



**Développement d'un cadre méthodologique et
d'échantillonnage pour le suivi de la biodiversité en
fonction des changements climatiques**

Ouranos - Projet 554010-107

Rapport final

Équipe

Chercheur principal

Pedro Peres-Neto^{1,2}

Autres chercheurs*

Frédéric Boivin¹

Who-Seung Lee¹

Shubha Pandit¹

Jason Samson¹

Anouk Simard³

*Les noms sont en ordre alphabétique.

Affiliations

¹Université du Québec à Montréal

²Chaire de recherche du Canada en modélisation spatiale et biodiversité.

³Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs

Collaborateurs

Dominique Berteaux (UQÀR), Réhaume Comtois (MRNF), Pierre Drapeau (UQÀM), Daniel Fortin (Laval), Andrew Gonzalez (McGill), Marie-Hélène Greffard (UQÀM), Frédéric Guichard (McGill), Jacques Jutras (MDDEFP), Guillaume Larocque (CSBQ), Jessica Levine (CSBQ), Benoit Limoges (MDDEP), Éric Lucas (UQÀM), Chloe Makepeace (CSBQ), Marc Mengel (University of California), Christian Messier (UQÀM), Denis Réale (UQÀM), Jonathan Verrault (UQÀM).

Résumé

La biodiversité est en changement à l'échelle globale et ces changements sont principalement provoqués par les activités anthropiques (p. ex., changement d'utilisation des terres, exploitation, introduction d'espèces invasives, pollution, changements climatiques [CC]). De ces causes, les CC deviendront vraisemblablement la force de changement la plus importante au cours du prochain siècle. Dors et déjà, de nombreuses observations à la surface de la planète montrent que les organismes réagissent de multiples façons aux CC. Dans ce contexte, il est impératif d'effectuer un suivi de ces transformations sur notre territoire afin de pouvoir mitiger les effets des CC sur la biodiversité et s'adapter aux changements qui surviendront au niveau des services écosystémiques.

Or, développer un suivi de la biodiversité (quoi et où suivre) en fonction des CC n'est pas aisé, mais présente une formidable opportunité scientifique. Dans un premier temps, on doit réaliser qu'il est impossible de suivre tous les organismes dans tous les écosystèmes ; des choix doivent être faits. Bien que ces choix doivent s'appuyer sur des informations scientifiques, une partie de ces choix reflètera inévitablement des intérêts du groupe de recherche ou de l'organisme mettant en place le programme de suivi. Afin de créer un programme représentant les désirs du plus grand nombre d'acteurs en lien avec la biodiversité, nous avons procédé à un large sondage où 621 personnes nous ont transmis leurs priorités pour un programme de suivi de la biodiversité en fonction des CC. Les résultats de cette consultation montrent que les participants désirent une couverture complète de la province avec un accent sur les écosystèmes naturels (lacs et rivières, milieux humides et forêts). Ils désirent également qu'une attention particulière soit portée aux espèces menacées, envahissantes et celles rendant d'importants services écologiques. Cependant, contrairement à ce qui était attendu, il n'existait pas de différence d'opinions entre la plupart des groupes d'intérêts (p. ex., entre aménagistes et chercheurs). De plus, pour plusieurs questions, aucune tendance claire ne se dégageait (p. ex., s'il est préférable de suivre les organismes ou plutôt les services/processus écologiques).

Déterminer les indicateurs (types d'organismes et de mesures) à suivre est particulièrement problématique. En effet, il est attendu que tous les types d'organismes seront affectés par les CC, alors comment prioriser les cibles? Par exemple, il serait moins onéreux de suivre des organismes pour lesquels une expertise importante est déjà existante et pour lesquels des données historiques existent (p. ex., les oiseaux et la végétation terrestre). Cependant, un nouveau suivi de la biodiversité est une occasion unique d'étendre le suivi à des organismes moins connus, mais importants pour le fonctionnement des écosystèmes (p. ex., micro-organismes terrestres et aquatiques). Pour ce faire, nous avons effectué des rencontres avec différents partenaires afin d'identifier des indicateurs potentiels et les difficultés liées à ceux-ci. Nous avons également effectué une revue de la littérature afin d'identifier les caractéristiques de bons indicateurs et les effets des CC sur les écosystèmes. Finalement, nous avons assemblé une base de données sur les programmes de suivi déjà existant au Québec. À l'aide de ces différents outils, nous avons identifié une série d'indicateurs utiles pour le suivi.

En plus de déterminer les indicateurs à suivre, il est primordial d'identifier où suivre de façon à être capable d'isoler l'effet des CC des autres perturbations et variations naturelles. La façon classique de déterminer l'effet d'une perturbation est d'implanter des sites d'échantillonnages dans des zones contrôles (sans perturbation) et dans des zones affectées. Or, les CC présentent un défi particulier en ce sens qu'ils affecteront tout le territoire. Ainsi, la seule option restante est d'identifier des zones affectées plus faiblement par les CC (à défaut d'avoir des zones de contrôle

strict) afin de les comparer à d'autres où les CC seront plus importants. Pour ce faire, il faut définir ce que sont les zones de petits et de grands changements pour un organisme, ce qui est habituellement fait en ne tenant compte que de la moyenne des variables climatiques (p. ex., température et précipitation). Cependant, il est probable que cette vision simpliste du climat limite notre capacité à détecter l'amplitude réelle des CC. Par exemple, les organismes ne sont probablement pas seulement affectés par les variables climatiques prises indépendamment, mais également par les corrélations qui les unissent. Par exemple, si les étés chauds sont humides et les étés frais sont secs et que soudainement cette relation est inversée, ce changement de corrélation pourrait affecter les organismes autant que des changements de moyennes. Nous avons testé et validé cette hypothèse à l'aide d'un modèle basé sur l'individu.

L'utilisation de la moyenne des variables climatiques simplifie également une dynamique temporelle beaucoup plus complexe. En effet, les variables climatiques peuvent être décomposées en tendance linéaire, cyclique, saisonnière et résiduelle et nous croyons qu'utiliser ces différentes composantes au lieu de seulement la moyenne peut grandement améliorer la puissance des analyses statistiques et mieux expliquer les patrons de variations dans la biodiversité. Nous avons testé et montré que décomposer les variables climatiques dans ces composantes temporelles est effectivement plus efficace pour expliquer la diversité des mammifères qu'utiliser la moyenne.

Nous avons ensuite créé des cartes de CC pour le Québec intégrant les valeurs moyennes, la composition temporelle des variables climatiques ainsi que les corrélations entre les variables climatiques afin de déterminer les endroits où les CC seront les plus importants et les plus faibles au Québec. Il sera ensuite possible de comparer les sites provenant de zones avec de faibles et d'importants changements afin d'isoler l'effet des CC locaux sur les changements de biodiversité. Afin d'éliminer les facteurs confondants (p. ex., variations dans la présence de lacs sur le territoire ou de l'âge des peuplements forestiers) et de tenir compte d'autres éléments d'intérêts (p. ex., présence d'aires protégées) dans la localisation des sites, nous avons colligé des données cartographiques sur de nombreux autres aspects. Ces données cartographiques ont été arrimées aux données climatiques afin de pouvoir être analysées de concert. Pour compléter cette initiative, une méthodologie a été développée afin de localiser les cellules climatiques (15 km × 15 km) où seront situés les sites d'échantillonnage en fonction des autres données cartographiques. Cette méthodologie hautement flexible permet d'optimiser la similarité entre les sites tout en maximisant la couverture du territoire québécois.

Finalement, nous avons conçu un cadre d'analyse des données qui proviendront du système de suivi. Ce cadre présente la façon d'organiser les données, de les analyser et de les interpréter ainsi que des façons de visualiser les résultats. Ce cadre met en relation de façon cohérente plusieurs avancées faites indépendamment dans les analyses spatio-temporelles de la biodiversité. Il a également été créé de façon à être aisément compréhensible afin de faciliter la communication des résultats, et ce, tout en faisant usage au maximum de l'information contenue dans les données.

Mot de l'équipe de recherche et remerciements

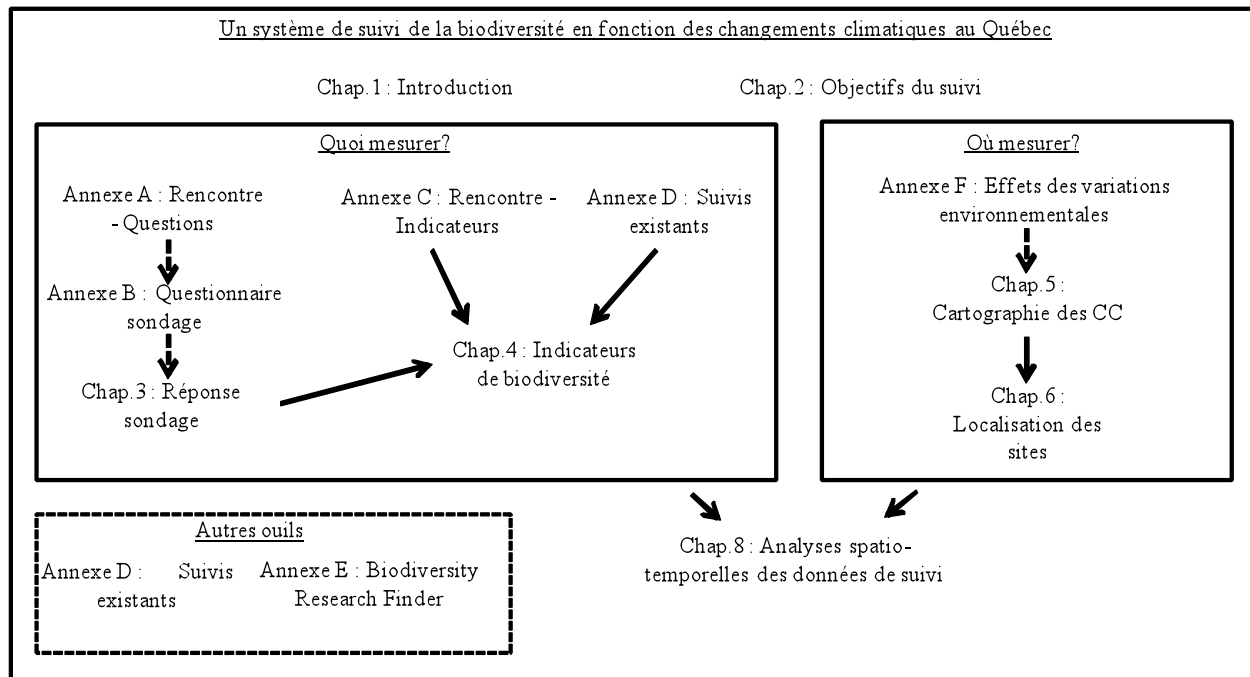
Ce rapport présente les réalisations de notre équipe de recherche au cours des 2 ans et demi (octobre 2010 – mars 2013) qu'a duré le projet CC-Suivi. Le projet CC-Suivi a représenté un investissement de temps et d'énergie considérable de la part des différents chercheurs et collaborateurs impliqués. Nous sommes fiers du chemin parcouru, des collaborations avec nos partenaires, des consultations que nous avons menées et nous espérons sincèrement que ce rapport servira d'outils au développement et à la mise en place d'un programme de suivi de la biodiversité en fonction des changements climatiques au Québec.

