipitations, la cryosphère, la température et la chimie des océans ainsi que sur le niveau des mers (GIEC, 2013).

De plus en plus d'études révèlent que, partout sur la planète, les effets des changements climatiques sont observables sur les espèces et les communautés biologiques tant au niveau morphologique, physiologique et phénologique que par des changements dans l'abondance et la répartition des espèces (GIEC, 2002; Hughes, 2000; Parmesan et Yohe, 2003; Root *et al.*, 2003; Walther *et al.*, 2002). Ainsi, les changements climatiques régionaux amènent les espèces à ajuster leur répartition spatiale en réponse au déplacement de leur niche climatique. En 2003, la synthèse de Parmesan et Yohe suggérait que, dans l'hémisphère nord, les aires de répartition de 99 espèces se déplaçaient progressivement vers le nord à une vitesse moyenne de 6,1 km/décennie et en altitude à une vitesse moyenne de 6,1 m/décennie. Plus récemment, Chen *et al.* (2011) analysaient les résultats de 24 études portant sur les changements de répartition d'espèces d'une grande variété de groupes taxonomiques végétaux et animaux en Europe, en Amérique du Nord, au Chili, en Malaisie et sur l'île Marion (Chen *et al.*, 2011). Les résultats indiquent que les espèces s'éloignent

progressivement de l'équateur à une vitesse moyenne de 16,9 km/décennie et que les espèces se déplacent en altitude à une vitesse moyenne de 11,0 m/décennie.

Ces impacts sur la répartition des espèces pourraient entraîner d'importants changements dans l'assemblage des communautés. Toutefois, si l'on peut grossièrement prévoir les changements climatiques à venir, il reste difficile de prévoir la réponse des espèces à ces changements. Les prévisions à l'échelle de l'espèce sont pourtant cruciales puisque les communautés ne réagissent pas en tant qu'entités. En effet, l'étude paléocologique des réchauffements climatiques du Paléocène-Éocène (Wing *et al.*, 2005) et du Quaternaire supérieur (Graham et Grimm, 1990; Jackson et Overpeck, 2000) indique que les réponses individuelles des espèces ont alors considérablement modifié la composition des communautés biologiques en place. L'établissement de ces nouvelles associations d'espèces semble émerger de nouvelles combinaisons de conditions climatiques (Williams et Jackson, 2007). Les réponses différentielles des espèces face aux changements climatiques de notre époque sont également déjà observables (Walther *et al.*, 2002), et plusieurs études suggèrent que la pression exercée par les changements climatiques actuels pourrait entraîner l'émergence de nouvelles associations d'espèces (Hole *et al.*, 2009; Thuiller *et al.*, 2006).

Les réponses individuelles des espèces aux changements climatiques pourraient provoquer des effets en cascade et des effets de rétroaction dans les systèmes biologiques, affectant la dynamique des écosystèmes (Williams *et al.*, 2008). La réorganisation spatiale de la biodiversité, tout comme les modifications de la phénologie des espèces, provoque déjà la rupture de plusieurs interactions biotiques (Parmesan, 2006) et pourrait avoir des effets indirects importants sur d'autres espèces via les réseaux trophiques (Duffy, 2003; Schmitz *et al.*, 2003). La dispersion potentielle d'espèces envahissantes, d'insectes ravageurs et de pathogènes est un élément qui risque également d'affecter les écosystèmes, et une augmentation de la fréquence des infestations parasitaires et des maladies suite aux modifications du climat est déjà observable (GIEC, 2002). Un exemple dramatique de l'impact que peuvent avoir les changements climatiques sur la dynamique des écosystèmes

est l'extinction de près de 67 % des 110 espèces de grenouilles du genre *Atelopus* en Amérique du Sud et en Amérique centrale suite à la prolifération d'un champignon pathogène, favorisée par de nouvelles conditions climatiques (Pounds *et al.*, 2006). Au Québec, des simulations ont suggéré que la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*) pourrait étendre vers le nord son aire de distribution (Régnière *et al.*, 2005), en plus de causer davantage de dommages par le biais d'infestations plus longues et d'un plus grand pourcentage de défoliation (Gray, 2007). Les forêts québécoises pourraient de plus devoir composer avec la présence de nouveaux insectes ravageurs tels que le Bombyx disparate (*Lymantria dispar*) et le Longicorne asiatique (*Anoplophora glabripennis*) (Gray, 2004; Peterson et Scachetti-Pereira, 2004). Les changements du climat et les modifications attendues dans la dynamique des écosystèmes risquent aussi d'affecter les processus écologiques tels que la productivité primaire, la décomposition, les cycles de nutriments et les régimes de feux, qui à leur tour pourraient avoir un impact majeur sur les communautés biologiques (Williams *et al.*, 2008).

### Évaluer la vulnérabilité de la biodiversité

Le GIEC définit la vulnérabilité aux changements climatiques comme suit :

Degré de capacité d'un système de faire face ou non aux effets néfastes du changement climatique (y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes). La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur, et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation (GIEC, 2007, p. 28).

Cette définition du concept de vulnérabilité comprend trois composantes sous-jacentes, soit l'**exposition** aux changements climatiques, la **sensibilité** et la **capacité d'adaptation** des espèces ou des systèmes. Une multitude d'auteurs présentent des définitions et schémas conceptuels qui organisent et hiérarchisent ces composantes de façons plus ou moins comparables et auxquelles viennent parfois s'ajouter d'autres notions,

notamment celle de la résilience (Metzger *et al.*, 2005; Turner *et al.*, 2003; Williams *et al.*, 2008). Dans la présente étude, la vulnérabilité sera définie comme le produit de l'exposition et de la sensibilité, telle que décrite par Williams *et al.* (2008; Figure 1).

L'**exposition** réfère à l'intensité des changements climatiques auxquels est soumis une espèce ou un système, et donc à la pression que subira cette espèce ou ce système (Turner *et al.*, 2003). L'exposition dépend de l'intensité des changements climatiques à l'échelle régionale et du pouvoir tampon de micro-habitats à l'échelle locale (Williams *et al.*, 2008). La **sensibilité** des espèces est définie par leurs traits intrinsèques qui détermineront leur capacité à survivre et à revenir à un état d'équilibre suite à une perturbation (la résilience) et leur capacité d'adaptation (via une réponse phénotypique ou évolutive) face à des changements environnementaux. Ces traits propres aux espèces touchent l'écologie (comportement, interactions biotiques et abiotiques et utilisation de l'habitat), la physiologie (prérequis métaboliques, préférences et tolérances climatiques) et la diversité génétique (Williams *et al.*, 2008). Ultimement, les espèces survivront aux changements climatiques si la vitesse de ceux-ci permet le développement de réponses adaptatives ou si la connectivité du territoire permet la dispersion des organismes vers des habitats favorables (Williams *et al.*, 2008).

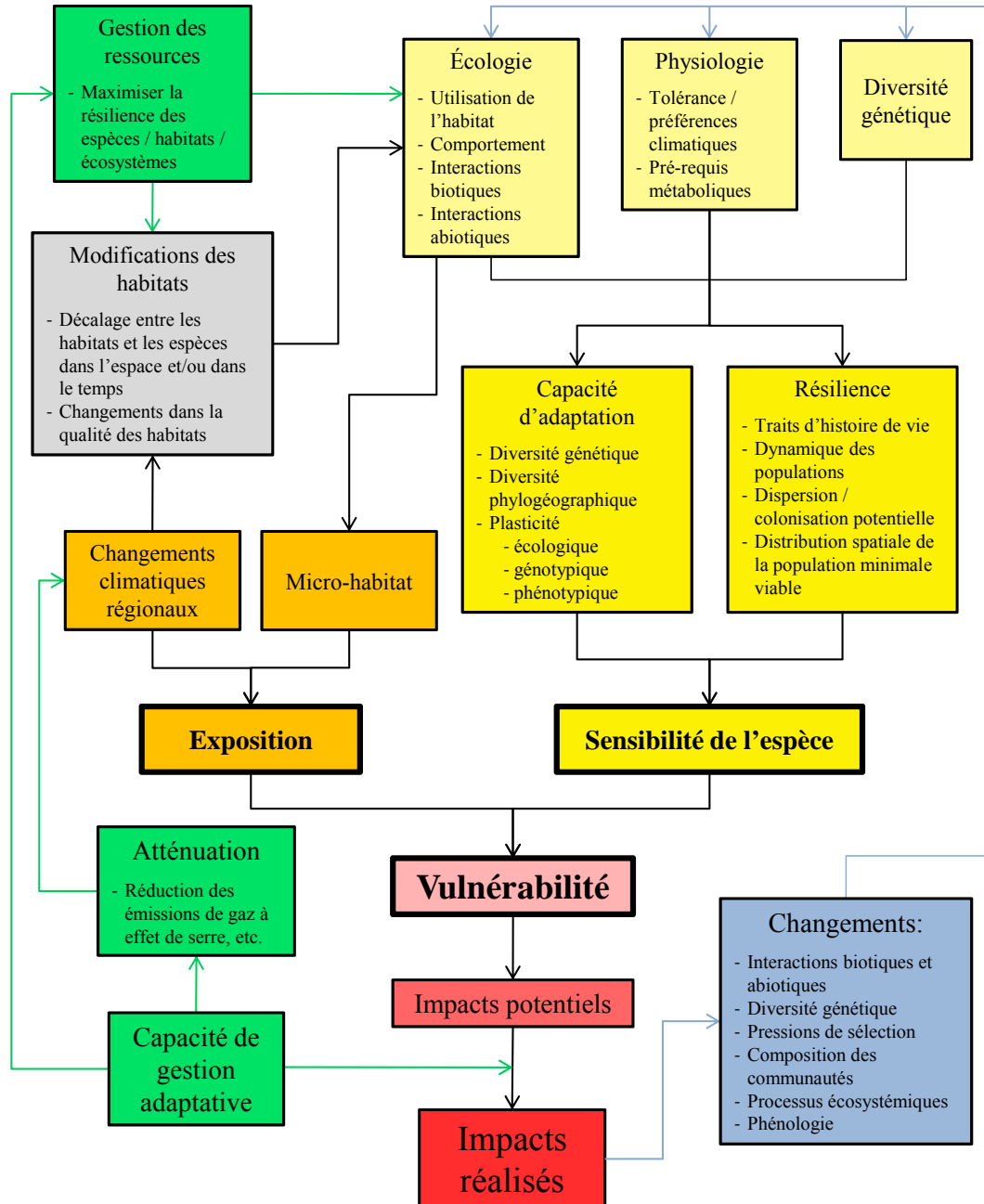


Figure 1 : Schéma conceptuel de la vulnérabilité des espèces aux changements climatiques. La vulnérabilité d'une espèce est fonction de sa sensibilité (en jaune) et de son exposition aux changements du climat (en orange), et peut être modulée par la gestion adaptative (en vert). Tout impact réalisé (en rouge) est susceptible de produire des effets de rétroaction et des effets en cascade dans l'écosystème (en bleu) (adapté de Williams *et al.*, 2008).

Dans une perspective de conservation, les gestionnaires auront à intégrer la vulnérabilité des espèces et des écosystèmes et les impacts potentiels des changements climatiques à leur mode de gestion. L'évaluation de la vulnérabilité de la biodiversité face aux changements climatiques constitue la première étape d'un processus d'adaptation des modes de gestion. L'utilisation d'outils d'analyse de la vulnérabilité peut permettre non seulement d'identifier les espèces et écosystèmes qui sont davantage vulnérables, mais également d'identifier les mécanismes qui déterminent plus fortement la vulnérabilité pour ultimement orienter les mesures d'adaptation en fonction de ces mécanismes (Glick *et al.*, 2011).

Le guide *Scanning the Conservation Horizon: A Guide to Climate Change Vulnerability Assessment* produit récemment par la *National Wildlife Federation* permet aux biologistes et gestionnaires de ressources naturelles de mieux comprendre l'analyse de vulnérabilité et d'identifier le type d'analyse le plus à même de répondre aux objectifs fixés (Glick *et al.*, 2011). Selon ce guide, différentes cibles d'analyse (espèces, habitats, écosystèmes) et échelles spatiales et temporelles peuvent être sélectionnées en fonction des objectifs à atteindre. À cet effet, les enjeux de conservation peuvent obliger à travailler à l'échelle des unités d'aménagement (Glick *et al.*, 2011). Ainsi, plusieurs analyses ont pour objectif de caractériser la vulnérabilité de la biodiversité à l'échelle d'une aire protégée ou d'un réseau d'aires protégées (Araújo *et al.*, 2011; Coetzee *et al.*, 2009; Hole *et al.*, 2009; Purnomo *et al.*, 2011; Scott *et al.*, 2002; Thuiller *et al.*, 2006).

Parmi les différentes approches proposées par Glick *et al.* (2011), une évaluation qualitative de la vulnérabilité peut être réalisée, au cours de laquelle différents facteurs déterminant la sensibilité se voient attribuer une valeur à partir de données disponibles dans la littérature ou d'avis d'experts. Par exemple, l'indice de vulnérabilité aux changements climatiques développé par NatureServe permet d'évaluer la vulnérabilité d'espèces d'intérêt (Young *et al.*, 2011). Par ailleurs, de nombreuses analyses quantitatives ont recours à des modèles prédictifs qui permettent d'évaluer la vulnérabilité potentielle. L'utilisation de modèles climatiques permet d'évaluer l'intensité des changements climatiques auxquels les



espèces et systèmes seront exposés pour une échelle de temps donnée (Glick *et al.*, 2011). Ces modèles peuvent également être combinés avec des modèles visant à évaluer la réponse potentielle des espèces et systèmes, par exemple les modèles de niche bioclimatique (par exemple, Bakkenes *et al.*, 2002), les modèles de dynamique globale de la végétation (Neilson, 1995), les modèles physiologiques (ou mécanistiques) (Schmitz *et al.*, 2003) ou les modèles qui simulent les processus écologiques (Melillo *et al.*, 1993).

### **Les modèles de niche bioclimatique**

Les modèles de niche bioclimatique sont parmi les modèles prédictifs les plus couramment utilisés dans les analyses de vulnérabilité des espèces (Glick *et al.*, 2011). L'ensemble des prérequis bioclimatiques d'une espèce constitue sa niche bioclimatique. Les modèles de niche capturent la niche bioclimatique d'une espèce en reliant les sites d'occurrence de cette espèce à des variables climatiques (température, précipitations, etc.) et environnementales (Guisan et Zimmermann, 2000). Par la suite, la substitution dans le modèle des données climatiques de la période de référence par des scénarios climatiques futurs permet de prédire la présence ou l'absence de l'espèce selon les conditions climatiques attendues dans chaque région de l'aire d'étude, et donc d'estimer l'aire de répartition future potentielle de l'espèce (Figure 2).

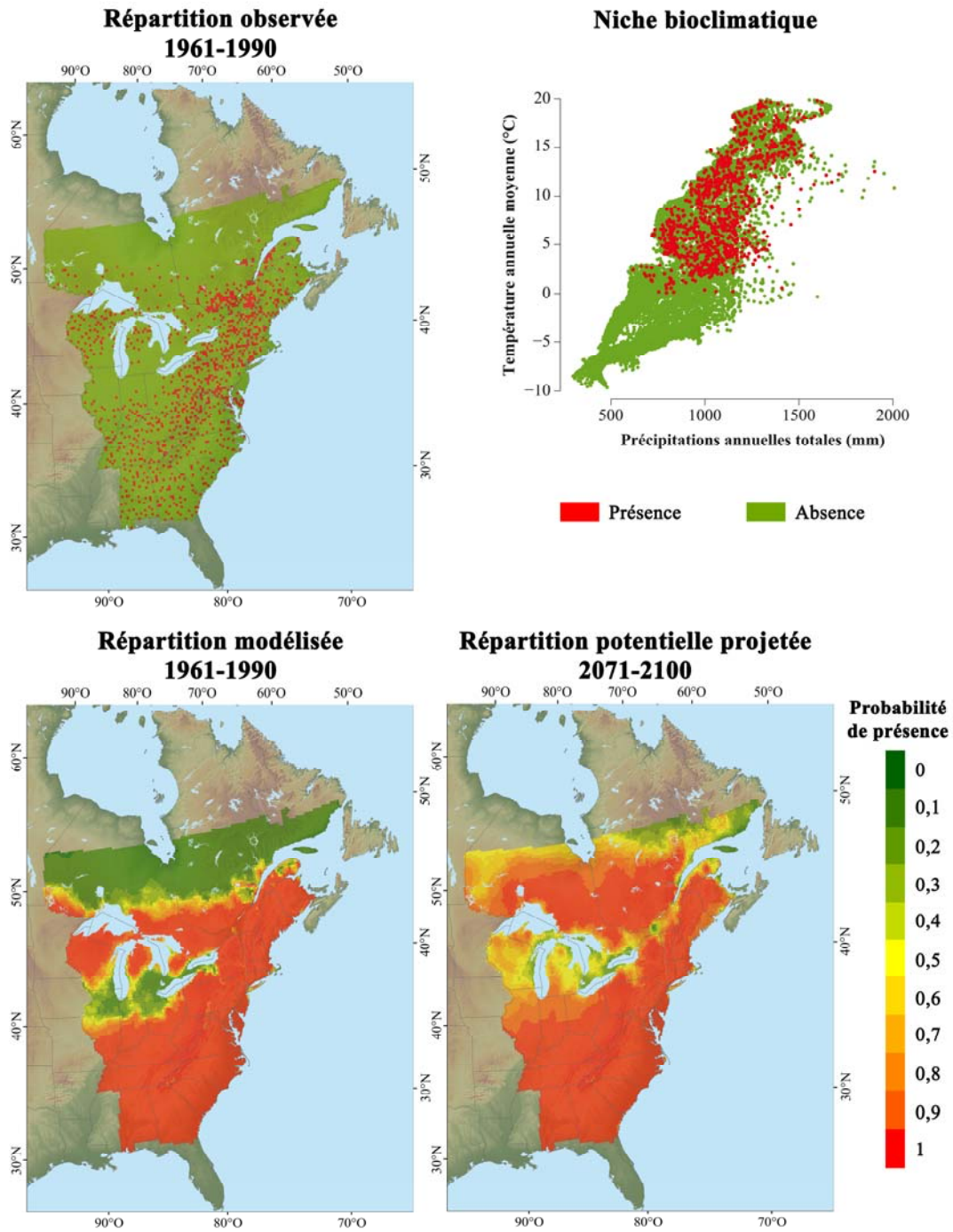


Figure 2 : Exemple de modèle de niche bioclimatique pour le Grand pic (*Dryocopus pileatus*) (données tirées du projet CC-Bio).

Les modèles de niche bioclimatique, qui sont abondamment utilisés dans la littérature, reposent sur certaines prémisses importantes. Ils supposent notamment que les espèces sont constamment en équilibre avec leur environnement, et que ces dernières ne vont pas évoluer durant la période couverte par la projection (Hampe, 2004; Pearson et Dawson, 2003). En outre, un point très important à retenir est que les modèles de niche indiquent où devrait se trouver le climat propice à chaque espèce dans le futur. Cependant, rien ne garantit que toutes les espèces puissent modifier leur répartition afin de suivre le déplacement de leur niche climatique. Par exemple, il est possible que la disponibilité des habitats empêche plusieurs espèces de suivre le déplacement de leur niche climatique (Berteaux *et al.*, 2014). De plus, les modèles de niche bioclimatique n'intègrent généralement pas la capacité de dispersion des espèces ni les relations biotiques, qui contribuent également à déterminer la répartition des espèces (Hampe, 2004; Pearson et Dawson, 2003). Les projections fournies par ces modèles doivent donc être considérées comme la répartition future *potentielle* des espèces. Malgré ces limitations, les modèles de niche bioclimatique n'en demeurent pas moins des outils puissants pour explorer les impacts potentiels des changements du climat sur la biodiversité (Berteaux *et al.*, 2014). Les modèles de niche bioclimatiques nécessitent peu d'information sur les espèces modélisées, peuvent être utilisés à large échelle pour un grand nombre d'espèces simultanément, et fournissent des résultats concrets et visuels pour illustrer les impacts potentiels des changements climatiques sur la biodiversité (Berteaux *et al.*, 2014). De ce fait, ils sont abondamment utilisés partout dans le monde (Araújo *et al.*, 2011; Hole *et al.*, 2009; Lawler *et al.*, 2009; Peterson *et al.*, 2002; Thuiller *et al.*, 2005; Warren *et al.*, 2013).

### **Les aires protégées dans le contexte des changements climatiques**

Selon la Convention sur la diversité biologique, les aires protégées constituent la pierre angulaire de la conservation *in situ* de la biodiversité (Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, 2004). Au Québec, le Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) est responsable de l'élaboration d'une

stratégie ministérielle de conservation de la biodiversité dans le cadre de son *Plan stratégique quinquennal 2009-2015*. Or, la gestion des aires protégées est directement concernée par les enjeux écologiques découlant des changements climatiques (Dudley, 2010; Hannah *et al.*, 2007; Peters, 1985; Scott *et al.*, 2002).

Le réseau d'aires protégées du Québec a été développé pour représenter chacun des types d'écosystèmes qui caractérisent le territoire québécois et, du même coup, une majeure partie de la biodiversité qui y est associée (MDDEP, 2009; Parcs Canada, 1997). La protection à long terme d'écosystèmes par le biais d'un réseau d'aires protégées spatialement fixe repose sur l'hypothèse d'une certaine stabilité climatique et biogéographique des milieux naturels à travers le temps. Cette prémisse n'est toutefois plus valide dans le contexte des changements climatiques. En effet, que ce soit par une altération des cycles de perturbations qui modifieraient la végétation existante ou par des changements dans la distribution des espèces, les milieux deviendront beaucoup plus dynamiques, perturbant ainsi le fonctionnement d'un réseau fixe qui tenterait de préserver des espèces en mouvement (Lemieux et Scott, 2005; Peters, 1985; Scott *et al.*, 2002). Monzón *et al.* (2011) ont documenté plusieurs impacts de ces changements dans la dynamique des communautés sur la biodiversité des aires protégées, et relèvent entre autres la présence d'espèces se dispersant hors d'une aire protégée, la propagation de pathogènes, de même que les déclinés de populations et les extinctions. Conséquemment, il apparaît d'autant plus complexe d'assurer la protection d'écosystèmes complets que la composition des communautés biologiques actuelles risque d'être considérablement modifiée (Hole *et al.*, 2009; Thuiller *et al.*, 2006). Dans l'immédiat, ces « nouvelles communautés » peuvent difficilement être intégrées aux plans de gestion et de conservation des aires protégées (Scott et Lemieux, 2005). Ajoutons finalement que bon nombre d'espèces ciblées comme étant valeurs de conservation prioritaires lors de l'établissement d'aires protégées pourraient quitter les limites de leurs aires de répartition actuelles.

À notre connaissance, l'intégration des changements globaux au design du réseau d'aires protégées et à la gestion de la conservation dans les aires protégées n'a pas encore

été effectuée au Québec ni ailleurs au Canada. C'est dans ce contexte qu'un projet de recherche-action visant à intégrer ces enjeux au cadre de gestion et de planification du réseau d'aires protégées du Québec a vu le jour (Bélangier et Brassard, 2012). Cette initiative, qui est un partenariat entre le MDDEFP, le ministère des Ressources naturelles (MRN), le consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques ainsi que des chercheurs du milieu universitaire, est divisée en plusieurs volets. L'objet du présent mémoire correspond au premier volet de la démarche et consiste à développer et à faire l'essai d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité de la biodiversité des aires protégées face aux changements climatiques.