Nous tenons à remercier Ouranos et le Fonds vert du gouvernement du Québec pour leur soutien financier. Nous remercions également les nombreux professionnels qui ont investi de leur temps dans nos rencontres et pour remplir notre sondage. Finalement, nous remercions les membres du Ministère des Ressources naturelles et du Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs pour leur précieuse collaboration.

L'organisation du rapport

Ce rapport est organisé en plusieurs chapitres et annexes dont les deux premiers chapitres sont d'ordres généraux. Le premier chapitre expose les éléments philosophiques de base à considérer dans le cadre de la mise en place d'un programme de suivi de la biodiversité. Il y expose également de façon sommaire l'état des connaissances sur la biodiversité et les effets attendus des changements climatiques sur la biodiversité. Il inclut finalement des recommandations pour la mise en place du suivi ainsi qu'une description des décisions qui demeurent à être prises avant la mise en place du suivi. Le chapitre 2 présente les objectifs et les avantages directs et indirects d'établir un programme de suivi de la biodiversité en fonction des changements climatiques au Québec.

Organigramme des différentes sections du rapport et de leurs liens.



Les annexes A à E et les chapitres 3 et 4 sont en lien avec le choix des éléments à suivre. L'annexe A provient de la première grande consultation réalisée au début du projet où l'on avait demandé à différents spécialistes gouvernementaux et universitaires de nous faire part de leurs priorités dans le cadre d'un système de suivi. Ceux-ci nous avaient fourni environ 150 questions auxquelles ils aimeraient que le programme réponde. Nous avons ensuite organisé une rencontre de deux jours où 30 experts ont discuté des questions et de leur importance. Cette rencontre a donné naissance à la conception d'un sondage basé sur les questions provenant de la première rencontre. Ce sondage avait comme objectif de déterminer les priorités de suivi pour différents acteurs de la biodiversité au Québec. L'annexe B présente le questionnaire de ce sondage alors que le chapitre 3 présente les réponses des participants. Nous avons profité de ces consultations impliquant des professionnels du milieu de la biodiversité au Québec pour colliger de l'information sur les bases de données, les atlas et les suivis de la biodiversité existants au Québec. Cette information est rendue dans l'annexe D. Les annexes D et E présentent également d'autres outils colligeant de l'information sur la biodiversité du Québec et pouvant être utile lors

de l'établissement du suivi et pour la recherche sur la biodiversité en général. Le chapitre 4 présente une revue de littérature sur les critères de bons indicateurs de biodiversité et une revue sur les effets des changements climatiques sur les écosystèmes et les espèces. En ce basant sur ces revues et en tenant compte de l'information recueillie dans les chapitres et annexes précédents, des recommandations d'indicateurs de biodiversité à utiliser dans le cadre du suivi au Québec sont faites.

L'annexe F et les chapitres 5 et 6 présentent les étapes pour la sélection des cellules de 15 × 15 km où situer les sites d'échantillonnage. L'annexe F présente une étude par simulation qui démontre qu'il ne faut pas seulement utiliser les changements des variables environnementales prises individuellement pour prédire les effets des changements climatiques sur les organismes, mais qu'il faut également tenir compte des changements de corrélations entre ces variables. Le chapitre 5 part de ce principe pour créer une cartographie des changements climatiques pour le Québec basée sur une méthode novatrice. Le chapitre 6 expose une méthodologie qui met à profit la cartographie du chapitre 5 en plus de nombreuses autres informations recueillies sur d'autres éléments de paysage du Québec afin de déterminer les cellules de 15 × 15 km où implanter des sites de suivi. Le chapitre 6 présente également différents scénarios de répartition des sites dans le paysage québécois. Finalement, le chapitre 7 présente une méthode pour analyser les données provenant d'un tel programme de suivi à long terme.

Table des matières

1	Introduction – Les changements climatiques et la biodiversité	1-1
1.1	<i>La biodiversité et les changements climatiques</i>	1-1
1.2	<i>Pourquoi suivre la biodiversité en fonction des changements climatiques?</i>	1-2
1.3	<i>Des défis pour la conception et l'établissement du programme</i>	1-4
1.4	<i>Recommandations pour la mise en place du suivi</i>	1-6
1.5	<i>Des étapes supplémentaires</i>	1-7
1.6	<i>Après CC-Suivi, la collaboration et le support se poursuit</i>	1-8
1.7	<i>Références</i>	1-8
2	Objectifs et avantages d'un programme de suivi de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques	2-12
2.1	<i>Introduction</i>	2-12
2.2	<i>Listes des objectifs et avantages d'un programme de suivi de la biodiversité</i>	2-13
3	Sondage sur les priorités de suivi de la biodiversité	3-17
3.1	<i>Résumé</i>	3-17
3.2	<i>Introduction</i>	3-18
3.3	<i>Méthodologie</i>	3-19
3.3.1	Processus de création du sondage	3-19
3.3.2	Constitution du sondage	3-19
3.3.3	Administration du sondage	3-20
3.3.4	Analyses statistiques	3-21
3.4	<i>Résultats et discussions</i>	3-21
3.4.1	Participation	3-21
3.4.2	Les sites	3-21
3.4.3	Les indicateurs	3-22
3.4.4	Les compromis	3-26
3.4.5	L'éthique et la participation citoyenne	3-27
3.5	<i>Conclusions</i>	3-28
3.6	<i>Références</i>	3-29
4	Des indicateurs de biodiversité pour le Québec	4-32
4.1	<i>Introduction</i>	4-32
4.2	<i>Facteurs déterminant pour le choix d'un indicateur</i>	4-34
4.2.1	L'indicateur doit répondre à un objectif donné	4-34
4.2.2	L'indicateur doit apporter une puissance statistique suffisante	4-36
4.2.3	L'indicateur doit être associé à des facteurs de stress spécifiques	4-38
4.2.4	L'indicateur doit pouvoir servir aux processus de prise de décision	4-39
4.2.5	Le choix des indicateurs doit tenir compte du rapport coûts-bénéfices	4-40
4.2.6	Le choix d'un indicateur doit tenir compte de plusieurs aspects, balançant avantages et désavantages	4-41

4.3	<i>Quatre étapes pour sélectionner des indicateurs</i>	4-42
4.4	<i>Les différentes catégories d'indicateurs</i>	4-44
4.4.1	Les indicateurs associés aux individus	4-46
4.4.2	Les indicateurs associés aux populations	4-48
4.4.3	Les indicateurs associés aux espèces	4-50
4.4.4	Les indicateurs associés aux communautés	4-51
4.4.5	Les outils de détection	4-53
4.4.6	Choisir les taxons à suivre	4-58
4.5	<i>Les effets des CC sur les organismes et écosystèmes</i>	4-60
4.5.1	Les principaux écosystèmes du Québec	4-61
4.5.2	Milieus arctiques	4-62
4.5.3	Milieus aquatiques d'eau douce	4-64
4.5.4	Milieus humides	4-67
4.5.5	Milieus forestiers	4-70
4.5.6	Facteurs de risques des espèces	4-74
4.6	<i>Sondage sur les priorités de suivi</i>	4-75
4.7	<i>Consultations pour déterminer des indicateurs pour le Québec</i>	4-75
4.8	<i>Les suivis de biodiversité existants au Québec</i>	4-75
4.9	<i>Suivi avec sites extensifs et sites intensifs</i>	4-77
4.10	<i>Des indicateurs pour un suivi de la biodiversité lié aux CC</i>	4-77
4.10.1	La multitude d'indicateurs, les défis liés à leur choix	4-77
4.10.2	Quel écosystème prioriser	4-79
4.10.3	Une analyse des paysages (P)	4-80
4.10.4	Des indicateurs pour les milieux arctiques (N; milieux nordiques)	4-82
4.10.5	Des indicateurs pour les milieux aquatiques d'eau douce (A)	4-87
4.10.6	Des scénarios d'échantillonnage pour les milieux aquatiques d'eau douce	4-94
4.10.7	Des indicateurs les milieux humides (H)	4-100
4.10.8	Des scénarios d'échantillonnage pour les milieux humides	4-109
4.10.9	Des indicateurs pour les milieux forestiers (F)	4-115
4.10.10	Des scénarios d'échantillonnage pour les milieux forestiers	4-129
4.11	<i>Références</i>	4-136
5	Analyse du climat futur	5-154
5.1	<i>Données climatiques</i>	5-154
5.2	<i>Données observées pour le passé récent</i>	5-154
5.3	<i>Données climatiques simulées pour le futur</i>	5-155
5.3.1	Modèle Global du Climat (MGC)	5-155
5.3.2	Modèle Régional du Climat	5-157
5.3.3	Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC)	5-157
5.3.4	Changements climatiques (CC)	5-158
5.3.5	Agrégation des données sur grille	5-158
5.4	<i>Variables climatiques</i>	5-161

5.4.1	Variables climatiques moyennes	5-165
5.4.2	Variables de la dynamique temporelle du climat	5-165
5.4.3	Corrélations entre les variables climatiques	5-166
5.5	<i>Indice de similarité climatique entre le passé récent et le futur</i>	5-208
5.5.1	Analyse de composantes principales	5-208
5.5.2	Calcul de l'indice de similarité climatique	5-208
5.5.3	Choix du nombre de composantes pour déterminer l'indice de similarité climatique	5-208
5.6	<i>Références</i>	5-212
5.7	<i>Annexe 5.1</i>	5-214
6	Méthodologie de localisation des sites et scénarios d'échantillonnage	6-217
6.1	<i>Sélection des sites de suivi</i>	6-217
6.2	<i>Indices biophysiques</i>	6-217
6.2.1	Géologie et dépôts de surface	6-217
6.2.2	Élévation	6-217
6.2.3	Milieux aquatiques lacustres	6-218
6.2.4	Écosystèmes forestiers	6-218
6.3	<i>Indices de perturbations</i>	6-229
6.3.1	Âge moyen de la forêt	6-229
6.3.2	Les zones agricoles	6-229
6.4	<i>Indices de facilité à l'échantillonnage</i>	6-232
6.4.1	Les aires protégées	6-232
6.4.2	Les placettes-échantillons permanentes	6-232
6.4.3	Proximité des bureaux du MRNF	6-232
6.5	<i>Cadre décisionnel quantitatif pour la localisation de sites de suivi de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques (CC)</i>	6-236
6.5.1	Mise à jour des données de l'outil	6-236
6.5.2	Protocole quantitatif pour définir les scénarios de suivi	6-237
6.6	<i>Utilisation de l'outil</i>	6-238
6.7	<i>Scénarios de sélections de sites de suivi</i>	6-239
6.8	<i>Références</i>	6-246
7	Analyses spatio-temporelles des données de biodiversité	7-247
7.1	<i>Abstract</i>	7-247
Annexe A	Questions et méta-questions	A-1
Annexe B	Questionnaire du sondage	B-15
Annexe C	Rencontre d'experts sur les indicateurs de biodiversité	C-22
Annexe D	Programmes de suivi d'éléments de biodiversité existant au Québec	D-46
Annexe E	Biodiversity Research Finder	E-49
Annexe F	Trade-offs between resource allocation strategy and phenotypic cost varies with patterns of environmental fluctuation	F-52
Annexe G	Improving biodiversity model using time series decomposition of climatic variables	G-53

1 Introduction – Les changements climatiques et la biodiversité

Auteurs : Frédéric Boivin¹, Anouk Simard² et Pedro Peres-Neto¹

Affiliation : ¹Université du Québec à Montréal, Chaire du Canada en modélisation spatiale et biodiversité, ²Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs

1.1 La biodiversité et les changements climatiques

Le terme biodiversité provient de la contraction de l'expression anglaise « biological diversity » faite en 1985 par Walter G. Rosen (Maclaurin and Sterelny 2008). Depuis la parution de ce terme, celui-ci a été utilisé dans de nombreux contextes et a évolué pour finalement définir « la variabilité entre les organismes vivants provenant de toutes sources terrestres et aquatiques et la complexité écologique auquel ils prennent part; ceci inclut la diversité à l'intérieur des espèces, entre espèces et entre écosystèmes » (CBD 2010). Autrement dit, la biodiversité est la variabilité de la vie à toutes les échelles biologiques et la variabilité des interactions qui les unissent.