### **Objectifs, approche méthodologique et principaux résultats**

L'objectif général de ce mémoire est de développer et d'appliquer une méthode pour évaluer la vulnérabilité de la biodiversité du réseau d'aires protégées du Québec méridional face aux changements climatiques. La vulnérabilité a été évaluée uniquement au niveau des espèces, l'une des composantes de la biodiversité, sans prendre en compte les niveaux génétique ou écosystémique. Les objectifs spécifiques sont (1) d'évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur la biodiversité des aires protégées et (2) d'évaluer l'efficacité du réseau actuel d'aires protégées à préserver la biodiversité actuelle. Puisque que la limite nord des aires de répartition de nombreuses espèces se trouve au Québec et puisque les contraintes climatiques imposées par les basses températures devraient s'atténuer dans le futur, nous prédisons que les conditions climatiques des aires protégées du Québec pourraient devenir favorables à un nombre important d'espèces et que la représentativité des espèces au sein du réseau pourraient s'accroître de façon substantielle si les aires de répartition des espèces s'ajustent aux changements du climat.

Nous avons utilisé les résultats du projet CC-Bio, dans lequel la niche climatique de plus de 500 espèces d'oiseaux, d'amphibiens, d'arbres et d'autres plantes vasculaires a été modélisée et projetée sous différents scénarios climatiques futurs (Berteaux *et al.*, 2010).

Nous avons calculé les gains, pertes et taux de renouvellement potentiels des espèces et étudié les patrons spatiaux associés à ces impacts potentiels (objectif spécifique 1). Nous avons également calculé les changements potentiels de représentativité des espèces au sein du réseau d'aires protégées (objectif spécifique 2).

Nos résultats suggèrent que les conditions climatiques des aires protégées du Québec pourraient devenir favorables à de nombreuses espèces d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle. Ces espèces seraient alors susceptibles d'étendre leur aire de répartition progressivement vers le nord, augmentant du même coup leur représentativité dans le réseau d'aires protégées. Des changements majeurs dans la composition des communautés biologiques des aires protégées sont également prédits par nos modèles.

**CHAPITRE 1**  
**IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA BIODIVERSITÉ :**  
**DÉFIS ET OCCASIONS POUR UN RÉSEAU NORDIQUE D'AIRES**  
**PROTÉGÉES**

**1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE**

Les changements climatiques représentent une menace majeure pour la conservation de la biodiversité au niveau mondial. Toutefois, de nombreuses populations animales et végétales situées à la limite nord de leur aire de répartition et dont la répartition est contrainte par les basses températures pourraient bénéficier du réchauffement climatique. Nous avons évalué les impacts potentiels des changements climatiques sur la biodiversité d'un réseau d'aires protégées situé en région nordique, au Québec, Canada. Nous avons utilisé les changements potentiels de probabilités d'occurrence de 529 espèces (oiseaux, amphibiens, arbres et autres plantes vasculaires) pour lesquels la niche climatique a été modélisée pour (1) évaluer les impacts potentiels des changements climatiques en calculant les gains, pertes et taux de renouvellement potentiels des espèces dans les aires protégées et (2) pour évaluer les changements potentiels de représentativité des espèces au sein du réseau d'aires protégées. Nos résultats révèlent que la biodiversité des aires protégées du Québec pourrait être profondément modifiée par les changements climatiques du 21<sup>e</sup> siècle. Nos modèles prédisent une augmentation régionale de la richesse spécifique et un taux de renouvellement important des espèces si ces dernières sont en mesure d'ajuster leurs aires de répartition aux nouvelles conditions climatiques. Au total, les communautés actuellement présentes sur 49 % de la surface des aires protégées pourrait subir un taux de renouvellement des espèces supérieur à 80 % d'ici 2071-2100. La représentation des espèces dans le réseau pourrait également s'accroître considérablement. Ces résultats

suggèrent que les aires protégées des régions nordiques pourraient servir de refuges pour de nombreuses espèces en déplacement vers le nord, jouant ainsi un rôle important pour la conservation de la biodiversité dans le contexte des changements climatiques. Toutefois, les gestionnaires d'aires protégées pourraient devoir composer avec de nouveaux assemblages d'espèces ainsi qu'avec un nombre croissant d'espèces exotiques dans le futur. Notre étude souligne l'importance de mettre en place des stratégies de conservation tant à des échelles locales que transfrontalières afin d'atteindre les objectifs de conservation de la biodiversité.

Cet article, intitulé « *Climate change impacts on biodiversity: challenges and opportunities for a northern protected area network* », est destiné à être soumis pour publication en 2014 à la revue *Biological Conservation*. Les coauteurs (Dominique Berteaux, Martin-Hugues St-Laurent et Nicolas Casajus) ont contribué à l'élaboration de l'étude et à la révision du manuscrit.



## 1.2 CLIMATE CHANGE IMPACTS ON BIODIVERSITY: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR A NORTHERN PROTECTED AREA NETWORK

Marylène Ricard<sup>1</sup>, Martin-Hugues St-Laurent<sup>2</sup>, Nicolas Casajus<sup>3</sup> and Dominique Berteaux<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Chaire de recherche du Canada en biodiversité nordique, Centre d'études nordiques et Groupe de recherche BORÉAS, Université du Québec à Rimouski, 300 allée des Ursulines, Rimouski, QC, G5L 3A1, Canada. Email: marylene.ricard@uqar.ca

<sup>2</sup> Centre d'études nordiques, Centre d'étude de la forêt et Groupe de recherche BORÉAS, Université du Québec à Rimouski, 300 allée des Ursulines, Rimouski, QC, G5L 3A1, Canada. Email: martin-hugues\_st-laurent@uqar.ca

<sup>3</sup> Chaire de recherche du Canada en biodiversité nordique, Centre d'études nordiques et Groupe de recherche BORÉAS, Université du Québec à Rimouski, 300 allée des Ursulines, Rimouski, QC, G5L 3A1, Canada. Email: nicolas\_casajus@uqar.ca

<sup>4\*</sup> **Corresponding author.** Chaire de recherche du Canada en biodiversité nordique, Centre d'études nordiques et Groupe de recherche BORÉAS, Université du Québec à Rimouski, 300 allée des Ursulines, Rimouski, QC, G5L 3A1, Canada. Phone: 418-723-1986 # 1910; Email: dominique\_berteaux@uqar.ca



**ABSTRACT**

Climate change is recognized as a major threat for global biodiversity. In contrast, global warming could also benefit many populations located at the northern limit of their species' range and that are limited by cold climate conditions. We assessed the potential impacts of climate change on the biodiversity of a northern protected area network in Quebec, Canada. We used changes in the potential probability of occurrence of 529 species (birds, amphibians, trees, and other vascular plants) for which the ecological niche has been modeled to (1) evaluate the potential impacts of climate change on biodiversity by calculating future potential species gains, losses, and turnover in protected areas, and (2) to evaluate potential changes in species representation across the protected area network. Our results reveal that biodiversity of protected areas of Quebec could be largely impacted by the climate change expected during the 21<sup>st</sup> century. In particular, we predict a regional increase in species richness and a major species turnover over time if species distributions shift according to predicted changes in climatic conditions. Overall, 49% of total protected surfaces might experience a species turnover greater than 80% by 2071-2100. Species representation in protected areas may also substantially increase. These results suggest that protected areas in northern regions might act as important refuges for species tracking climate northward in a near future. Moreover, our study supports the essential role played by protected areas for conservation of biodiversity under climate change. Nonetheless, protected area managers may have to deal with novel communities and with an increasing number of alien species in the future. Finally, our study stresses the undeniable necessity to

develop and implement our conservation management strategies at both local, national and large transboundary scales to achieve conservation targets.

**Keywords:** Biodiversity; climate change; distribution range; ecological niche model; northern region; protected area.

## 1. INTRODUCTION

Recent climate change is driving many plant and animal species to modify their phenology and geographic distribution (Parmesan, 2006). Meta-analyses of species range shifts estimated that range boundaries have recently moved, on average, 6.1 km per decade northward or 6.1 m per decade upward in the Northern Hemisphere (Parmesan and Yohe, 2003), and 16.9 km per decade northward or 11.0 m per decade upward for species of Europe, North America, Chile, Malaysia, and Marion Island (Chen et al., 2011). Many studies have tried to forecast the impacts of climate change on species ranges by projecting range shifts for plants and animals in response to future potential climate change. Projections have been made for large numbers of species in Europe (Araújo et al., 2011; Bakkenes et al., 2002; Thuiller et al., 2005), Africa (Hole et al., 2009; Thuiller et al., 2006), Australia (Williams et al., 2003), Mexico (Peterson et al., 2002), the Western Hemisphere (Lawler et al., 2009), and the whole world (Warren et al., 2013). Carrying out large-scale studies on biodiversity is critical because changes in biodiversity can strongly impact ecosystem functions and services (Cardinale et al., 2012).

Important species turnover rate is a recurrent forecast of climate change biological studies (Lawler et al., 2009; Peterson et al., 2002; Thuiller et al., 2006, 2005), and many species may face a considerable reduction of their suitable climate space, potentially facing extinction (Araújo et al., 2011; Coetzee et al., 2009; D'Amen et al., 2011; Thuiller et al., 2005; Velásquez-Tibatá et al., 2012; Warren et al., 2013). Paradoxally, many populations from northern latitudes could, however, rather benefit from global warming, if they are located at the northern range boundary of the species and limited by cold climate

conditions. For example, in temperate regions, ectothermic species like reptiles and amphibians might expand their distribution in response to warming if dispersal of individuals is allowed (Araújo et al., 2006). This expected northward expansion of species ranges, and the potential increase of regional species richness that this might incur, have been recently coined as the "northern biodiversity paradox" (Berteaux et al., 2010). Although several large scale studies have highlighted a potential increase in species richness in northern and temperate regions (Araújo et al., 2011; Bakkenes et al., 2002; Lawler et al., 2009; Thuiller et al., 2005), very few have specifically focused on regions where biodiversity could potentially increase due to climate change (Hof et al., 2012; Kerr and Packer, 1998).

Because protected area networks are our most valuable resource for in situ conservation of global biodiversity (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2004), many studies have tried to project future impacts of climate change on protected areas (Araújo et al., 2011; Hole et al., 2009; Monzón et al., 2011). Indeed, whereas protected areas are remarkably successful at buffering species from habitat loss and fragmentation, they may not similarly protect them from climate change (Monzón et al., 2011). The most obvious cases are those of endemic or threatened species for which climate conditions would become unsuitable in protected areas where they currently occur (Araújo et al., 2011; Coetzee et al., 2009; Hannah et al., 2005). In other cases, climate change could substantially reduce suitable climate space of presently unthreatened species inside protected area networks, potentially driving them to become endangered (Thuiller et al., 2006). Other impacts of global warming on protected areas include the potential colonization of invasive

or pest species (Benning et al., 2002; Simpson and Prots, 2012); indeed, protected areas may facilitate range expansion of colonizing species (Thomas et al., 2012). Significant disruption of current species assemblages has also been predicted inside protected areas (Hole et al., 2009; Thuiller et al., 2006). These impacts of climate change challenge our definition of the protected area's concept. Efficacy of protected area networks in preserving future biodiversity is still an unresolved issue, as various indicators suggest that protected areas may become less effective in the future (Coetzee et al., 2009; Leach et al., 2013; Velásquez-Tibatá et al., 2012), while others reveal that rigorously defined networks can play a key role in mitigating the worst impacts of climate change on biodiversity (Hannah et al., 2007; Hole et al., 2009).

In this paper, we tackled the northern biodiversity paradox by assessing the potential impacts of climate change on the biodiversity of protected areas spread into a  $> 600\,000\text{ km}^2$  region of eastern Canada. This area is characterized by a northern climate with cold winters and short summers and encompasses the northern range boundary of many species. We thus predicted that many species would see their suitable climate space expanding inside the study area as the climate warms during this century, leading to potential species gain and turnover within protected areas. We used changes in the potential probability of occurrence of 529 species of birds, amphibians, trees, and other vascular plants, for which the ecological niche have been modeled (Berteaux et al., 2010), to (1) evaluate potential impacts of climate change on biodiversity by calculating future potential species gains, losses, and turnover of species in protected areas, and (2) evaluate potential changes in species representation across the protected area network. We then discuss the

implications of our findings for biodiversity conservation and protected area management in cold climate regions.