La biodiversité fournit d'innombrables services essentiels à l'existence humaine (p. ex., nourriture et matériaux; Cardinale et al. 2012). Alors que seulement une fraction des millions d'espèces existantes est directement exploitée par l'homme, il est de plus en plus reconnu qu'une grande diversité est favorable à la résilience des écosystèmes face aux perturbations (Thompson et al. 2009), à une meilleure productivité (Paquette and Messier 2011) et à une plus grande stabilité des processus et services écologiques en général (Cardinale et al. 2012, Loreau et al. 2013). Or, la biodiversité est en déclin au niveau mondial dû aux perturbations anthropiques dont les principales sont la destruction d'habitats, l'introduction d'espèces invasives, la surexploitation, la pollution et les changements climatiques (CC) (CBD 2010).

Pour ces raisons, la protection de la biodiversité est au cœur des préoccupations internationales, comme en fait foi la création récente de l'*Intergovernmental Platform on Biodiversity & Ecosystem Services* (IPBES¹) chargé de faire état sur la biodiversité de façon périodique et l'engagement de nombreux gouvernements envers les « objectifs d'Aichi pour la biodiversité² » visant à réduire les pressions sur la biodiversité d'ici 2020. Cependant, ces initiatives font face à de nombreux défis, dont la quantité limitée de données sur la biodiversité. En effet, l'évolution de la situation reste largement inconnue si ce n'est que pour les organismes les plus charismatiques et les organismes les plus important économiquement, et ce, principalement près des régions les plus peuplées et nantis (Dobson 2005, Normander et al. 2011). Ainsi, les oiseaux accaparent à eux seuls 37% des programmes de suivi de la biodiversité en Europe (Henry et al. 2008) et 75% des atlas du monde (Greenwood 2007) alors qu'à peu près rien n'est connu sur la distribution des micro-organismes des sols (Balmford et al. 2005). Dû à ces déséquilibres, il est estimé que pas moins de 86 % des ~ 8.7 millions d'espèces terrestres et 91 % des ~ 2.2 millions d'espèces marines sont inconnues de la science (Mora et al. 2011). De plus, la fonction de la plupart des quelques 1.2 millions d'espèces cataloguées demeure inconnue. Conséquemment, notre connaissance des processus écosystémiques et de la façon dont ceux-ci se transposent en

¹ <http://www.ipbes.net/>

² <http://www.cbd.int/sp/targets/>

services dont nous profitons demeure, dans les meilleurs des cas, succincte (CBD 2010, Cardinale et al. 2012). De même, s'il est globalement reconnu que la biodiversité décline dû aux activités anthropiques (CBD 2010, Rudd 2011), l'amplitude de ce déclin est incertaine et les effets à long terme demeurent nébuleux.

Des perturbations anthropiques affectant la biodiversité, les CC deviendront vraisemblablement la pression la plus importante au cours du prochain siècle. En effet, l'*Intergovernmental Panel on Climate Change*, en se basant sur les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES) moyens, projetait lors de son dernier rapport une hausse de température moyenne globale d'environ 2 °C d'ici 2100 (IPCC 2007b). Cette augmentation de 2 °C est déjà considérée par plusieurs scientifiques comme la limite maximale avant l'atteinte de conséquences dramatiques pour les écosystèmes (IPCC 2007a). Or, les estimations des dernières années indiquent que les émissions de GES augmentent au rythme des pires scénarios utilisés par l'IPCC et qu'on se dirige ainsi vers une augmentation de température de 3.5 à 5 °C d'ici 2100 (Peters et al. 2012); sans oublier que la température continuera à augmenter après cette date. Jusqu'à présent, l'augmentation de la température globale atteint 0.8 °C (IPCC 2007b) et déjà les organismes réagissent au niveau de leurs interactions (Harley 2011), de leur physiologie, de leur phénologie et de multiples autres façons (Parmesan and Yohe 2003, Parmesan 2006) laissant entrevoir de grands bouleversements pour le futur.

On peut donc affirmer que la biodiversité répondra aux CC et que ces changements entraîneront de nombreuses conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes. Cependant, il est hautement difficile de prédire les cascades d'évènements qui se produiront. Premièrement, en plus de la température, les CC affecteront la quantité et les patrons de précipitations, la durée et la fréquence des sécheresses ainsi que d'autres aspects climatiques pour lesquels les prédictions des modèles climatiques sont moins précises (IPCC 2007b). De plus, les prévisions des modèles climatiques deviennent moins précises dû à l'incorporation de plus en plus de variables et de leurs incertitudes (Maslin and Austin 2012). En plus des incertitudes au niveau des modèles climatiques, les modèles utilisés pour prédire l'effet des CC sur les organismes comportent également leurs lots d'ambiguïtés. Par exemple, les différents modèles utilisés pour projeter la distribution future des organismes donnent souvent des prévisions très variables entre eux (Elith et al. 2006, Pearson et al. 2006) et lorsqu'ils sont confrontés à la réalité, leurs prédictions peuvent être hautement erronées (Araujo and Rahbek 2006, Stankowski and Parker 2011). Finalement, ces incertitudes au niveau des espèces ne sont qu'une fraction de celles au niveau des services écologiques, pour lesquels les connaissances des mécanismes et fonctionnements sont encore plus rudimentaires (p. ex., Montoya and Raffaelli 2010, Prather et al. 2013).

1.2 Pourquoi suivre la biodiversité en fonction des changements climatiques?

Une des raisons expliquant la difficulté de prédire les effets des CC sur la biodiversité et les services qu'elle fournit est la quantité limitée de données disponibles. En effet, à l'heure actuelle, le seul indicateur disponible à la grandeur de la planète pour évaluer l'état de la biodiversité est une variable abiotique; la chimie des eaux douces (Butchart et al. 2010). Même son de cloche au Canada où un récent rapport sur l'état de la biodiversité publié par les *Federal, Provincial and Territorial Governments of Canada* (2010) faisait état du manque de données sur la biodiversité et les écosystèmes. Il y est même affirmé que « [l]es renseignements pertinents concernant les écosystèmes sont moins accessibles que ne le croient les décideurs » et qu'« [i]l arrive souvent

que les renseignements essentiels à l'évaluation de la santé des écosystèmes soient manquants ». Ainsi, les décisions politiques sont prises à partir de données limitées, ce qui peut réduire l'efficacité et biaiser les décisions. De plus, les décisions sont souvent prises en se basant sur la situation d'un faible pourcentage des espèces et en tenant peu compte de leurs fonctions dans l'écosystème (Baird and Hajibabae 2012). En somme, les programmes de suivi à l'heure actuelle ne couvrent pas assez d'organismes et d'espace, ne sont pas compatibles entre eux et ne permettent pas d'étudier suffisamment les phénomènes à différentes échelles (Pereira and Cooper 2006). Ce manque de connaissances est un problème criant à l'échelle internationale et de plus en plus de voix s'élèvent demandant l'augmentation du nombre de systèmes de suivi de la biodiversité (p. ex., Mace and Baillie 2007, Lindenmayer et al. 2012b). Les suivis de la biodiversité sont en effet essentiels afin d'évaluer les impacts des perturbations humaines, le départ de conditions désirées, d'évaluer les effets des efforts d'aménagements et de conservations ainsi que pour quantifier les changements de biodiversité et de services afin de pouvoir s'adapter ou mitiger les effets négatifs (Balmford et al. 2005, Legg and Nagy 2006, Lovett et al. 2007). Établir des suivis rapidement est d'autant plus important que la biodiversité est déjà affectée par les CC. Ainsi, pour les nombreux organismes et services pour lesquels nous n'avons encore aucune données, il est urgent d'agir afin d'établir des références historiques auxquelles comparer leurs états futures (Balmford et al. 2005). Étant donné que la biodiversité est immense et mal connue, il semble inapproprié de perdre des éléments sans savoir qu'ils étaient là et ce qu'il y faisait (Balmford et al. 2005). De plus, les suivis permettent d'obtenir des données nécessaires pour améliorer les exercices de modélisation afin de mieux prédire les effets qu'auront les CC sur la biodiversité et les services qu'on en tire (McMahon et al. 2011).

Tout suivi afin de connaître du succès se doit d'être chapeauté par des questions d'intérêts (Yoccoz et al. 2001, Lindenmayer and Likens 2009) et ces questions devraient, ultimement, pouvoir être liées à des processus de prises de décision (Balmford et al. 2005). Le suivi doit donc, au-delà du compte des espèces, permettre de s'adapter et d'agir face aux CC. Étant donné que les incertitudes faces aux effets des CC sur la biodiversité sont immenses tout en ayant un potentiel d'impact extrêmement important sur le bien-être de l'humanité, baser un programme de suivi autour de questions axées sur la détection et la compréhension des effets des CC sur la biodiversité est pertinent. De plus, contrairement à la plupart des perturbations anthropiques (p. ex., fragmentation et perte de territoire suite aux coupes forestières), les CC vont affectés tous les écosystèmes, aussi isolés qu'ils soient. Les effets des CC sont particulièrement intrigant au niveau des services écologiques. En effet, des espèces mieux adaptées aux nouvelles conditions pourraient remplacer celles actuellement sur le territoire et ainsi maintenir les services. Par exemple, un réseau de suivi en fonction des CC répondant à la question « est-ce que les espèces migrantes aident à maintenir les services écologiques? » pourrait aider à jauger les pour et les contres de procéder à de la migration assistée. En résumé, un suivi en fonction des CC pourrait permettre d'agir pour restaurer au lieu de seulement tenter de limiter les dégâts (Balmford et al. 2005). De plus, un tel suivi pourrait permettre d'anticiper et de profiter des opportunités liées aux nouvelles conditions environnementales. En ce qui a trait au suivi de la biodiversité en fonction des CC au Québec, de nombreuses autres raisons peuvent également être identifiées en support d'un tel projet (Chapitre 2).

1.3 Des défis pour la conception et l'établissement du programme

Les programmes de suivi de la biodiversité peuvent être très utiles, mais ils peuvent également s'enliser pour finalement ne servir à rien ou être abandonnés. La première cause d'échec identifiée par Lindenmayer et Likens (2009) est que les programmes de suivi sont souvent basés sur des opportunités de financement à court terme et des directives politiques plutôt que des questions et des objectifs; ils sont créés dans l'optique de récolter des données maintenant pour poser des questions plus tard. Il est assumé dans ces cas que simplement parce qu'un programme existe, celui-ci pourra répondre à la majorité des questions qui surgiront; l'expérience montre que cette supposition est fautive (Watson and Novelty 2004). Premièrement, en l'absence de questions à répondre, la solution de design peut simplement impliquer de tout mesurer, une option qui entraîne des coûts élevés pouvant mener à la mort du programme (Watson and Novelty 2004, Lindenmayer and Likens 2009). De plus, de telles initiatives de suivi se transforment souvent en activité de compilation de données qui apportent peu de compréhension des phénomènes naturels (Krebs 1991). Or, pour qu'un programme soit crédible et viable auprès des gestionnaires, celui-ci doit avoir un bon rapport coût-bénéfice (Caughlan and Oakley 2001), ce qui ne peut être atteint qu'avec un design adapté aux questions posées. Il est à noter que modifier un programme pour s'adapter à de nouvelles questions (ou simplement pour s'adapter à des questions) en court de route est difficile à réaliser et résulte dans un design sous optimal à l'efficacité réduite (Watson and Novelty 2004).

Idéalement, les questions auxquelles un programme de suivi doit répondre doivent être perçues comme importantes par un grand nombre de partenaires (Green et al. 2005, Lindenmayer et al. 2012a). Or, définir ces questions est une tâche complexe, car les opinions diffèrent d'un individu ou d'un groupe d'intérêt à l'autre (Yoccoz et al. 2001, Geupel et al. 2011). Pour illustrer ce propos, nous avons fait appel à des professionnels du domaine de l'environnement et de l'écologie afin d'identifier les questions auxquelles devraient répondre un programme de suivi de la biodiversité en fonction des CC au Québec. Nous avons reçu ~150 questions touchant des domaines aussi variables que l'effet des barrières anthropiques sur le déplacement des organismes à l'effet des CC sur la décomposition des sphaignes (Annexe A ; questions 111 et 53 respectivement). Bien que des questions semblables ont pu être combinées pour obtenir un total de 40 « méta-questions » d'ordre plus général, tenter de répondre à toutes ces questions reviendrait à suivre presque tous les aspects de la biodiversité, une tâche impossible. Dans une étape subséquente, plus de 600 participants ont transmis leurs opinions sur les éléments à prioriser, mais, encore, peu de choix clairs ont émergé (Chapitre 3 – Sondage). Conséquemment, il revient donc aux concepteurs et à ceux mettant en place le programme de trancher sur les questions à prioriser.

Afin de trancher, des lignes directrices peuvent être tracées. Premièrement, dans le cadre des CC, le besoin de connaissances pouvant mener à des actions concrètes sur la façon de protéger et améliorer le sort de la biodiversité est hautement requis (Balmford et al. 2005, Kerr 2011). Deuxièmement, il serait avantageux d'axer les méthodes et les types de données récoltées afin qu'ils concordent avec d'autres initiatives à l'échelle mondiale dans l'objectif que le suivi puisse s'inscrire dans un effort global de protection de la biodiversité. Pour ce faire, des « indicateurs essentiels de biodiversité » sont en développement à la Convention sur la Diversité Biologique (Pereira et al. 2013). Troisièmement, étant donné que les retombés des suivis ne viennent qu'à long terme, on doit se demander si les questions que l'on se pose seront encore pertinentes pour les décennies à venir (di Castri et al. 1992). Dans un même ordre d'idée, il faut se demander s'il

existe une autre façon moins onéreuse de répondre à ces questions (Watson and Novelty 2004). Finalement, bien que la biodiversité revête un intérêt en soit, le maintien du niveau de vie actuelle de l'humanité repose sur les services écologiques tirés de la biodiversité. Le suivi doit donc inclure, au moins en partie, le suivi de services considérés essentiels. De plus, comme une large partie de la biodiversité est inconnue et probablement importante pour le déroulement des services écologiques (Balmford et al. 2005), l'établissement d'un nouveau suivi est une occasion unique pour étudier des organismes moins connus. Cependant, étudier des organismes moins connus est souvent plus dispendieux (c.-à-d., formation ou embauche de main-d'œuvre et acquisition de nouveaux équipements), ce qui signifie dans un contexte où le budget est fixe, que l'on peut suivre moins d'éléments au total. Malgré ces lignes directrices, il demeure difficile de trancher sur les éléments à suivre, car il n'y a pas nécessairement d'arguments scientifiques ou logiques pour choisir de suivre un organisme plutôt qu'un autre. Les choix représenteront donc toujours en partie les intérêts de ceux concevant et mettant en place le suivi. Dans ce contexte, il faut s'assurer que le choix des questions adressées (et l'abandon de certaines) soient justifié et argumenté (Watson and Novelty 2004), mais il demeure que les choix effectués ne plairont pas à tous. De plus, il demeure possible que les questions posées ne puissent pas être répondues par le programme dû à des éléments inconnus lors de la conception; c'est un risque qui doit être accepté et compris sans pour autant détruire la motivation d'agir (Watson and Novelty 2004, Kerr 2011).

Un programme de suivi doit également s'appuyer sur un design statistique rigoureux (Lindenmayer and Likens 2009). Cependant, dans le cadre des CC et de la biodiversité, déterminer le nombre de sites et le nombre d'échantillons nécessaires afin d'obtenir une puissance statistique désirée représente un grand défi dû à l'incertitude entourant l'amplitude des CC et l'effet qu'ils auront sur les organismes et les services. Des recommandations en ce sens sont fournies au chapitre 4, mais ces aspects du programme ce devront d'être réévalués fréquemment après sa mise en place en fonction des résultats obtenus.

En ce qui a trait à la mise en place des programmes de suivi, les plus grands défis sont d'ordres financiers et humains. Premièrement, le suivi de la biodiversité est une entreprise au coût élevé dans lequel il ne faut pas investir à la légère. Dans un contexte où les organismes gouvernementaux travaillent de plus en plus sur un budget réduit, il faut s'assurer que le budget pour le suivi ne soit pas dévié de ceux, souvent limité, voués à la conservation (Pereira and Cooper 2006). De plus, si l'objectif est de protéger la biodiversité face au CC, on doit s'assurer que l'information acquise serve à l'amélioration de la conservation de la biodiversité, sinon l'argent serait vraisemblablement mieux utilisé à d'autres fins (McDonald-Madden et al. 2011). Comme les bénéfices des programmes de suivi n'apparaissent que sur le long terme et que les effets des CC prendront un certain temps à transparaître, les programmes de suivi doivent être mis en place seulement s'il existe de fortes évidences que le financement se poursuivra sur au moins deux décennies (di Castri et al. 1992, Watson and Novelty 2004). Au niveau du financement, plusieurs chercheurs ont constaté que les budgets sont généralement assignés presque entièrement à la prise de données et au traitement des échantillons (Caughlan and Oakley 2001, Watson and Novelty 2004). Or, pour qu'un programme soit viable et puisse effectivement répondre aux questions pour lesquelles il a été mis en place, 25 à 30 % du budget doit être consacré à l'entrée, la validation et l'analyse des données ainsi qu'à la diffusion des résultats. Ce pourcentage est plus grand que ce qui est habituellement consacré, mais négliger cet aspect peut mener à l'échec du programme (Caughlan and Oakley 2001). Finalement, le coût élevé d'un tel projet et la longue période de temps qui doit s'écouler avant l'arrivée des premiers résultats fait

que l'investissement semble souvent inapproprié, il faut donc bien faire comprendre avant la mise en place que les bénéficiaires arriveront tardivement et s'assurer que les attentes de tous soient réalistes (Watson and Novelly 2004). Au niveau de la main d'œuvre, il faut s'assurer d'avoir un personnel entraîné à de hauts standards pour toutes les étapes, de l'échantillonnage à l'entrée et l'analyse des données (di Castri et al. 1992, Watson and Novelly 2004). Il faut également entraîner des taxonomistes et organiser une collection de référence pour les organismes pour lesquels l'expertise n'est pas disponible (di Castri et al. 1992). Finalement, les programmes de suivi ont besoin de plusieurs générations de personnels qui n'auront souvent pas de contacts avec les bénéficiaires. Il faut donc s'assurer de leur transmettre les résultats du suivi afin qu'ils prennent conscience de la portée de leur tâche afin de les motiver à bien l'effectuer (Watson and Novelly 2004).

1.4 Recommandations pour la mise en place du suivi

Principes

- 1. Un programme de suivi doit être construit de façon à répondre à des questions. C'est l'objectif recherché par ce programme-ci et il tentera de répondre aux questions soulevées dans la mesure du possible. La conception est faite à partir du meilleur des connaissances actuelles, or, les incertitudes concernant les changements climatiques sont grandes.*
- 2. Comme dans tous programmes de suivi, les bénéficiaires d'un tel programme de suivi ne seront perceptibles qu'à long terme.*
- 3. Ce programme ne répondra pas à toutes les questions, mais il contribuera à mieux comprendre les effets des changements climatiques sur la biodiversité. Il est basé sur différents compromis expliqués dans le rapport.*

Financement

- 4. Pour être en mesure d'obtenir des résultats à long terme, ce programme de suivi devra bénéficier d'un financement soutenu au fil des ans, et ce, sur au moins deux décennies afin de pouvoir observer les effets des CC.*
- 5. Il importe que les budgets disponibles soient bien répartis entre le suivi et la conservation de la biodiversité. Même s'il est prévu que les connaissances générées par le système de suivi contribuent à la conservation de la biodiversité et au maintien des services écologiques, il sera important de consolider le réseau d'aires protégées et les mesures de conservations et de rétablissements visant certaines espèces et habitats.*
- 6. Qu'une partie importante du budget (25 à 30 %) soit consacrée à la saisie et à l'analyse des données et à la transmission des résultats au public, à la communauté scientifique et aux techniciens travaillant à la prise de données. Cet élément est*

important afin de s'assurer de l'utilité du programme de suivi (c.-à-d. que les questions posées trouvent leurs réponses).

- 7. S'assurer de former et de maintenir une main d'œuvre qualifiée au fil des ans en vue de réaliser les différentes étapes du programme de suivi.*

Les données

- 8. Que les données récoltées soient dans la mesure du possible compatibles et intégrées dans les nombreuses banques de données afin de favoriser les échanges nécessaires à la conservation et à la recherche sur la biodiversité à l'échelle nationale et internationale.*
- 9. Que les données recueillies dans le cadre de ce programme soient facilement disponibles auprès des intervenants concernés par les effets des changements climatiques.*
- 10. Que les données récoltées soient autant que possible compatibles avec les Variables Essentielles de Biodiversité actuellement en développement à l'Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) afin de servir à évaluer l'état de la biodiversité à l'échelle mondiale.*
- 11. Un effort important devrait être consenti afin de créer une base de méta-données décrivant les suivis ayant déjà cours à l'intérieur des différents ministères, dans un premier lieu, et dans les universités. De plus, une politique de partage de données entre les différentes branches gouvernementales devrait être établie afin de faciliter la mise en disponibilité de ces données dans l'optique d'enrichir le bilan sur la biodiversité du Québec.*

Les recommandations pour les indicateurs et les sites se retrouvent au chapitre 4 et 6 respectivement.