## **2. METHODS**

### **2.1 Study design**

We used ecological niche modelling to forecast the potential effects of 21<sup>st</sup> century climate change on the distribution of a large set of species. These species currently occur in the studied network of protected areas or could potentially be found there in the future as climate warms up. We used 1961-1990 as our reference period and 2071-2100 as the period for which we modelled the future potential impacts of climate change on biodiversity.

We are fully aware that species will not necessarily track their new climatic conditions as climate locally improves or deteriorates, and local biodiversity may in some cases build considerable immigration credit or extinction debt (Jackson and Sax, 2010). Our results might thus largely overestimate the species turnovers that are expected in the coming decades. We reasoned, however, that our results are not meant to offer quantitative assessment of local changes in biodiversity within a specific time frame, but rather to provide an index of pressure on biodiversity due to climate change. The general trends indicated by our results should be robust enough to provide a valuable direction regarding the potential impacts of climate change.



## **2.2 Study area**

We studied the protected area network of the southern part of the province of Quebec, Canada; our study area extends from 45°N to 53°N (Fig. 1). Some protected areas occur north of 53°N, but were not studied because of lack data on species distributions. The study area is located inside the boreal forest/taiga and temperate broadleaf/mixed forest biomes (Tardif et al., 2005). Marine protected areas were excluded from analyses.

## **2.3 Species data**

Species data are described in Berteaux et al. (2010, 2014). They come from several Canadian and U.S. governmental survey databases and from large amateur observation programs. In short, we collected presence/absence data (1961-1990) on 176 species of birds, 40 species of amphibians, 90 species of trees, and 223 other vascular plants in each of 1786 20 km x 20 km grid cells of a large area covering most of eastern North America.

We excluded from our data set bird species breeding north of 53°N because data were missing from a large fraction of their northern breeding range. We lacked distribution data for amphibians and vascular plants from the province of Ontario, located south-east of Quebec, where occur some potential immigrants to Quebec (especially for plants) as climate warms during this century. For vascular plants (other than trees), we modelled only species already present in the province of Quebec. These constraints imposed on our samples of species and on the distribution data used for some species, generated some biases in our results that we will discuss later.

Although we studied only a fraction of the regional biodiversity, the selected species offered a good representation of the different types of species ranges (e.g., northern peripheral, subcosmopolitan), they have a diversified natural history (e.g., plants, herbivores, predators), they strongly structure ecosystems (e.g., trees), and some of them are focus of many conservation or management efforts. Therefore our results should be highly informative regarding the potential spatial reorganization of regional biodiversity (Berteaux et al., 2010, 2014).

## **2.4 Climate data**

We used a total of eight climatic variables to calibrate ecological niche models of species, but only three to four for each group of species (Table 1). Variables were selected for their biological relevance and for their performance in predicting reference species distributions. Climate for the reference period (1961-1990) was obtained by deriving raw climatic surfaces for maximum, minimum, and average temperatures and for total precipitations. These climate variables were downloaded from the U.S. Forest Service Rocky Mountain Research station website (<http://forest.moscowfs.l.wsu.edu/climate>) (Rehfeldt, 2006). Climate change scenarios for 2071-2100 originated from several global climate models made available by the World Climate Research Programme's Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (Meehl et al., 2007). These climate models were run under three projected greenhouse gas emissions scenarios (SRES family A2, A1B and B1 emissions scenarios). Climate simulations obtained from the high-resolution Canadian regional climate model run under the SRES family A2 were also used (Caya et Laprise,

1999). Due to their relative coarse horizontal resolution, these climate simulations were downscaled on the 20 km x 20 km grid using a linear triangle-based interpolation approach (more details are provided in Berteaux et al. (2010)).

## **2.5 Ecological niche modelling**

Ecological niche models relate the species distribution to a set of climatic variables (and also elevation and soil characteristics for tree species) and project the modeled relationship under climate change scenarios. As detailed in Berteaux et al. (2010, 2014), ecological niche modeling was performed using multiple statistical approaches (e.g., generalized linear models, generalized additive models, classification trees analyses, neural networks, random forest) within an ensemble forecasting framework (Araújo and New, 2006; Thuiller, 2004) in order to consider uncertainty due to differences in modeling and projection procedures. The analyses were performed using the BIOMOD package (Thuiller et al., 2009) implemented in the R statistical software (R Development Core Team, 2012). Results were synthesized using model averaging (Marmion et al., 2009; Raftery et al., 1997) to combine all the projections and summarize information while considering uncertainty. Resulting ecological niche models were then applied to project future potential distributions of species at a common continental scale. Values of probabilities of occurrence (the raw output of models) were then transformed into presence/absence data by using the sensitivity-specificity sum maximization approach (Liu et al., 2005).

## 2.6 Analyses

All analyses were done using R free software version 2.14.1 (R Development Core Team, 2012). Maps were generated using ArcMap software version 10.0 (ESRI, Redlands, USA). Results are expressed as mean  $\pm$  SD throughout the paper, except if stated otherwise.

### 2.5.1 Potential climate change impacts in protected areas

We calculated, for each protected area, the number of species for which climate conditions should become suitable (potential gain,  $G$ ) or unsuitable (potential loss,  $L$ ) in 2071-2100, and divided these values by the current species richness ( $S$ ) to obtain potential relative species gain ( $RSG$ ) and loss ( $RSL$ ), respectively, as follows:

$$RSG = 100 \times G/S$$

$$RSL = 100 \times L/S$$

We also calculated the potential species turnover ( $ST$ ) for each protected area following Peterson et al. (2002):

$$ST = 100 \times (G + L)/(S + G)$$

$ST$  values range from 0 (i.e. species composition does not change between the reference and future time periods) to 100% (i.e. species composition completely changes between time periods). Species that are absent during the reference period from a given cell in which climate conditions should become suitable in 2071-2100 could potentially colonize that cell ( $G$ ). On the other hand, species for which climate conditions should become unsuitable in a given cell may potentially become extirpated in that cell ( $L$ ).

### 2.5.2 Potential climate change impacts on species conservation

The potential change in species representation in the protected area network was calculated for each species. Species absent from the study area according to modeled species distributions for the 1961-1990 period were excluded from the analyses. Potential change in representation ( $\Delta Rep$ ) was defined as the change in the protected surface a species is projected to occur in between 1961-1990 (*Reference Rep*) and 2071-2100 (*Future Rep*), expressed as a percentage of the protected surface a species is projected to occur in at the reference time period.

$$\Delta Rep = 100 \times (Future\ Rep - Reference\ Rep) / Reference\ Rep$$

$\Delta Rep$  could be positive (i.e. species might become more represented in the protected area network in the future) or negative (i.e. species might become less well represented in the protected area network in the future). We considered species that might become better represented in the protected area network in the future to be less prone to conservation threats.

## 3. RESULTS

### 3.1 Characteristics of the studied protected area network

We studied 1749 protected areas, or 72% of the 2439 protected areas found in the province of Quebec. The studied protected areas represent 32% (43 689 km<sup>2</sup>) of the surface covered by the provincial network of protected areas, and 95% of these studied areas cover less than 50 km<sup>2</sup> (Fig. 2). Our analyses cover a wide range of IUCN protected area categories, with categories IV (37%) and VI (30%) being the most represented (Fig. 2). However, these two

IUCN categories, which offer relatively low level of protection to biodiversity, represent only 7% and 4% of the total surface covered by the studied areas, respectively (data not shown). On the other hand, the largest protected areas within the study area seem to benefit from higher level of protection since 6%, 22%, and 65% of protected areas covering 100 km<sup>2</sup> or more are designated as categories Ia, II, and III, respectively (Fig. 2).

### **3.2 Potential climate change impacts in protected areas**

In 2071-2100, climate is expected to become suitable for numerous species in protected areas of southern Quebec, with a potential relative species gain ranging from 12 to 530% ( $92\% \pm 93$ ) according to protected areas. This effect is emphasized in northernmost protected areas (Fig. 1a). Because many large protected areas are located in northern parts of the study area, 67% of the total protected surface, when protected area polygons are dissolved to avoid overlays, could experience a relative species gain  $\geq 100\%$  if species distributions were to shift according to predicted changes in climatic conditions. However, many species could also lose suitable climate space in protected areas, especially in the southernmost protected areas and, to a lesser extent, in northern and western areas where the potential relative species loss ranges from 7 to 55% ( $24\% \pm 10$ ; Fig. 1b). Locally, our models suggest that climate change will impose a strong pressure on species composition, with a potential species turnover ranging from 37 to 91% ( $55\% \pm 12$ ), again if species distributions were to shift according to climate change. This effect is clearly stronger at higher latitudes (Fig. 1c). Overall, 49% of total protected surface might experience a species turnover  $\geq 80\%$ .

### **3.3 Potential climate change impacts on species conservation**

Because many species could find newly suitable climatic conditions in protected areas by 2071-2100, species representation in protected areas could substantially increase if species distributions shift according to predicted changes in climatic conditions. These potential changes in species representation range from -100% to 1 712 873% (median = 177%  $\pm$  239 MAD [median absolute deviation]; Fig. 3) according to our simulations. Only 11% of species might lose representation in protected areas.

## **4. DISCUSSION**

### **4.1 Potential climate change impacts in a northern protected area network**

Our results support the hypothesis that biodiversity of northern regions could be largely impacted by climate change, potentially resulting in a regional increase in species richness and in a major species turnover over time if species distributions shifted according to predicted changes in climatic conditions. Indeed, our results reveal that climate conditions in the province might become suitable to many North American species, which might in turn expand their distribution ranges northward and increase their representation in protected areas in southern Quebec. This northward expansion is concordant with modelling results of previous studies conducted in northern and temperate regions for trees and shrubs (Morin and Thuiller, 2009; Normand et al., 2013), birds (Matthews et al., 2004; Ralston and Kirchman, 2012), mammals (Hof et al., 2012; Kerr and Packer, 1998), as well as for the ticks *Ixodes scapularis* and *Ixodes ricinus* (Ogden et al., 2008; Porretta et al.,

2013). Because of lower current species richness at higher latitudes (Willig, 2001), the northernmost protected areas could experience the higher relative species gains, as confirmed by our results. In addition, because of sampling bias introduced in the modeling of vascular plants (i.e. only species currently observed in the province of Quebec were modeled, so no potential immigration was allowed from the south), we can reasonably assume that climate conditions in the province could become suitable to an even greater number of species than what our results suggest.

Potential species gains should not draw away the attention from potential local extirpations of species that may no longer find suitable conditions in protected areas where they currently occur. The geographical pattern of potential relative species loss suggests that several species could face local extirpations in the southernmost protected areas of Quebec. However, relative species loss might also be important in protected areas located at higher latitudes, where only few local extirpations can have drastic effects on more simple and vulnerable communities (Eklof and Ebenman, 2006). Moreover, sampling bias in the modeling of birds (i.e. species breeding north of 53°N have been systematically excluded from ecological niche modeling) may potentially mask more important species losses in the northernmost areas. These potential extirpations are of great concern for conservation management because protected areas are often specifically designed to preserve vulnerable species from human threats, and we demonstrate that such species can be dragged out of reserves by climate change.

As shown by our results, climate change could lead to major changes in the composition of current biological communities in protected areas of Quebec. Greater turnover rates are



expected in the northernmost protected areas, where relatively simple communities could be highly affected by a proportionally high number of immigrant species. The potential reorganization of biodiversity in protected areas can have drastic consequences on species interactions and ecosystem dynamics. Changes in community structure and composition may affect species-mediated ecological processes (Williams et al., 2008), lead to a rupture of present biotic interactions (Parmesan, 2006), or have indirect effects on other species via trophic web (Duffy, 2003; Schmitz et al., 2003). Moreover, species that do not currently coexist may do so in the future (Williams and Jackson, 2007). Predicting the outcomes of new interactions in these novel communities is a huge challenge for conservation biologists.