1.5 Des étapes supplémentaires

Nous avons procédé à plusieurs consultations et nous avons fait une revue de littérature sur les indicateurs de biodiversité. À partir de ces éléments, nous proposons différents indicateurs et exposons leurs avantages, leurs inconvénients et les questions auxquelles ils peuvent répondre (chapitre 4). Cependant :

- 1. Nous avons suggéré de nombreux indicateurs possibles pour détecter les effets des CC sur la biodiversité. Cependant, les choix finaux restent à faire en fonction des budgets disponibles et des résultats de la phase de validation terrain.*

Nous avons développé une méthodologie pour sélectionner des cellules de 15 km x 15 km dans lesquelles placer des sites d'échantillonnage en fonction de l'intensité prédite des CC et d'autres critères (p. ex., couvert forestier dominant, couverture spatiale des lacs ; chapitre 6). Cette méthodologie permet de pondérer l'importance des différents critères de façon à sélectionner des

cellules qui représentent différentes caractéristiques du paysage. Dans le chapitre 6, nous suggérons différentes pondérations pour les critères et présentons les choix de cellules qui les accompagnent. Cependant, les éléments suivants restent à faire :

2. *Le choix du design final devra être effectué en fonction des budgets et des orientations gouvernementales. Nous présentons une argumentation et des suggestions au chapitre 6.*
3. *Sélectionner l'emplacement des sites dans les cellules de 15 km x 15 km.*

Finalement, il reste à :

4. *Effectuer la validation terrain afin d'évaluer les coûts et les protocoles. Cette validation terrain permettra entre autre d'estimer le pourcentage de biodiversité capturé par les différentes méthodes afin de pouvoir ajuster l'effort d'échantillonnage et de pouvoir estimer la puissance statistique du design.*

1.6 Après CC-Suivi, la collaboration et le support se poursuit

Bien qu'officiellement le projet se termine fin mars et que ceci est le rapport final, l'équipe CC-Suivi va continuer à travailler avec les partenaires gouvernementaux afin de mener à bien le projet. Premièrement, plusieurs membres de l'équipe, financés par d'autres fonds, continueront à travailler activement sur le projet jusqu'à la fin août 2013. Durant cette période, plusieurs des parties de ce rapport seront soumises pour publications scientifiques. Nous entendons également peaufiner les éléments concernant le choix des indicateurs et consulter d'autres experts afin de valider les indicateurs proposés (chapitre 4). Nous allons également participer à l'étape de prééchantillonnage qui avait été préalablement repoussée et à la construction du protocole de suivi.

Nous avons également créé des méthodologies et des outils informatiques permettant 1- de localiser les cellules optimales pour les sites d'échantillonnage (chapitre 6) et 2- d'analyser les données provenant du programme de suivi (chapitre 7). Nous nous engageons à fournir sur plusieurs années du support technique et de la formation par rapport à l'utilisation de ces outils. Sur ce point, nous allons organiser des rencontres avec les partenaires gouvernementaux afin de donner des formations techniques sur l'utilisation des logicielles. Ces formations s'imbriqueront dans le cadre de la Chaire du Canada en Modélisation spatiale et Biodiversité détenue par Pedro Peres-Neto.

1.7 Références

- Araujo, M. B. and C. Rahbek. 2006. How does climate change affect biodiversity? *Science* **313**:1396-1397.
- Baird, D. J. and M. Hajibabae. 2012. Biomonitoring 2.0: a new paradigm in ecosystem assessment made possible by next-generation DNA sequencing. *Molecular Ecology* **23**:2039-2044.
- Balmford, A., P. Crane, A. Dobson, R. E. Green, and G. M. Mace. 2005. The 2010 challenge: data availability, information needs and extraterrestrial insights. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **360**:221-228.

-
- Butchart, S. H. M., M. Walpole, B. Collen, A. van Strien, J. P. W. Scharlemann, R. E. A. Almond, J. E. M. Baillie, B. Bomhard, C. Brown, J. Bruno, K. E. Carpenter, G. M. Carr, J. Chanson, A. M. Chenery, J. Csirke, N. C. Davidson, F. Dentener, M. Foster, A. Galli, J. N. Galloway, P. Genovesi, R. D. Gregory, M. Hockings, V. Kapos, J. F. Lamarque, F. Leverington, J. Loh, M. A. McGeoch, L. McRae, A. Minasyan, M. H. Morcillo, T. E. E. Oldfield, D. Pauly, S. Quader, C. Revenga, J. R. Sauer, B. Skolnik, D. Spear, D. Stanwell-Smith, S. N. Stuart, A. Symes, M. Tierney, T. D. Tyrrell, J. C. Vie, and R. Watson. 2010. Global Biodiversity: Indicators of Recent Declines. *Science* **328**:1164-1168.
- Cardinale, B. J., J. E. Duffy, A. Gonzalez, D. U. Hooper, C. Perrings, P. Venail, A. Narwani, G. M. Mace, D. Tilman, D. A. Wardle, A. P. Kinzig, G. C. Daily, M. Loreau, J. B. Grace, A. Larigauderie, D. S. Srivastava, and S. Naeem. 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* **486**:59-67.
- Caughlan, L. and K. L. Oakley. 2001. Cost considerations for long-term ecological monitoring. *Ecological Indicators* **1**:123-134.
- CBD. 2010. Global biodiversity outlook 3. Montréal, Canada.
- di Castri, F., J. R. Vernhes, and T. Younès. 1992. Inventorying and monitoring biodiversity: a proposal for an international network.
- Dobson, A. 2005. Monitoring global rates of biodiversity change: challenges that arise in meeting the Convention on Biological Diversity (CBD) 2010 goals. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **360**:229-241.
- Elith, J., C. H. Graham, R. P. Anderson, M. Dudik, S. Ferrier, A. Guisan, R. J. Hijmans, F. Huettmann, J. R. Leathwick, A. Lehmann, J. Li, L. G. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. McC. Overton, A. T. Peterson, S. J. Phillips, K. Richardson, R. Scachetti-Pereira, R. E. Schapire, J. Soberon, S. Williams, M. S. Wisz, and N. E. Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* **29**:129-151.
- Federal, Provincial and Territorial Governments of Canada. 2010. Canadian biodiversity: ecosystem status and trends 2010.
- Geupel, G. R., D. Humple, and L. J. Roberts. 2011. Monitoring decisions: not as simple as they seem? *Trends in Ecology & Evolution* **26**:107.
- Green, R. E., A. Balmford, P. R. Crane, G. M. Mace, J. D. Reynolds, and R. K. Turner. 2005. A framework for improved monitoring of biodiversity: responses to the world summit on sustainable development. *Conservation Biology* **19**:56-65.
- Greenwood, J. 2007. International Ornithological Committee Proceedings. *Journal of Ornithology* **1(suppl.)**:148.
- Harley, C. D. G. 2011. Climate Change, Keystone Predation, and Biodiversity Loss. *Science* **334**:1124-1127.
- Henry, P.-Y., S. Lengyel, P. Nowicki, R. Julliard, J. Clobert, T. Čelik, B. Gruber, D. S. Schmeller, V. Babij, and K. Henle. 2008. Integrating ongoing biodiversity monitoring: potential benefits and methods. *Biodiversity and Conservation* **17**:3357-3382.
- IPCC. 2007a. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC. 2007b. Climate change 2007: Synthesis Report. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

-
- Kerr, R. A. 2011. Time to adapt to a warming world, but where's the science? *Science* **334**:1052-1053.
- Krebs, C. J. 1991. The experimental paradigm and long-term population studies. *Ibis* **133**:2-8.
- Legg, C. J. and L. Nagy. 2006. Why most conservation monitoring is, but need not be, a waste of time. *Journal of Environmental Management* **78**:194-199.
- Lindenmayer, D. B., P. Gibbons, M. A. X. Bourke, M. Burgman, C. R. Dickman, S. Ferrier, J. Fitzsimons, D. Freudenberger, S. T. Garnett, C. Groves, R. J. Hobbs, R. T. Kingsford, C. Krebs, S. Legge, A. J. Lowe, R. O. B. McLean, J. Montambault, H. Possingham, J. I. M. Radford, D. Robinson, L. Smallbone, D. Thomas, T. Varcoe, M. Vardon, G. Wardle, J. Woinarski, and A. Zenger. 2012a. Improving biodiversity monitoring. *Austral Ecology* **37**:285-294.
- Lindenmayer, D. B. and G. E. Likens. 2009. Adaptive monitoring: a new paradigm for long-term research and monitoring. *Trends in Ecology & Evolution* **24**:482-486.
- Lindenmayer, D. B., G. E. Likens, A. Andersen, D. Bowman, C. M. Bull, E. Burns, C. R. Dickman, A. A. Hoffmann, D. A. Keith, M. J. Liddell, A. J. Lowe, D. J. Metcalfe, S. R. Phinn, J. Russell-Smith, N. Thurgate, and G. M. Wardle. 2012b. Value of long-term ecological studies. *Austral Ecology* **37**:745-757.
- Loreau, M., C. de Mazancourt, and E. Duffy. 2013. Biodiversity and ecosystem stability: a synthesis of underlying mechanisms. *Ecology Letters*:*in press*.
- Lovett, G. M., D. A. Burns, C. T. Driscoll, J. C. Jenkins, M. J. Mitchell, L. Rustad, J. B. Shanley, G. E. Likens, and R. Haeuber. 2007. Who needs environmental monitoring? *Frontiers in Ecology and the Environment* **5**:253-260.
- Mace, G. M. and J. E. M. Baillie. 2007. The 2010 Biodiversity Indicators: Challenges for Science and Policy. *Conservation Biology* **21**:1406-1413.
- Maclaurin, J. and K. Sterelny. 2008. What is biodiversity? The University of Chicago Press, Chicago, USA.
- Maslin, M. and P. Austin. 2012. Climate models at their limit? *Nature* **486**:183-184.
- McDonald-Madden, E., P. W. J. Baxter, R. A. Fuller, T. G. Martin, E. T. Game, J. Montambault, and H. P. Possingham. 2011. Should we implement monitoring or research for conservation? *Trends in Ecology & Evolution* **26**:108-109.
- McMahon, S. M., S. P. Harrison, W. S. Armbruster, P. J. Bartlein, C. M. Beale, M. E. Edwards, J. Kattge, G. Midgley, X. Morin, and I. C. Prentice. 2011. Improving assessment and modelling of climate change impacts on global terrestrial biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution* **26**:249-259.
- Montoya, J. M. and D. Raffaelli. 2010. Climate change, biotic interactions and ecosystem services. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **365**:2013-2018.
- Mora, C., D. P. Tittensor, S. Adl, A. G. B. Simpson, and B. Worm. 2011. How many species are there on Earth and in the ocean? *PLOS Biology* **9**:e1001127.
- Normander, B., G. Levin, A.-P. Auvinen, H. Bratli, O. Stabbetorp, M. Hedblom, A. Glimskär, and G. A. Gudmundsson. 2012. Indicator framework for measuring quantity and quality of biodiversity—Exemplified in the Nordic countries. *Ecological Indicators* **13**(1):104-116.
- Paquette, A. and C. Messier. 2011. The effect of biodiversity on tree productivity: from temperate to boreal forests. *Global Ecology and Biogeography* **20**:170-180.