#### **4.2 Limits and scope of ecological niche models**

The efficiency, relevance, and realism of ecological niche models have been extensively debated in the last decade (Hampe, 2004; Pearson and Dawson, 2003). In particular, the fact that they ignore parameters such as biotic interactions and dispersal has been presented as important limitations (Hampe, 2004; Pearson and Dawson, 2003). These are important issues in the context of this study, where determining if species will be able to effectively track their shifting suitable climate space is a central question. Indeed, substantial lags between recent climate change and resulting immigration have been demonstrated for butterflies in Great Britain (Menendez et al., 2006), for tree populations in western North America (Gray and Hamann, 2012), and for birds in North America (La Sorte and Jetz, 2012) and in France (Devictor et al., 2008). Colonization processes require sequential

successes in the dispersal, establishment, and survival of individuals on new suitable sites as well as growth and persistence of populations via continued reproduction (Jackson and Sax, 2010). Immigration of species could be delayed if any of these steps is hampered.

Several factors can impede or delay immigration of species in protected areas of Quebec. First, competition with presently-established species can strongly limit colonization by potential newcomers (Urban et al., 2012). For example, persistence of long-lived conifers in the boreal biome of Quebec could delay the northward expansion of deciduous species. Second, according to a review of empirical dispersal rates, "realistic" dispersal rates could be of 1.5 to 3 km/year for birds and 0.1 to 0.5 km/year for reptiles, amphibians, and plants (Warren et al., 2013). However, the velocity of the 5 °C isotherm shift is projected to be about 2 km/year during this century in Quebec (Berteaux et al., 2010). Insufficient dispersal capacities of species could thus lead to immigration delay in response to rapid or abrupt climate change. Finally, habitat fragmentation by natural (e.g., the St. Lawrence River that divides southern Quebec from east to west) and anthropogenic landscape features (e.g., the Montreal urbanized area, the vast agricultural areas in southern Quebec, and the forested habitats strongly impacted by logging) can substantially reduce connectivity between suitable patches and impede dispersal rates of organisms (Collingham and Huntley, 2000; Dyer, 1994; Higgins et al., 2003). Fragmentation and habitat loss can also delay immigration by reducing density and size of patches (Jackson and Sax, 2010). This could have strong implications on species' ability to migrate from one protected area to others in a highly fragmented landscape.

However, considering the inherent bias for ecological niche models toward over-estimating climate-driven vulnerability to extirpation, we believe that ecological niche models may be especially relevant in northern areas where an increase in species richness is often expected as such models are known to be more efficient in identifying newly suitable sites under climate change (Schwartz, 2012).

### **4.3 Conservation implications**

Our results suggest that protected areas of northern regions such as Quebec might become important refuges for numerous species tracking climate northward. This advocates for the essential role played by protected areas on biodiversity conservation under climate change, especially large northernmost protected areas. The province of Quebec covers more than 1.5 million km<sup>2</sup>, extends over 2000 km from south to north, and is characterized by various climates and biomes and by its low biodiversity. Moreover, the province is connected with the continent by its southern boundary, and presents a decreasing south-north gradient of human footprint. Hence, Quebec appears to offer good opportunities for species threatened by climate change further south and tracking suitable climatic conditions northward. However, to play such a key role in preserving regional and continental biodiversity, the protected area network of Quebec must be completed as the network currently covers only less than 10% of the province surface. In addition, an important number of current protected areas are of IUCN categories IV and VI, and thus offer relatively low level of protection to biodiversity.

The efficiency of protected areas of Quebec in preserving biodiversity could also be seriously compromised by limitations to dispersal. For instance, if extinction processes take place faster than immigration due to serious constraints to dispersal, a biodiversity deficit can occur and even become permanent if species are trapped between rapid retreat and slow advance for decades or centuries (Jackson and Sax, 2010). Communities can thus be temporarily or locally impoverished even in areas where ecological niche models ultimately project a regional increase in species richness. In southernmost regions of Quebec, the metropolitan urbanized area of Montreal and the highly fragmented agro-forested habitats might represent major barriers to dispersal for populations seeking to colonize habitats northward. Therefore, increasing regional landscape connectivity between protected areas and identifying potential immigration corridors in southernmost regions of the province should be a priority for conservationists. Collaborative landscape conservation programs should be promoted to preserve and restore habitat corridors and to guide transboundary conservation efforts. For instance, the Two Countries One Forest project, implemented in the Canadian-U.S. northern Appalachian/Acadian ecoregion, is one of the first initiatives in this direction (<http://www.2c1forest.org>).

Our results reveal that protected area managers may have to deal with an increasing number of alien species in the future. Moreover, colonizing species appear to favour protected areas over unprotected sites (Thomas et al., 2012), and the numerous impacts of introduced species on ecosystem functions and structure in protected areas have been well documented by MacDonald et al. (1989). Among these impacts, colonization of protected areas by non-native, pest, or invasive species can lead to extinction of native species. Also, climate-

driven local colonizations by invasive species and climate constraints induced by climate change can have cumulative impacts on endangered species (Gallardo and Aldridge, 2013; Imbert et al., 2012). Local transient biodiversity accrual might thus mask an eventual decline (Jackson and Sax, 2010), and lead to misguided management measures and policies. Paradoxically, self-sustaining populations of non-native species could become necessary in some protected areas in order to ensure local ecosystem functions and services if historical communities are deeply modified (Walther et al., 2009). In this context, deciding which new species should be controlled and which should be tolerated or even favored will challenge protected area managers in their willingness to identify conservation priorities. We recommend implementing strict monitoring of alien species and control strategies for invasive species in conservation plans of protected areas. Raising park visitors' awareness to report observations of unusual species could also be a good way to get relevant information on alien species at low cost.

Assigning conservation status to recently naturalized rare non-native species, that may be common farther south, is also a thorny issue. In Canada as in other high-latitude countries, northern peripheral species are already a significant proportion of species at risk (Gibson et al., 2009). These species can have negative impacts on native communities locally; however, from a wider point of view, genetic diversity of leading-edge peripheral populations seems to play a decisive role in species' ability to cope with climate change (Gibson et al., 2009). Hence, conservation value of rare new species should be considered in a long-term continental perspective.

Finally, our study highlights major future potential biodiversity changes in a northern protected area network, and stresses the undeniable necessity to conduct conservation management on both local and large transboundary scales. Since climate change challenges biodiversity conservation regardless of national borders, conservationists must now develop joint management framework with neighbouring states and countries.

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

This project was financially supported by the Ministry of Sustainable Development, Environment, Wildlife and Parks of Quebec (MDDEFP) in the context of the implementation of Quebec 2006-2012 Climate Change Action Plan. Our study was implemented as part of the project "Adaptation aux changements climatiques du design et de la gestion du réseau d'aires protégées au Québec", led by Louis Bélanger (Université Laval) and François Brassard (MDDEFP). The CC-Bio project is administered at Université du Québec à Rimouski and was financially supported by (alphabetical order): Ducks Unlimited Canada, Government of Canada, Ministry of Natural Resources of Quebec, the Ouranos consortium on regional climatology and adaptation to climate change, and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (Strategic Project Grant STPGP 350816-07). Financial support was also partially provided to M. Ricard from a NSERC-Discovery grant awarded to M.-H. St-Laurent. We thank all the students and researchers working in CC-Bio.





## REFERENCES

- Araújo, M.B., Alagador, D., Cabeza, M., Nogués-Bravo, D., Thuiller, W., 2011. Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters* 14, 484–492.
- Araújo, M.B., New, M., 2006. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution* 22, 42–47.
- Araújo, M.B., Thuiller, W., Pearson, R.G., 2006. Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *Journal of Biogeography* 33, 1712–1728.
- Bakkenes, M., Alkemade, J.R.M., Ihle, F., Leemans, R., Latour, J.B., 2002. Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global Change Biology* 8, 390–407.
- Benning, T.L., LaPointe, D., Atkinson, C.T., Vitousek, P.M., 2002. Interactions of climate change with biological invasions and land use in the Hawaiian Islands: modeling the fate of endemic birds using a geographic information system. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99, 14246–14249.
- Berteaux, D., Casajus, N., de Blois, S., 2014. *Changements climatiques et biodiversité du Québec : vers un nouveau patrimoine naturel*. Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada.
- Berteaux, D., de Blois, S., Angers, J.-F., Bonin, J., Casajus, N., Darveau, M., Fournier, F., Humphries, M.M., McGill, B., Larivée, J., Logan, T., Nantel, P., Périé, C., Poisson, F., Rodrigue, D., Rouleau, S., Siron, R., Thuiller, W., Vescovi, L., 2010. The CC-Bio project: studying the effects of climate change on Quebec biodiversity. *Diversity* 2, 1181–1204.

- Cardinale, B.J., Duffy, J.E., Gonzalez, A., Hooper, D.U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G.M., Tilman, D., Wardle, D.A., Kinzig, A.P., Daily, G.C., Loreau, M., Grace, J.B., Larigauderie, A., Srivastava, D.S., Naeem, S., 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* 486, 59–67.
- Caya, D., Laprise, R., 1999. A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model: The Canadian RCM. *Monthly Weather Review* 127:341–362.
- Chen, I.-C., Hill, J.K., Ohlemuller, R., Roy, D.B., Thomas, C.D., 2011. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science* 333, 1024–1026.
- Coetzee, B.W.T., Robertson, M.P., Erasmus, B.F.N., Van Rensburg, B.J., Thuiller, W., 2009. Ensemble models predict Important Bird Areas in southern Africa will become less effective for conserving endemic birds under climate change. *Global Ecology and Biogeography* 18, 701–710.
- Collingham, Y.C., Huntley, B., 2000. Impacts of habitat fragmentation and patch size upon migration rates. *Ecological Applications* 10, 131–144.
- D’Amen, M., Bombi, P., Pearman, P.B., Schmatz, D.R., Zimmermann, N.E., Bologna, M.A., 2011. Will climate change reduce the efficacy of protected areas for amphibian conservation in Italy? *Biological Conservation* 144, 989–997.
- Devictor, V., Julliard, R., Couvet, D., Jiguet, F., 2008. Birds are tracking climate warming, but not fast enough. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 275, 2743–2748.
- Duffy, J.E., 2003. Biodiversity loss, trophic skew and ecosystem functioning. *Ecology Letters* 6, 680–687.

- Dyer, J.M., 1994. Land use pattern, forest migration, and global warming. *Landscape and Urban Planning* 29, 77–83.
- Eklof, A., Ebenman, B., 2006. Species loss and secondary extinctions in simple and complex model communities. *Journal of Animal Ecology* 75, 239–246.
- Gallardo, B., Aldridge, D.C., 2013. Evaluating the combined threat of climate change and biological invasions on endangered species. *Biological Conservation* 160, 225–233.
- Gibson, S.Y., Van Der Marel, R.C., Starzomski, B.M., 2009. Climate Change and Conservation of Leading-Edge Peripheral Populations. *Conservation Biology* 23, 1369–1373.
- Gray, L.K., Hamann, A., 2012. Tracking suitable habitat for tree populations under climate change in western North America. *Climatic Change* 117, 289–303.
- Hampe, A., 2004. Bioclimate envelope models: what they detect and what they hide. *Global Ecology and Biogeography* 13, 469–471.
- Hannah, L., Midgley, G., Hughes, G., Bomhard, B., 2005. The view from the Cape: extinction risk, protected areas, and climate change. *BioScience* 55, 231–242.
- Higgins, S.I., Lavorel, S., Revilla, E., 2003. Estimating plant migration rates under habitat loss and fragmentation. *Oikos* 101, 354–366.
- Hof, A.R., Jansson, R., Nilsson, C., 2012. Future climate change will favour non-specialist mammals in the (sub)arctics. *PLoS ONE* 7(12), e52574.
- Hole, D.G., Willis, S.G., Pain, D.J., Fishpool, L.D., Butchart, S.H.M., Collingham, Y.C., Rahbek, C., Huntley, B., 2009. Projected impacts of climate change on a continent-wide protected area network. *Ecology Letters* 12, 420–431.