-
- Parmesan, C. 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **37**:637-669.
- Parmesan, C. and G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* **421**:37-42.
- Pearson, R. G., W. Thuiller, M. B. Araújo, E. Martinez-Meyer, L. Brotons, C. McClean, L. Miles, P. Segurado, T. P. Dawson, and D. C. Lees. 2006. Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography* **33**:1704-1711.
- Pereira, H. and H. D. Cooper. 2006. Towards the global monitoring of biodiversity change. *Trends in Ecology & Evolution* **21**:123-129.
- Pereira, H. M., S. Ferrier, M. Walters, G. N. Geller, R. H. G. Jongman, R. J. Scholes, M. W. Bruford, N. Brummitt, S. H. M. Butchart, A. C. Cardoso, N. C. Coops, E. Dulloo, D. P. Faith, J. Freyhof, R. D. Gregory, R. Heip, R. Höft, G. C. Hurtt, W. Jetz, D. S. Karp, M. A. McGeoch, D. Obura, Y. Onoda, N. Pettorelli, B. Reyers, R. Sayre, J. P. W. Scharlemann, S. N. Stuart, E. Turak, M. Walpole, and M. Wegmann. 2013. Essential biodiversity variables. *Science* **339**:277-278.
- Peters, G. P., R. M. Andrew, T. Boden, J. G. Canadell, P. Ciais, C. Le Quéré, G. Marland, M. R. Raupach, and C. Wilson. 2012. The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nature Climate Change* **3**:4-6.
- Prather, C. M., S. L. Pelini, A. Laws, E. Rivest, M. Woltz, C. P. Bloch, I. D. Toro, C.-K. Ho, J. Kominoski, T. A. Scott Newbold, S. Parsons, and A. Joern. 2013. Invertebrates, ecosystem services and climate change. *Biological Reviews* **88**:327-348.
- Rudd, M. A. 2011. Scientists' Opinions on the Global Status and Management of Biological Diversity. *Conservation Biology* **25**:1165-1175.
- Stankowski, P. A. and W. H. Parker. 2011. Future distribution modelling: A stitch in time is not enough. *Ecological Modelling* **222**:567-572.
- Thompson, I., B. MacKey, S. McNulty, and A. Mosseler. 2009. Forest resilience, biodiversity, and climate change. A synthesis of the biodiversity/ resilience/ stability relationship in forest ecosystems. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal.
- Watson, I. and P. Novelty. 2004. Making the biodiversity monitoring system sustainable: Design issues for large-scale monitoring systems. *Austral Ecology* **29**:16-30.
- Yoccoz, N. G., J. D. Nichols, and T. Boulinier. 2001. Monitoring of biological diversity in space and time. *Trends in Ecology & Evolution* **16**:446-453.

2 Objectifs et avantages d'un programme de suivi de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques

Auteurs : Anouk Simard¹, Frédéric Boivin², Jacques Jutras¹, Pierre Larue¹ et Pedro Peres-Neto²

Affiliation : ¹Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, ²Université du Québec à Montréal, Chaire du Canada en modélisation spatiale et biodiversité,

2.1 Introduction

Les perturbations anthropiques sont la principale cause du déclin de la biodiversité dans le monde. Parmi celles-ci, les changements climatiques (CC) sont susceptibles d'engendrer des impacts très importants sur les écosystèmes et les organismes qui y vivent. Les changements climatiques et le déclin de la biodiversité entraînent également toute une gamme d'enjeux économiques et sociaux.

D'abord, la perte de biodiversité est très coûteuse. Il en résulte des pertes de services d'approvisionnement (p. ex., nourriture, eau, combustibles, élément biochimiques servant par exemple, à des fins pharmaceutiques), de services de régulation (p. ex., purification de l'air, de l'eau, pollinisation des cultures, contrôle des inondations), de services sociaux (récréation, tourisme, culturel, etc.) et de services ontogéniques (p. ex., épanouissement humain, fonction immunitaire). Ces pertes se situent actuellement autour de 5 milliards de dollars annuellement et se situeront entre 21 et 43 milliards de dollars annuellement au Canada en 2050³). Les coûts qui en résultent affecteront tout particulièrement les industries des ressources naturelles de nos sociétés (foresterie, agriculture, pêcheries). Les événements climatiques extrêmes seront plus fréquents et plus violents et la qualité de l'air et de l'eau en sera affectée.

Malgré ces sombres pronostiques, les CC entraîneront leur lot d'opportunités à ceux qui s'y seront préparé. L'Angleterre par exemple, se prépare déjà à la culture du vin sur une large partie de son territoire et, déjà, la qualité des vins de ce pays est en croissance due aux CC⁴. Au Québec, on peut se poser la question, quels secteurs d'activités et industries seront favorisés. Plusieurs études sont en cours notamment dans le domaine de l'acériculture, de la culture du maïs et de la vigne, mais des incertitudes demeurent. Afin de saisir les opportunités, il est essentiel de comprendre l'évolution et l'adaptabilité des systèmes en place et la nature des synergies qui en découleront. Mieux comprendre les facteurs qui régissent les écosystèmes et l'influence qu'aura les CC sur ceux-ci permettra d'être proactif afin de conserver ce qui peut être préservé et s'adapter à ce qui devra irrémédiablement changer.

Il existe déjà beaucoup de connaissances sur la biodiversité et les CC. Il est connu par exemple que, plusieurs espèces sont menacées principalement en raison de la perte d'habitats et de l'arrivée d'espèces exotiques envahissantes. On sait également que les CC contribueront à

³ <http://nrtee-trnee.ca/wp-content/uploads/2011/09/paying-the-price.pdf>

⁴ http://e360.yale.edu/feature/what_global_warming_may_mean_for_worlds_wine_industry/2478/

modifier la répartition de certaines espèces qui migreront vers le nord, entraînant des changements de composition des écosystèmes sur de vastes territoires. Par contre, dû à la complexité des interactions entre les organismes dans les écosystèmes et à la complexité des variations du climat, les répercussions de ces changements demeurent largement inconnues. Par exemple, au Québec, il est attendu par exemple que l'aire de répartition du cerf de Virginie s'étende vers le nord. Il est cependant difficile de prédire les impacts des CC plus au nord et leurs implications sur les industries comme la foresterie. Pour ce faire, il est non seulement important de comprendre les interactions directes entre les espèces déjà présentes (p. ex., fonctionnement des chaînes trophiques), mais aussi celles attendues avec des espèces qui se seront déplacées. Toutes ces interactions sont susceptibles d'affecter les processus écosystémiques et, ultimement, affecter la résilience des écosystèmes et les services écologiques sur lesquels reposent nos sociétés.

Ainsi, des questions d'apparences simples peuvent parfois avoir des conséquences insoupçonnées dont il est difficile de prévoir la portée et les enjeux, surtout si les connaissances sur les communautés et les écosystèmes sont inadéquates. Sans outil pour mesurer l'ampleur et la portée des changements climatiques et autres changements anthropiques, il est difficile d'identifier et de mesurer les impacts environnementaux et socio-économiques. Il est également complexe d'évaluer les opportunités à venir, notamment à travers la diversification de certaines industries traditionnelles (p. ex., forestière, agricole, récréotouristique, pêches) ou émergentes (p. ex., produit forestier non ligneux, technologies vertes).

Pour mesurer l'étendue et l'évolution des changements en matière de biodiversité et être à même de s'y adapter ou de saisir les enjeux et opportunités qui s'y rattache, il est nécessaire d'en effectuer le suivi. Cependant, la conception d'un programme de suivi de la biodiversité dans un contexte de CC n'est pas une mince affaire. Elle requiert d'évaluer de multiples variables, et de faire des choix qui souvent reposent sur des hypothèses et des compromis. Un suivi adéquat nécessite d'abord d'établir des objectifs clairs auxquels il est possible par la suite de confronter ou d'appuyer le choix des éléments à suivre et les différents compromis à apporter. Il faut aussi tenir en compte que la valeur d'un suivi de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques va au-delà de la simple surveillance des organismes et écosystèmes. Il est également essentiel de pouvoir, à partir de ce suivi, mieux comprendre les multiples enjeux socio-économiques et environnementaux.

Quelques suivis existent actuellement (p. ex., forestier, oiseaux), mais une large partie de la biodiversité n'est pas couverte. Nous présentons ici une liste des avantages, directs et indirects, qu'apporterait la mise en place d'un programme de suivi de la biodiversité dans un contexte de CC. Ces avantages sont sous-jacents aux objectifs d'un tel programme.

2.2 Listes des objectifs et avantages d'un programme de suivi de la biodiversité

- 1- Objectifs et valeurs ajoutées directes d'un programme de suivi de la biodiversité dans un contexte de CC.
 - a. Planification structurée du développement socio-économique :
 - Planifier la restructuration liée aux pertes de biodiversité et de services écologiques.

-
- Développer une vision de l'évolution des écosystèmes à long terme afin de procéder à un développement du territoire cohérent avec les nouvelles conditions climatiques.
 - Planifier un développement progressif et synchronisé de notre société en fonction des CC et de la biodiversité afin de minimiser les coûts (enjeux socio-économiques) et les dommages causés au patrimoine naturel à long terme.
 - Développer une vision économique pour de nouvelles industries basées sur les ressources naturelles en fonction des opportunités générées par les CC.
- b. Amélioration de la gestion et de la conservation de la biodiversité :
- Suivre la progression des écosystèmes (habitats et communautés) afin d'identifier les tendances actuelles et de prédire adéquatement les changements qui vont s'opérer à long terme.
 - Améliorer la compréhension des mécanismes sous-jacents aux changements de biodiversité liés aux CC et leurs implications à moyen et long terme.
 - Justifier certaines décisions de gestions en se basant sur des connaissances solides.
 - Prédire la répartition future des espèces afin de prévoir les changements en termes d'enjeux (p. ex. espèces exotiques et maladies), mais aussi de gains (p. ex. espèces favorisées).
 - Améliorer notre compréhension des changements qui vont s'opérer au niveau des interactions trophiques et qui ont le potentiel de modifier la composition et la structure des écosystèmes.
 - Développer les connaissances relatives à certains groupes taxonomiques méconnus (p. ex., bactéries et champignons), mais cruciaux pour plusieurs processus écosystémiques.
 - Développer la compréhension des processus d'adaptation au stress des différentes populations, espèces ou écosystèmes.
- c. Favoriser le maintien de certaines populations, écosystèmes ou processus liés aux services écologiques jugés prioritaires dans le but de minimiser les coûts à long terme étant donné qu'il est plus coûteux de restaurer *a posteriori* que de conserver *a priori*.
- d. Établissement des priorités d'adaptation en vertu des CC :
- Se doter, par l'amélioration des connaissances, de la capacité à concevoir et promouvoir des actions visant l'atténuation ou l'adaptation aux effets négatifs découlant des CC sur la biodiversité.
 - Développer des outils permettant d'évaluer l'ampleur de certaines problématiques afin de prioriser les différents enjeux.
- e. Respect des engagements gouvernementaux :
- Avoir la capacité de fournir un portrait de l'état de la biodiversité et de suivre l'impact des effets des CC sur celles-ci dans le cadre de la Convention de la Diversité Biologique.
 - Respect de la priorité 29 du « Plan d'action 2013-2020 sur les CC du Québec d'« Actualiser les outils d'évaluation, de protection et de gestion de la