- Imbert, C.-E., Goussard, F., Roques, A., 2012. Is the expansion of the pine processionary moth, due to global warming, impacting the endangered Spanish moon moth through an induced change in food quality? *Integrative Zoology* 7, 147–157.
- Jackson, S.T., Sax, D.F., 2010. Balancing biodiversity in a changing environment: extinction debt, immigration credit and species turnover. *Trends in Ecology & Evolution* 25, 153–160.
- Kerr, J., Packer, L., 1998. The impact of climate change on mammal diversity in Canada. *Environmental Monitoring and Assessment* 49, 263–270.
- La Sorte, F.A., Jetz, W., 2012. Tracking of climatic niche boundaries under recent climate change: niche tracking under recent climate change. *Journal of Animal Ecology* 81, 914–925.
- Lawler, J.J., Shafer, S.L., White, D., Kareiva, P., Maurer, E.P., Blaustein, A.R., Bartlein, P.J., 2009. Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere. *Ecology* 90, 588–597.
- Leach, K., Zalut, S., Gilbert, F., 2013. Egypt's protected area network under future climate change. *Biological Conservation* 159, 490–500.
- Liu, C., Berry, P.M., Dawson, T.P., Pearson, R.G., 2005. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography* 28, 385–393.
- MacDonald, I.A., Loope, L.L., Usher, M.B., Hamann, O., 1989. Wildlife conservation and the invasion of nature reserves by introduced species: a global perspective, in: Drake, J.A. et al. (Eds.), *Biological invasions: a global perspective*. John Wiley & Sons, New York, USA, pp. 215–256.

- Marmion, M., Parviainen, M., Luoto, M., Heikkinen, R.K., Thuiller, W., 2009. Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and distributions* 15, 59–69.
- Matthews, S.N., O'Connor, R.J., Iverson, L.R., Prasad, A.M., 2004. Atlas of climate change effects in 150 bird species of the Eastern United States. US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, Newtown Square, USA.
- Meehl, G. A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer, and K. E. Taylor. 2007. The WCRP CMIP3 multi-model dataset: a new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88:1383–1394.
- Menendez, R., Megias, A.G., Hill, J.K., Braschler, B., Willis, S.G., Collingham, Y., Fox, R., Roy, D.B., Thomas, C.D., 2006. Species richness changes lag behind climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 273, 1465–1470.
- Monzón, J., Moyer-Horner, L., Palamar, M.B., 2011. Climate change and species range dynamics in protected areas. *BioScience* 61, 752–761.
- Morin, X., Thuiller, W., 2009. Comparing niche- and process-based models to reduce prediction uncertainty in species range shifts under climate change. *Ecology* 90, 1301–1313.
- Normand, S., Randin, C., Ohlemuller, R., Bay, C., Hoyer, T.T., Kjaer, E.D., Korner, C., Lischke, H., Maiorano, L., Paulsen, J., Pearman, P.B., Psomas, A., Treier, U.A., Zimmermann, N.E., Svenning, J.-C., 2013. A greener Greenland? Climatic potential

- and long-term constraints on future expansions of trees and shrubs. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20120479.
- Ogden, N.H., Bigras-Poulin, M., Hanincová, K., Maarouf, A., O’Callaghan, C.J., Kurtenbach, K., 2008. Projected effects of climate change on tick phenology and fitness of pathogens transmitted by the North American tick *Ixodes scapularis*. *Journal of Theoretical Biology* 254, 621–632.
- Parnesan, C., 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 37, 637–669.
- Parnesan, C., Yohe, G., 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421, 37–42.
- Pearson, R.G., Dawson, T.P., 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12, 361–371.
- Peterson, A.T., Ortega-Huerta, M.A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Buddemeier, R.H., Stockwell, D.R.B., 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416, 626–629.
- Porretta, D., Mastrantonio, V., Amendolia, S., Gaiarsa, S., Epis, S., Genchi, C., Bandi, C., Otranto, D., Urbanelli, S., 2013. Effects of global changes on the climatic niche of the tick *Ixodes ricinus* inferred by species distribution modelling. *Parasites & Vectors* 6, 271.

- R Development Core Team, 2012. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.  
<<http://www.r-project.org>> [accessed on December 2012].
- Raftery, A.E., Madigan, D., Hoeting, J.A., 1997. Bayesian model averaging for linear regression models. *Journal of the American Statistical Association* 92, 179–191.
- Ralston, J., Kirchman, J.J., 2012. Predicted range shifts in North American boreal forest birds and the effect of climate change on genetic diversity in blackpoll warblers (*Setophaga striata*). *Conservation Genetics* 14, 543–555.
- Rehfeldt, G.E., 2006. A spline model of climate for the Western United States. General technical report RMRS-GTR-165. US. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, USA.
- Schmitz, O.J., Post, E., Burns, C.E., Johnston, K.M., 2003. Ecosystem responses to global climate change: moving beyond color mapping. *BioScience*, 53, 1199–1205.
- Schwartz, M.W., 2012. Using niche models with climate projections to inform conservation management decisions. *Biological Conservation* 155, 149–156.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2004. Programme of Work on Protected Areas (CBD Programmes of Work), Montreal, Canada.
- Simpson, M., Prots, B., 2012. Predicting the distribution of invasive plants in the Ukrainian Carpathians under climatic change and intensification of anthropogenic disturbances: implications for biodiversity conservation. *Environmental Conservation* 40, 167–181.

- Tardif, B.; Lavoie, G.; Lachance, Y., 2005. Québec biodiversity atlas - Threatened or vulnerable species. Gouvernement du Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, Canada.
- Thomas, C.D., Gillingham, P.K., Bradbury, R.B., Roy, D.B., Anderson, B.J., Baxter, J.M., Bourn, N.A., Crick, H.Q., Findon, R.A., Fox, R., 2012. Protected areas facilitate species' range expansions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, 14063–14068.
- Thuiller, W., 2004. Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. *Global Change Biology* 10, 2020–2027.
- Thuiller, W., Broennimann, O., Hughes, G., Alkemade, J.R.M., Midgley, G.F., Corsi, F., 2006. Vulnerability of African mammals to anthropogenic climate change under conservative land transformation assumptions. *Global Change Biology* 12, 424–440.
- Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R., Araújo, M.B., 2009. BIOMOD - a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography* 32, 369–373.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M.B., Sykes, M.T., Prentice, I.C., 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102, 8245–8250.
- Urban, M.C., Tewksbury, J.J., Sheldon, K.S., 2012. On a collision course: competition and dispersal differences create no-analogue communities and cause extinctions during climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279, 2072–2080.



- Velásquez-Tibatá, J., Salaman, P., Graham, C.H., 2012. Effects of climate change on species distribution, community structure, and conservation of birds in protected areas in Colombia. *Regional Environmental Change* 13, 235–248.
- Walther, G.-R., Roques, A., Hulme, P.E., Sykes, M.T., Pyšek, P., Kühn, I., Zobel, M., Bacher, S., Botta-Dukát, Z., Bugmann, H., Czúcz, B., Dauber, J., Hickler, T., Jarošík, V., Kenis, M., Klotz, S., Minchin, D., Moora, M., Nentwig, W., Ott, J., Panov, V.E., Reineking, B., Robinet, C., Semchenko, V., Solarz, W., Thuiller, W., Vilà, M., Vohland, K., Settele, J., 2009. Alien species in a warmer world: risks and opportunities. *Trends in Ecology & Evolution* 24, 686–693.
- Warren, R., VanDerWal, J., Price, J., Welbergen, J.A., Atkinson, I., Ramirez-Villegas, J., Osborn, T.J., Jarvis, A., Shoo, L.P., Williams, S.E., Lowe, J., 2013. Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss. *Nature Climate Change* 3, 678–682.
- Williams, J.W., Jackson, S.T., 2007. Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, 475–482.
- Williams, S.E., Bolitho, E.E., Fox, S., 2003. Climate change in Australian tropical rainforests: an impending environmental catastrophe. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 270, 1887–1892.
- Williams, S.E., Shoo, L.P., Isaac, J.L., Hoffmann, A.A., Langham, G., 2008. Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change. *PLoS Biology* 6(12), e325.

Willig, M. R., 2001. Latitudinal gradients in diversity, in: Levin, S. (Eds.), *Encyclopedia of Biodiversity*. Volume 3. Academic Press, San Diego, USA, pp. 701–714.

## TABLE AND FIGURE LEGENDS

**Table 1:** Climatic variables used to calibrate ecological niche models for different groups of species.

**Figure 1:** Vulnerability of biodiversity (529 species of birds, amphibians, trees, and other vascular plants assessed) to climate change for 2071-2100 in protected areas of southern Quebec, Canada. Left – Spatial pattern of potential relative species gain (a), potential relative species loss (b), and potential species turnover (c) in protected areas. Potential relative species gain and loss are expressed as a percentage of the modelled species richness for the reference period (1961-1990). The area covered by ecological niche modelling performed by Berteaux et al. (2010), used later to calculate vulnerability indices, is identified by hatching on the top left box (a). Right – Proportion of protected areas ( $n = 1749$ ) and proportion of total protected surface ( $n = 42\,676\text{ km}^2$ ; protected area polygons were dissolved to avoid overlays) in each value class for each vulnerability index. Lower and upper bounds of each class of relative species gain (a), loss (b), and turnover (c) are shown between histogram bars. \* Upper bound of the last class of relative species gain (a): 530%.

**Figure 2:** Proportions of protected areas in each IUCN category according to size classes of protected areas in the study area, southern Quebec, Canada. Lower and upper bounds of size classes are presented between histogram bars. Protected areas that could be associated to multiple IUCN categories or for which classification has not yet been completed are

identified as "others". Numbers on top of bars indicate the numbers of protected areas in each size class. \* Upper bound of the last size class: 11 490 km<sup>2</sup>.

**Figure 3:** Proportion of species in each class of potential change in species representation in protected surface (n = 450). Potential change in representation is defined as the change in the protected surface a species is projected to occur in between the reference time period (1961-1990) and 2071-2100, expressed as a percentage of the protected surface a species is projected to occur in at the reference time period. Lower and upper bounds of each class of potential change are presented between histogram bars. Percentage of increase in representation is shown by green bars and percentage of decrease by red bars. Species absent from the study area according to modeled species distributions for the reference period were excluded from the analysis. \* Upper bound of the last class of potential change: 1 712 873%.

**Table 1**

Climatic variable	Birds	Amphibians	Trees	Other vascular plants
Mean annual temperature	x	x	x	
Temperature annual range <sup>1</sup>	x	x		
Annual growing degree days				x
Total annual precipitations		x	x	x
Useful precipitations <sup>2</sup>			x	
Precipitations of wettest month <sup>3</sup>	x			
Precipitation seasonality <sup>4</sup>	x	x		
Mean annual water balance <sup>5</sup>				x

<sup>1</sup>Difference between maximal and minimal annual temperature

<sup>2</sup>Ratio of summer precipitations and total annual precipitations

<sup>3</sup>Total precipitations in the wetter month

<sup>4</sup>Total annual precipitation coefficient of variation

<sup>5</sup>Difference between total annual precipitations and potential annual evapotranspiration calculated with the Thornthwaite equation

Figure 1

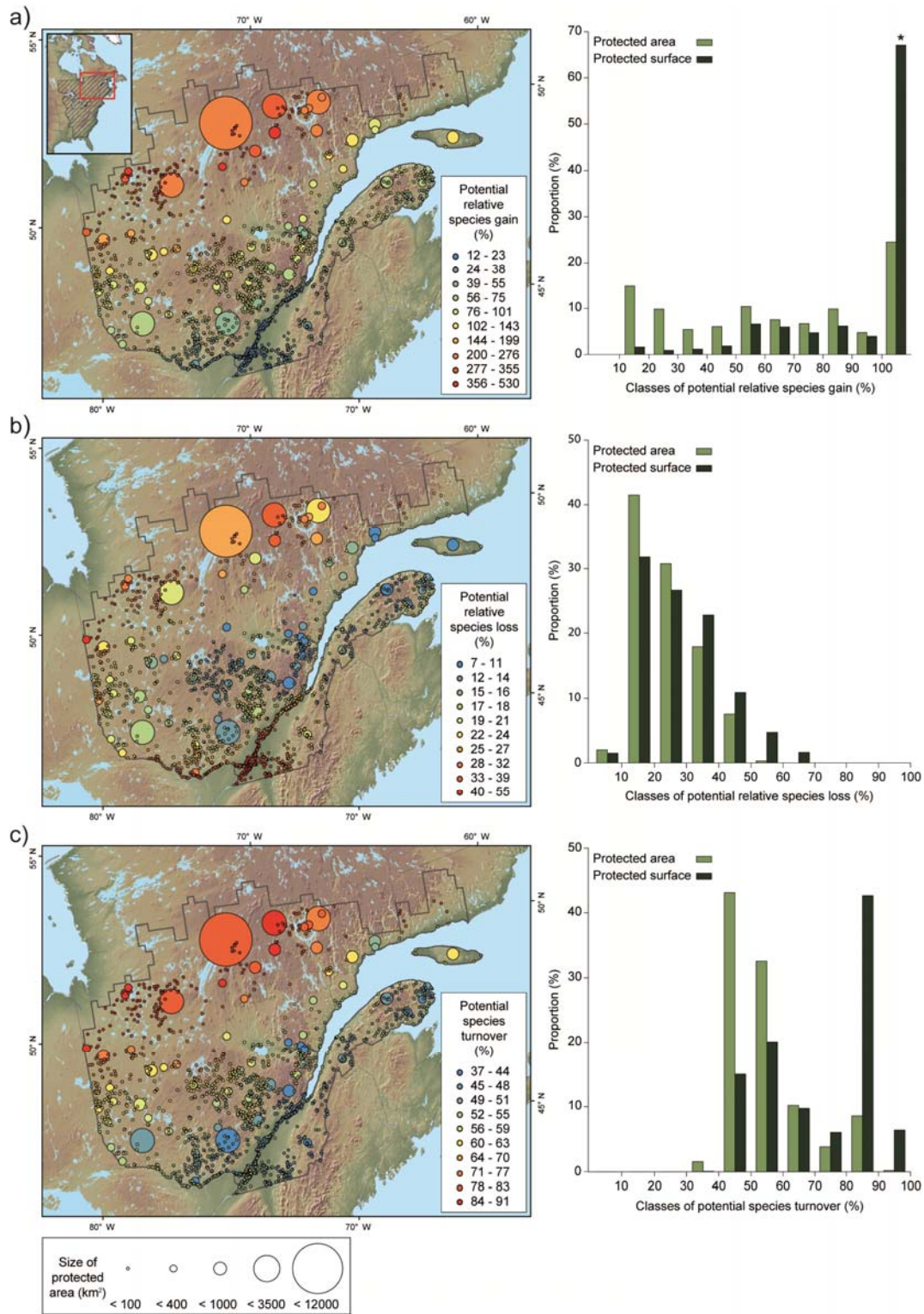
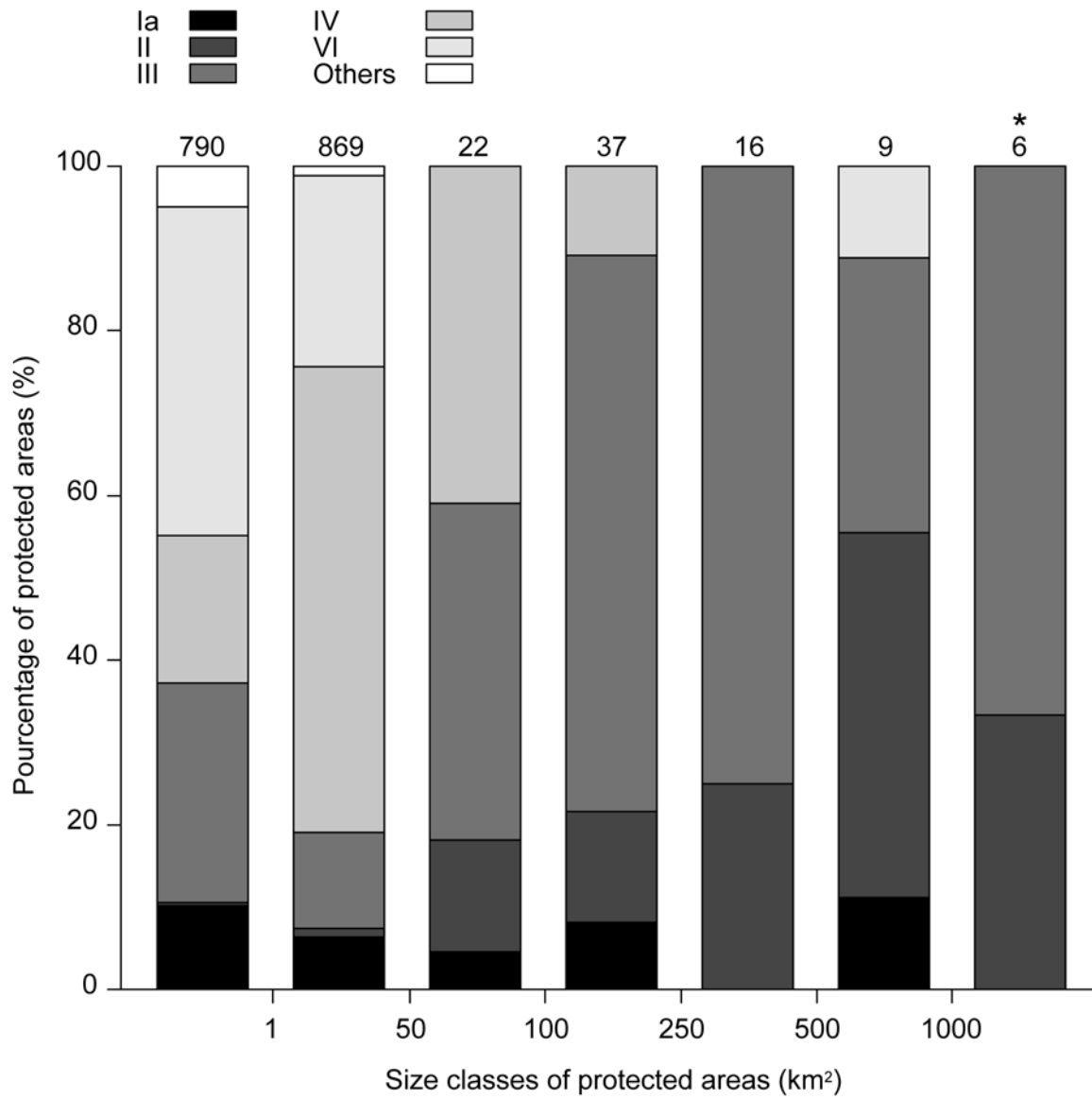
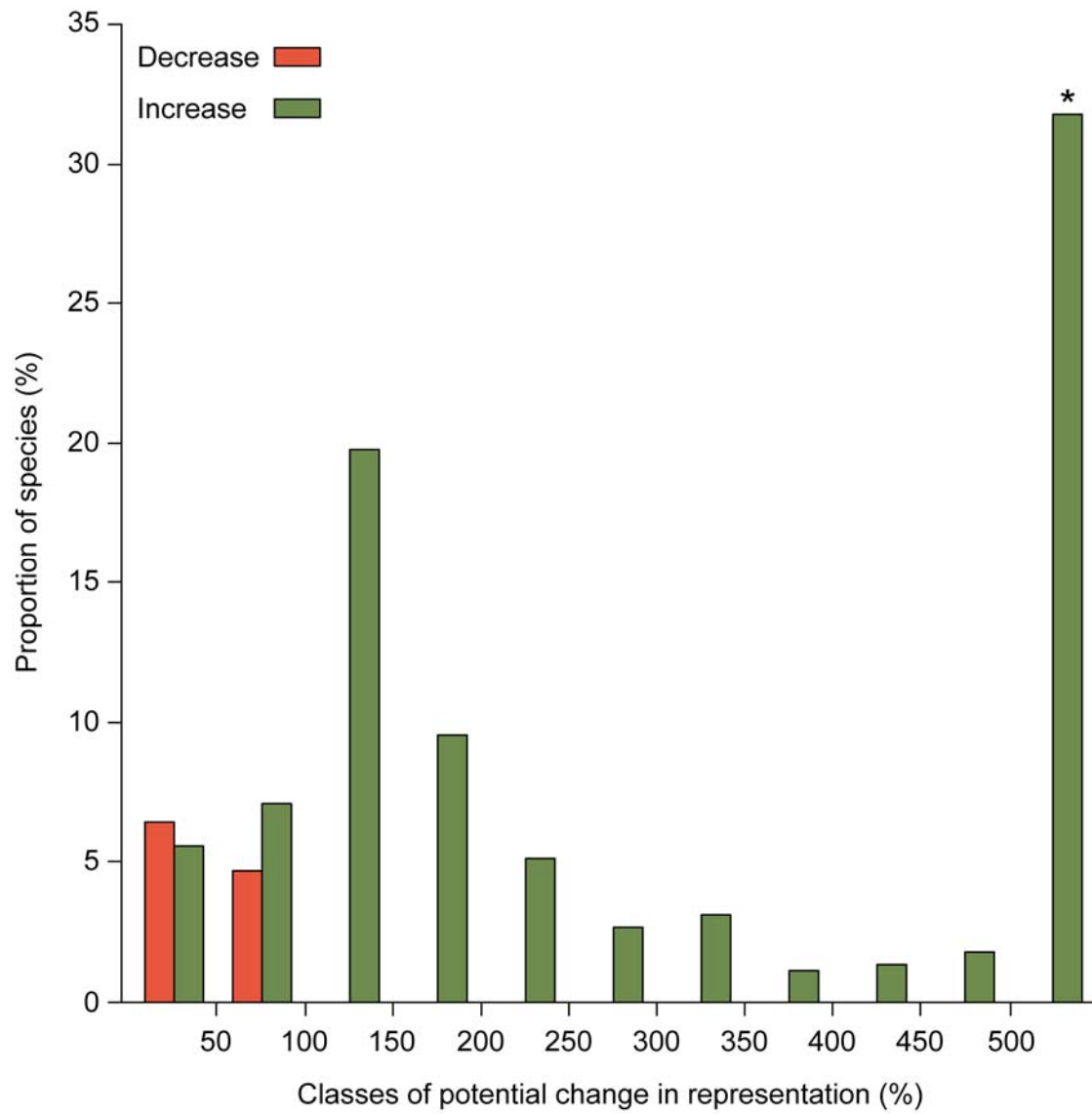


Figure 2



**Figure 3**



## CHAPITRE 2

### CONCLUSION

Notre étude visait à évaluer la vulnérabilité de la biodiversité des aires protégées du Québec méridional aux changements climatiques, et à en estimer les impacts futurs potentiels. Nous nous attendions à ce que les conditions climatiques des aires protégées deviennent favorables à un nombre important d'espèces. À cet effet, nos résultats indiquent que les changements climatiques appréhendés au cours du 21<sup>e</sup> siècle pourraient entraîner une importante réorganisation spatiale de la biodiversité au sein des aires protégées du Québec. Les conditions climatiques des aires protégées deviendront favorables à l'arrivée de nombreuses nouvelles espèces, alors que plusieurs populations actuellement établies pourraient ne plus trouver localement les conditions climatiques nécessaires à leur maintien. Si les populations animales et végétales sont en mesure de suivre le déplacement rapide de leur niche climatique, la composition des communautés biotiques présentes dans les aires protégées du Québec pourrait subir des changements radicaux.

L'ampleur des changements anticipés, qui révèle le dynamisme accru de la biodiversité sous la pression des changements climatiques, nous amène à analyser de façon critique certaines notions qui sont au cœur de la gestion actuelle du réseau d'aires protégées au Québec. En effet, nos résultats suggèrent que la notion d'intégrité écologique, telle que définie par Parcs Québec et par la Loi sur les parcs nationaux du Canada, apparaît aujourd'hui désuète puisque l'état des milieux naturels est inévitablement appelé à changer face aux relâchements rapides des contraintes climatiques (Berteaux *et al.*, 2014). D'autres notions, comme celle de la représentativité régionale, risquent de conserver davantage de cohérence dans le contexte des changements climatiques (Berteaux *et al.*, 2014). En effet,

la délimitation des régions naturelles repose en grande partie sur des éléments permanents du territoire comme la géologie, le relief et les sols (Li et Ducruc, 1999).