-
- biodiversité et des écosystèmes »⁵, un élément qui peut difficilement être accompli sans un suivi de cette biodiversité.
- Respect du principe « 1 » (section I-6) de la loi sur le Développement durable : « Préservation de la biodiversité - la diversité biologique rend des services inestimables et doit être conservée pour le bénéfice des générations actuelles et futures. Le maintien des espèces, des écosystèmes et des processus naturels qui entretiennent la vie est essentiel pour assurer la qualité de vie des citoyens. »
 - Respect des responsabilités gouvernementales dans le cadre de la loi sur les espèces menacées ou vulnérables (Section II-7.1): « Exécuter ou faire exécuter des recherches, des études ou des analyses à l'égard des espèces qui semblent nécessiter une protection ou relatives à leurs habitats et accorder des subventions à ces fins. »
- f. Évaluation de la synergie entre les CC et les autres impacts anthropiques :
- Établir la contribution des CC et des autres menaces anthropiques sur la biodiversité découlant de leurs effets cumulatifs et de leurs synergies.
 - Contribuer à la conservation et la gestion de la biodiversité en se basant sur les connaissances des effets spatio-temporels attendus des CC étant donné qu'ils sont davantage prédictifs que ceux des autres perturbations anthropiques. Cet élément justifie l'intérêt de baser un programme de suivi sur les CC plutôt que sur les autres changements globaux.
- g. Contribution à l'avancement de la science:
- Les données biologiques à long terme sont essentielles afin de tester de nombreuses hypothèses en écologie.
- 2- Objectifs et valeur ajoutée indirecte d'un programme de suivi de la biodiversité dans un contexte de CC
- a. Générer des exemples concrets de l'incidence des CC sur les biens et services que la biodiversité génère pour nos sociétés :
 - Développer des arguments économiques liés à la protection et au maintien de la biodiversité.
 - Décrire les enjeux socio-économiques découlant de l'impact des CC sur les écosystèmes.
 - b. Générer une vision à long terme de l'importance de la biodiversité :
 - Sensibiliser le public aux effets des CC dans le but de développer une prise de conscience collective.
 - c. Faire un lien entre la sensibilisation et la mobilisation :
 - Encourager l'implication des citoyens dans la collecte de données sur la biodiversité (p. ex., observation d'ornithologistes, récolte de données lors d'activités en nature, Bioblitz⁶).
 - d. Générer des synergies de recherche :
 - Développer un réseau de partenariat et de collaboration entre des chercheurs de différents domaines travaillant au sein d'universités et du gouvernement afin d'approfondir certains éléments associés au programme de suivi ;
 - e. Arrimage avec d'autres programmes de recherche similaire à l'étranger:

⁵ http://www.mddefp.gouv.qc.ca/changements/plan_action/pacc2020.pdf, consulté le 28 février 2013

⁶ <http://www.smu.ca/bioblitz/bioblitz.html>

-
- S'intégrer dans les réseaux canadiens et internationaux associés au suivi de la biodiversité.
 - Comparer les tendances globales de la biodiversité dans les différentes provinces ou pays.

3 Sondage sur les priorités de suivi de la biodiversité

Auteurs : Frédéric Boivin¹, Anouk Simard², Jessica Levine³ et Pedro Peres-Neto¹

Affiliation : ¹Université du Québec à Montréal, Chaire du Canada en modélisation spatiale et biodiversité, ²Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, ³Centre pour la Science de la Biodiversité du Québec

3.1 Résumé

Les concepteurs de programmes de suivi de la biodiversité tentent de répondre aux questions « Quoi mesurer? » et « Où mesurer? ». Dépendant des objectifs du programme de suivi, le nombre d'options pour chacune de ces questions peut grandement varier. Par exemple, si l'objectif est de savoir de quelle façon réagit la biodiversité face à une perturbation globale, la quantité de designs possibles tend vers l'infini et, conséquemment, la conception risque de refléter les intérêts des concepteurs. Étant donné que les programmes de suivi demandent de l'investissement à long terme, il est préférable que ceux-ci reflètent les intérêts d'une plus grande tranche de la société. Ainsi, afin de déterminer les priorités de suivi de la biodiversité en fonction des changements climatiques d'intervenant de différents milieux, nous avons créé un sondage que nous avons fait parvenir à des milliers de personnes au Québec. 621 participants ont complété le sondage contenant 13 questions relatives au suivi et 13 questions démographiques (p. ex., âge, formation). La seule variable démographique influençant les réponses était le niveau de connaissances déclarées des participants en biodiversité, mais cette influence était faible. Sur les questions de design, les participants désirent une couverture complète de la province axée sur les milieux naturels. Une faible majorité des participants désire que les sites suivis subissent l'effet d'autres perturbations, principalement la foresterie, l'agriculture et l'urbanisation. La majorité souhaite que le suivi se concentre sur des espèces liées aux services écosystémiques, les espèces menacées et les espèces envahissantes. Cependant, les consensus étaient faibles ou inexistantes sur de nombreux aspects démontrant qu'il est difficile, voire impossible, de satisfaire tous les acteurs, ou même une majorité, avec un seul design. Ainsi, pour un budget limité, les choix faits risquent de refléter les besoins particuliers d'un groupe de recherche ou d'aménagement et le programme qui en découlera subira inmanquablement les critiques d'autres groupes.

3.2 Introduction

La biodiversité est en déclin mondialement suite aux perturbations se produisant autant aux échelles locales (p. ex., déforestation) que globales (p. ex., changements climatiques; CC) (CBD 2010). Alors que presque tous les scientifiques travaillant en conservation s'accordent sur cette affirmation (99.5% de 583 scientifiques consultés; Rudd 2011), l'évolution de la situation est inconnue pour la majorité des organismes hormis les plus charismatiques et les plus importants économiquement, et ce, seulement dans les régions les mieux nanties (Dobson 2005, Normander et al. 2012). De plus, pour de nombreux pays développés tel le Canada, la couverture spatiale est déficiente (Federal, Provincial and Territorial Governments of Canada 2010).

Conséquemment, plusieurs scientifiques et aménagistes suggèrent de mettre en place de nouveaux programmes de suivi de la biodiversité à larges échelles afin de couvrir plus de groupes taxonomiques et de territoires (p. ex., Mace and Baillie 2007, Lindenmayer et al. 2012). Ce désir d'étendre le suivi de la biodiversité est motivé par le besoin de déterminer l'état des écosystèmes face aux nombreuses perturbations, de proposer des actions de conservation plus adéquates et de vérifier si ces actions atteignent leurs objectifs (Balmford et al. 2005, Legg and Nagy 2006, Lovett et al. 2007). Balmford et al. (2005) ont également argumenté qu'une meilleure connaissance des tendances au niveau de la biodiversité est nécessaire afin de réorienter les efforts de conservation d'une philosophie de limitation des dégâts à une de restauration des fonctions dégradées. De plus, nous entrons dans une période de perturbations majeures de la biodiversité qui seront causées par les CC (p. ex., arrivées de nouvelles espèces par migration, changements dans la phénologie; Parmesan and Yohe 2003) dont les effets réels ne pourront être déterminés que par un suivi de la biodiversité (Lepetz et al. 2009). Malgré les bénéfices qui leur sont attribués, les programmes de suivi sont également critiqués comme étant des objectifs en soi plutôt que des outils d'aide à la décision ou à la recherche (Yoccoz et al. 2001, Lindenmayer and Likens 2009). De ce fait, plusieurs de ces programmes courent le risque de se transformer en entreprise de compilation de données qui, au final, n'apporte que bien peu de compréhension des phénomènes d'intérêts (Krebs 1991). Ces problèmes sont accentués par le fait que les questions d'aujourd'hui ne sont pas nécessairement celles de demain et, conséquemment, l'efficacité à long terme d'un programme de suivi ne peut être assurée (Watson and Novelty 2004).

Afin de pallier à ces problèmes, il devient tentant de tout mesurer afin de s'assurer d'avoir les données utiles pour répondre à toutes les questions. Cependant, la réalité est que les budgets et la main d'œuvre sont limités et qu'investir plus dans un élément (p. ex., plus large couverture spatiale) entraîne une diminution d'investissement dans un autre (p. ex., moins d'indicateurs suivis par site). En d'autres termes, l'élaboration d'un programme de suivi consiste à jauger et à prioriser les différents compromis (« *tradeoffs* ») en lien avec le nombre et la localisation des sites et le type et la quantité d'indicateurs suivis. De ce fait, le développement de programmes de suivi requière des prises de décisions difficiles impliquant nécessairement le sacrifice d'éléments d'intérêts (Geupel et al. 2011). De plus, il est probable que la vision du design optimal variera en fonction des intérêts de chacun (p. ex., objectifs scientifiques d'augmentation des connaissances vs. objectifs d'aménagement afin d'évaluer les résultats d'interventions; Yoccoz et al. 2001).

Dans ce contexte, il est donc important d'identifier et consulter les différents acteurs liés à la biodiversité afin de définir leurs objectifs (Green et al. 2005) afin de générer un programme avec une plus grande probabilité de succès à long terme. Consulter plusieurs acteurs peut aider à

réduire les options de designs en déterminant les éléments faisant consensus. Ces consensus peuvent à leur tour refléter l'état général des connaissances au niveau des processus écologiques sous-tendant ces choix (c.-à-d., si tous s'entendent sur un élément à suivre, celui-ci est probablement important; Rudd 2011, Duarte et al. 2012). La consultation peut également être un moyen efficace de faire connaître un programme naissant et de stimuler les collaborations, un élément essentiel du succès à long terme des programmes de suivi (Lindenmayer et al. 2011). De surcroît, étant donné que les questions peuvent changer dans le temps, les traces de ces consultations peuvent servir à mettre les objectifs de départ en contexte et, ainsi, mieux comprendre les choix originalement faits. Pour ces raisons, notre équipe, qui a pour mandat de développer un programme de suivi de la biodiversité en fonction des CC au Québec, a décidé de consulter différents acteurs du milieu de la biodiversité afin d'obtenir leurs opinions sur différents compromis centraux au design d'un tel programme. Cette consultation a été faite sous forme d'un sondage électronique et acheminé à des milliers de participants potentiels desquels 621 nous ont transmis leurs choix.

3.3 Méthodologie

3.3.1 Processus de création du sondage

En décembre 2010, nous avons demandé à des chercheurs et à des aménagistes universitaires (72), d'institutions gouvernementales (55), d'organismes non gouvernementaux (ONG; 10) et de compagnies privées (12) du Québec de nous transmettre des questions auxquelles ils souhaiteraient qu'un programme de suivi de la biodiversité en fonction des CC réponde. Une période de six semaines leur a été accordée pour nous transmettre les questions. Nous avons également invité les mêmes individus à participer à une rencontre de deux jours à Montréal où ces questions seraient priorisées afin de servir de base à l'élaboration du programme de biodiversité. Lors de cette période de six semaines, 35 personnes ont fourni d'une à cinq questions pour un total de 142 questions reçues. À la fin janvier 2011, 28 personnes ont participé à la rencontre de deux jours, mais il a été conclu que les questions devaient être retravaillées afin d'être utiles à un programme de suivi. Il a également été conclu que la consultation devait être faite à plus large échelle afin d'obtenir l'opinion de plus d'acteurs majeurs de la biodiversité au Québec. Ainsi, lors de la rencontre, les 142 questions originales ont été combinées et retravaillées en un nombre réduit de 45 questions plus générales (Annexe A). S'en est suivi une série de consultations à l'intérieur du groupe de recherche au cours desquelles les 45 questions ont de nouveau été réduites à 13 couvrant de façon générale les principaux points abordés. Deux versions du sondage, une française et l'autre anglaise, ont été créées et préadministrées à un nombre réduit de personnes hors du groupe de recherche afin de s'assurer qu'elles étaient bien comprises.