La pression exercée par les changements climatiques sur les espèces nous amène aussi à revoir l'efficacité des outils et modes de planification et de gestion du réseau d'aires protégées à atteindre les objectifs de conservation. Par exemple, la migration assistée pourrait constituer une stratégie d'adaptation appropriée pour pallier à l'incapacité de certaines espèces ou populations à migrer vers une aire protégée à travers un paysage fortement affecté par la perte et la fragmentation des habitats (Berteaux *et al.*, 2014). À l'opposé, la lutte à la colonisation de certaines aires protégées par des espèces venues du sud nécessitera de profondes réflexions puisque que l'intensité des efforts à investir peut être considérable à long terme. Dans tous les cas, des analyses coûts-bénéfices pourront aider les gestionnaires à sélectionner les stratégies les plus appropriées (Berteaux *et al.*, 2014).

Notre étude met en lumière de nombreuses sources d'incertitude qui interfèrent avec notre capacité à prévoir les effets potentiels des changements climatiques sur la biodiversité. L'intégration des interactions biotiques et de scénarios de dispersion plus réalistes dans les modèles de niche bioclimatique semble être un élément incontournable pour améliorer la capacité prédictive de nos modèles. En ce sens, l'intégration de la capacité de dispersion des espèces et des limites qu'imposent la perte et la fragmentation des habitats à la migration des populations nous semble être un objectif réalisable à moyen terme. Cette avenue de recherche est par ailleurs d'une importance considérable si l'on considère que la perte et la fragmentation des habitats constituent en eux-mêmes des menaces majeures pour la conservation de la biodiversité (Fahrig, 1997; Tilman *et al.*, 1994). En outre, la restauration des habitats et de la connectivité du paysage peuvent être des outils précieux pour atténuer la vulnérabilité des espèces aux changements climatiques. Finalement, nous recommandons de poursuivre l'évaluation des impacts potentiels des changements climatiques au moyen d'outils d'analyse diversifiés afin d'augmenter notre confiance dans les résultats obtenus et d'offrir davantage de réponses aux préoccupations des gestionnaires

du réseau. À cet effet, l'utilisation de l'indice de vulnérabilité développé par NatureServe pour évaluer la vulnérabilité d'espèces d'intérêt semble prometteuse (Young *et al.*, 2011).

Nos résultats ont permis de dresser un premier portrait de la vulnérabilité de la biodiversité des aires protégées québécoises face aux changements climatiques. L'ampleur des impacts anticipés doit maintenant agir comme catalyseur pour poursuivre la démarche d'adaptation de la gestion et de la planification du réseau entreprise par le MDDEFP, et pour mettre en œuvre dans les plus brefs délais des mesures efficaces d'atténuation des changements climatiques afin de favoriser la résilience des espèces et des écosystèmes.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Araújo, M.B., Alagador, D., Cabeza, M., Nogués-Bravo, D., Thuiller, W., 2011. Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters* 14, 484–492.
- Bakkenes, M., Alkemade, J.R.M., Ihle, F., Leemans, R., Latour, J.B., 2002. Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global Change Biology* 8, 390–407.
- Bélanger, L., Brassard, F., 2012. Programmation scientifique PACC-26: Proposition de projet - Étape 2. Québec, Canada.
- Berteaux D., Casajus N., de Blois, S., 2014. Changements climatiques et biodiversité du Québec : vers un nouveau patrimoine naturel. Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada.
- Berteaux, D., de Blois, S., Angers, J.-F., Bonin, J., Casajus, N., Darveau, M., Fournier, F., Humphries, M.M., McGill, B., Larivée, J., Logan, T., Nantel, P., Périé, C., Poisson, F., Rodrigue, D., Rouleau, S., Siron, R., Thuiller, W., Vescovi, L., 2010. The CC-Bio project: studying the effects of climate change on Quebec biodiversity. *Diversity* 2, 1181–1204.
- Chen, I.-C., Hill, J.K., Ohlemuller, R., Roy, D.B., Thomas, C.D., 2011. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science* 333, 1024–1026.
- Coetzee, B.W.T., Robertson, M.P., Erasmus, B.F.N., Van Rensburg, B.J., Thuiller, W., 2009. Ensemble models predict Important Bird Areas in southern Africa will become less effective for conserving endemic birds under climate change. *Global Ecology and Biogeography* 18, 701–710.
- Dudley, N., Stolton, A., Belokurov, L., Krueger, N., Lopoukhine, K., MacKinnon, T., Sandwith and N. Sekhran (éditeurs.), 2010. Natural solutions: protected areas helping people cope with climate change. IUCN-WCPA, TNC, UNDP, WCS, The World Bank et WWF, Gland, Suisse, Washington DC et New York, États-Unis.
- Duffy, J.E., 2003. Biodiversity loss, trophic skew and ecosystem functioning. *Ecology Letters* 6, 680–687.

- Fahrig, L., 1997. Relative effects of habitat loss and fragmentation on population extinction. *The Journal of Wildlife Management* 61, 603–610.
- GIEC, 2002. Les changements climatiques et la biodiversité. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- GIEC, 2007. Résumé technique dans : Bilan 2007 des changements climatiques: Impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- GIEC, 2013. Summary for policymakers dans : Climate change 2013: The physical science basis. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- Glick, P., Stein, B.A., Edelson, N.A. (éditeurs), 2011. Scanning the conservation horizon: A guide to climate change vulnerability assessment. National Wildlife Federation, Washington DC, États-Unis.
- Graham, R.W., Grimm, E.C., 1990. Effects of global climate change on the patterns of terrestrial biological communities. *Trends in Ecology & Evolution* 5, 289–292.
- 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, 155–171.
- Gray, D. R., 2007. The relationship between climate and outbreak characteristics of the spruce budworm in eastern Canada. *Climatic Change* 87, 361–383.
- Guisan, A., Zimmermann, N.E., 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling* 135, 147–186.
- Hampe, A., 2004. Bioclimate envelope models: what they detect and what they hide. *Global Ecology and Biogeography* 13, 469–471.
- Hannah, L., Midgley, G., Anelman, S., Araújo, M., Hughes, G., Martinez-Meyer, E., Pearson, R., Williams, P., 2007. Protected area needs in a changing climate. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, 131–138.

- Hole, D.G., Willis, S.G., Pain, D.J., Fishpool, L.D., Butchart, S.H.M., Collingham, Y.C., Rahbek, C., Huntley, B., 2009. Projected impacts of climate change on a continent-wide protected area network. *Ecology Letters* 12, 420–431.
- Hughes, L., 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution* 15, 56–61.
- Lawler, J.J., Shafer, S.L., White, D., Kareiva, P., Maurer, E.P., Blaustein, A.R., Bartlein, P.J., 2009. Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere. *Ecology* 90, 588–597.
- Lemieux, C.J., Scott, D.J., 2005. Climate change, biodiversity conservation and protected area planning in Canada. *Le Géographe canadien* 49, 384–397.
- Li, T., Dubruc, J.P., 1999. Les provinces naturelles. Niveau I du cadre écologique de référence du Québec. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Environnement, Québec, Canada.
- MDDEP, 2009. Portrait du réseau d'aires protégées au Québec - Période 2002-2009. Gouvernement du Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, Canada.
- Melillo, J.M., McGuire, A.D., Kicklighter, D.W., Moore III, B., Vorosmarty, C.J., Schloss, A.L., 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature* 363, 234–240.
- Metzger, M.J., Leemans, R., Schröter, D., 2005. A multidisciplinary multi-scale framework for assessing vulnerabilities to global change. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 7, 253–267.
- Neilson P., R., 1995. A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance. *Ecological Applications* 5, 362–385.
- Parcs Canada, 1997. National parks system plan. Ottawa, Canada.
- Parmesan, C., 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37, 637–669.
- Parmesan, C., Yohe, G., 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421, 37–42.

- Pearson, R.G., Dawson, T.P., 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global ecology and biogeography* 12, 361–371.
- Peters, R.L., 1985. The greenhouse effect and nature reserves. *Bioscience* 35, 707–717.
- Peterson, A.T., Ortega-Huerta, M.A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Buddemeier, R.H., Stockwell, D.R.B., 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416, 626–629.
- Pounds, A.J., Bustamante, M.R., Coloma, L.A., Consuegra, J.A., Fogden, M.P.L., Foster, P.N., La Marca, E., Masters, K.L., Merino-Viteri, A., Puschendorf, R., Ron, S.R., Sánchez-Azofeifa, G.A., Still, C.J., Young, B.E., 2006. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature* 439, 161–167.
- Purnomo, H., Herawati, H., Santoso, H., 2011. Indicators for assessing Indonesia's Javan rhino National Park vulnerability to climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 16, 733–747.
- Régnière, J., Cooke, B.J., Logan, J.A., Carroll, A.L., Safranyik, L., 2005. Les changements climatiques et les ravageurs indigènes et exotiques: une nouvelle réalité? Colloque Changements climatiques et foresterie : impacts et adaptation, tenu les 20 et 21 avril 2005 à Baie-Comeau, Québec, Canada
- Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider, S.H., Rosenzweig, C., Pounds, J.A., 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421, 57–60.
- Schmitz, O.J., Post, E., Burns, C.E., Johnston, K.M., 2003. Ecosystem responses to global climate change: moving beyond color mapping. *BioScience* 53, 1199–1205.
- Scott, D., Lemieux, C., 2005. Climate change and protected area policy and planning in Canada. *The Forestry Chronicle* 81, 696–703.
- Scott, D., Malcolm, J.R., Lemieux, C., 2002. Climate change and modelled biome representation in Canada's national park system: implications for system planning and park mandates. *Global Ecology and Biogeography* 11, 475–484.
- Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, 2004. Programme de travail sur les aires protégées. Montréal, Canada.
- Thuiller, W., Broennimann, O., Hughes, G., Alkemade, J.R.M., Midgley, G.F., Corsi, F., 2006. Vulnerability of African mammals to anthropogenic climate change under



- conservative land transformation assumptions. *Global Change Biology* 12, 424–440.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M.B., Sykes, M.T., Prentice, I.C., 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102, 8245–8250.
- Tilman, D., May, R.M., Lehman, C.L., Nowak, M.A., 1994. Habitat destruction and the extinction debt. *Nature* 371, 65–66.
- Peterson, A.T., Scachetti-Pereira, R., 2004. Potential geographic distribution of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) in North America. *The American Midland Naturalist* 151, 170–178.
- Turner, B.L., Kasperson, R.E., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A., Martello, M.L., Polsky, C., Pulsipher, A., Schiller, A., 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100, 8074–8079.
- Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.M., Hoegh-Guldberg, O., Bairlein, F., 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416, 389–395.
- Warren, R., VanDerWal, J., Price, J., Welbergen, J.A., Atkinson, I., Ramirez-Villegas, J., Osborn, T.J., Jarvis, A., Shoo, L.P., Williams, S.E., Lowe, J., 2013. Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss. *Nature Climate Change* 3, 678–682.
- Williams, J.W., Jackson, S.T., 2007. Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, 475–482.
- Williams, S.E., Shoo, L.P., Isaac, J.L., Hoffmann, A.A., Langham, G., 2008. Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change. *PLoS Biology* 6(12), e325.
- Wing, S.L., Harrington, G.J., Smith, F.A., Bloch, J.I., Boyer, D.M., Freeman, K.H., 2005. Transient floral change and rapid global warming at the Paleocene-Eocene boundary. *Science* 310, 993–996.
- Young, B., Byers, E., Gravuer, K., Hall, K., Geoff, H., Redder, A., 2011. Guidelines for using the NatureServe Climate Change Vulnerability Index. NatureServe.