3.3.2 Constitution du sondage

Le sondage était constitué de questions démographiques (p. ex., profession, niveau de connaissance en biodiversité) et de treize questions de recherches à choix multiples (voir Annexe B pour consulter le sondage). La plupart des questions concernaient des compromis (c.-à-d., si on mesure plus un aspect, on mesure moins un autre) et, conséquemment, les participants ne pouvaient choisir qu'une ou deux options parmi les choix de réponses qu'ils leur étaient offerts, et ce, même si plus de choix leur plaisaient. Tel qu'il leur était précisé au début du sondage, ce nombre de choix limité était imposé consciemment afin d'émuler les choix difficiles auxquels

font face les concepteurs de programme de suivi (c.-à-d., on ne peut pas mesurer toutes les espèces dans tous les écosystèmes chaque année). De plus, notre objectif était d'explorer explicitement de quels côtés des différents compromis les participants se trouvaient et de détecter si leurs choix dépendaient de leur profession ou de leur connaissance de la biodiversité.

La première série de questions concernait les sites et visait principalement à déterminer leur localisation sur les axes nord-sud et est-ouest, les grands types de territoires (écosystèmes ou « *land cover* ») à couvrir, le niveau de perturbation anthropique affectant déjà les sites, les autres types de perturbations à couvrir (hormis les CC centraux au projet) ainsi que la quantité de sites. La seconde série de questions était orientée vers la sélection des cibles prioritaires du suivi (p. ex., espèces ou services écologiques), la quantité d'information à prendre sur chaque élément spécifique, les types d'espèces à prioriser ainsi que la répartition de ces espèces. Également, une question montrant de façon dichotomique le choix du système de suivi (système d'alarme vs système générant des connaissances scientifiques) était présentée. Finalement, une question d'ordre éthique et une de participation citoyenne étaient soumises aux participants.

3.3.3 Administration du sondage

Le sondage ne visait pas la population en général, mais plutôt des individus ayant des intérêts de près ou de loin dans le domaine de la biodiversité au Québec. Les participants potentiels identifiés par notre groupe de recherche étaient :

- des chercheurs universitaires (biologie, environnement, aménagement du territoire, géographie, agriculture, communication, philosophie, politique et sociologie),
- les chercheurs gouvernementaux et les aménagistes de trois ministères provinciaux (ministère des Ressources naturelles et de la Faune, MRNF; ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, MDDEP; ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, MAPAQ),
- les chercheurs des bureaux québécois de quatre agences fédérales (Environnement Canada, Pêches et Océans Canada, le Service Canadien des Forêts, Agriculture Canada),
- les travailleurs d'environ 140 ONG impliqués en environnement,
- les travailleurs des organismes de bassins versants du Québec,
- les responsables en environnement des grandes industries du Québec (électricité, foresterie, gaz, pétrole et mines),
- les travailleurs de firmes d'évaluation d'impacts environnementaux,
- les élus municipaux, provinciaux et fédéraux (députés provinciaux et fédéraux ainsi que les maires de toutes les municipalités du Québec),
- les professeurs de biologie de dix CÉGEP choisis aléatoirement,
- les responsables des 85 Zones d'Exploitation Contrôlée (ZEC; organismes dont l'objectif est de planifier, organiser, diriger et contrôler l'exploitation, la conservation et l'aménagement de la faune),
- les agriculteurs et
- les membres des premières nations.

Cette liste regroupe des participants potentiels aux connaissances en biodiversité de faibles à excellentes. L'objectif de ce mélange hétéroclite était en partie de faire connaître l'initiative (p. ex., en visant les députés et maires et les membres des premières nations) et également de comparer les décisions prises par des participants aux mêmes niveaux d'éducation dans des domaines différents (p. ex., chercheurs universitaires en sciences sociales vs sciences

biologiques). Au total, environ 10 000 personnes ont reçu l'invitation par courriel directement ou par l'entremise de leur association. L'invitation incluait une courte description du projet CC-Suivi et un lien pour remplir le sondage en ligne (*via* l'application internet SurveyMonkey⁷). Le sondage a été mis en ligne le 27 septembre 2011 et était disponible durant six semaines. Un rappel a été envoyé deux semaines avant l'échéance. Les courriels étaient écrits en français et en anglais et contenaient des liens vers une version française et une version anglaise du sondage.

3.3.4 Analyses statistiques

Une analyse des correspondances (« *correspondence analysis* », CA) et un arbre de régression multivarié (« *multivariate regression tree* », MRT; De'ath 2002) ont été effectués dans l'objectif de détecter des patrons dans les réponses des participants et de lier ces patrons à des variables démographiques. Les analyses ont été effectuées dans l'environnement R (R Development Core Team 2008) à l'aide des suppléments (« *packages* ») *vegan* (Oksanen et al. 2012) et *mvpart* (De'ath 2012).

3.4 Résultats et discussions

3.4.1 Participation

621 participants ont complété le sondage dont la majorité provenait de ministères fédéraux ou provinciaux (38 %) ou d'universités (21 %). La majorité des participants possédait un diplôme dans un domaine touchant la biodiversité soit en biologie (40 %), en sciences environnementales (13 %), en géographie (8 %), en foresterie (7 %) ou en écologie (6 %) alors que le reste provenait de domaines variés telles l'éducation (2 %) ou la politique (5 %). 85 % des répondants possédaient un diplôme universitaire (24 % baccalauréats, 36 % maîtrises et 25 % doctorats). Finalement, la majorité des répondants ont déclaré posséder une bonne ou une excellente connaissance de la biodiversité (58 et 26 % respectivement) alors que 16 % ont déclaré avoir peu ou pas de connaissance à ce sujet.

Autant la CA que le MRT n'ont pas permis de trouver de tendances dans les réponses (c.-à-d., des blocs de réponses cohérents parmi les participants). De plus, à l'aide du MRT, le seul facteur démographique permettant de discriminer les réponses des participants était le niveau de connaissances déclaré par les participants; les participants déclarant avoir peu ou pas de connaissances en biodiversité ayant répondu différemment. Cependant, ces différences étaient faibles et spécifiques à quelques questions et elles sont décrites dans le texte lorsque nécessaires.

3.4.2 Les sites

Les deux premières questions demandaient aux participants de déterminer où sur les axes nord-sud et est-ouest les sites devraient prioritairement être localisés (Figure 3.1). 57 % (nord-sud) et 72 % (est-ouest) des participants ont répondu qu'il ne devrait pas y avoir de priorités; une couverture complète de la province est préconisée par la majorité des participants. De plus, ce pourcentage est encore plus élevé parmi les participants déclarant avoir une excellente connaissance de la biodiversité atteignant respectivement 64 % et 81 %. Ces pourcentages sont plus élevés dans le cas du gradient est-ouest probablement dû au fait que ce gradient est moins important dans la détermination du climat et des organismes que le gradient nord-sud (voir Figure 1 pour les principaux domaines bioclimatiques du Québec). En effet, le gradient est-ouest

⁷ <http://fr.surveymonkey.com/>

est principalement organisé autour d'une diminution des précipitations, ce qui entraîne, entre autres, une augmentation de la récurrence des feux de forêts et un rajeunissement des peuplements forestiers d'est en ouest (Xenopoulos et al. 2005), mais un changement d'espèces limité par rapport au gradient nord-sud. Parmi les participants ayant priorisé une région du gradient nord-sud, 19 % ont opté pour la zone (sub-) arctique contre 14 % pour la zone tempérée et 10 % pour la zone boréale; pour le gradient est-ouest, 18 % contre 10 % ont opté pour l'ouest par rapport à l'est. Il est à noter que la majorité des suivis actuels s'effectuent dans le sud de la province ce qui ne correspond pas au désir de la majorité des participants, mais est plutôt représentatif des contraintes budgétaires et logistiques liées à l'échantillonnage dans le nord. En effet, bien que cet élément n'était pas inclus dans la question, plus de sites ou indicateurs peuvent être suivis au sud qu'au nord pour un budget donné.

Nous avons ensuite demandé aux participants de prioriser un ou deux types de territoire pour le suivi (Figure 3.2a). Parmi les choix proposés, les trois types de milieux naturels (milieux humides, forestiers et aquatiques d'eau douce [lacs et rivières]) ont été sélectionnés respectivement dans 66, 58 et 47 % des cas. Les deux milieux anthropiques (milieux urbains et agricoles) ont été sélectionnés par une minorité (8 et 13 % respectivement) et principalement par ceux déclarant avoir une faible connaissance en biodiversité (16 et 20 % respectivement). Malgré une augmentation de l'intérêt porté à la biodiversité urbaine (p. ex., nombre d'articles publiés par année, répertorié dans Scopus⁸, avec « *urban biodiversity* » comme mot clef a augmenté de 109 à 192 de 2006 à 2011), cet aspect de la biodiversité demeure marginal dans l'ordre de priorité des participants. Le choix clair des participants de se concentrer dans les écosystèmes naturels est probablement dû en partie au fait qu'ils représentent la grande majorité de la superficie du Québec. La réponse à cette question contraste cependant avec la question suivante où la majorité des participants ont répondu que les sites devraient être localisés dans des endroits où ont lieu des perturbations modérées ou élevées (31 et 24 % des participants respectivement; Figure 3.2b). Cependant, parmi ceux ayant choisi des sites à perturbation élevée, on compte 39 % des participants ayant déclaré avoir une faible connaissance de la biodiversité comparativement à 17 % pour ceux en ayant une excellente connaissance. Lorsque questionnés sur les sources de perturbation (une ou deux sources autres que les CC; Figure 3.2c) devant être suivies, la plupart des participants ont choisi l'urbanisation (42 %), l'agriculture (42 %) ou la foresterie (48 %). Ces types de perturbations ont de plus été choisis en plus grandes proportions par ceux ayant déclaré avoir une excellente connaissance de la biodiversité (48, 47 et 58 % respectivement). Trois autres perturbations (exploitation minière, autres industries et production énergétique) ont été choisies par 15 à 21 % des répondants tandis que les activités touristiques n'ont été choisies que par 3 % des répondants. Au final, bien que la majorité des participants souhaite que les milieux naturels soient le centre d'attention du suivi, une faible majorité désire que d'autres types de perturbations que les CC (principalement l'urbanisation, l'agriculture et la foresterie) soient également suivies.

3.4.3 Les indicateurs

Les participants devaient ensuite sélectionner s'ils préféreraient que le suivi se concentre sur les espèces ou sur les processus écosystémiques (p. ex., productivité, pollinisation). Alors qu'une faible majorité de participants a choisi les espèces par rapport aux processus écosystémiques (53 % contre 47 % respectivement; Figure 3.3a), cette majorité est presque entièrement attribuable aux participants déclarant avoir une excellente connaissance de la biodiversité (60 %

⁸ <http://www.scopus.com/home.url>

des « experts » ont choisi les espèces). Il n'y a donc pas de consensus qui se dégage de cette question. Cependant, même si l'on a demandé aux participants de choisir (favoriser) une seule des deux options, la composition en espèces et les services écosystémiques sont intimement liés (Mace et al. 2011) et peuvent être suivis de concert. À l'heure actuelle, les connaissances et les modèles des effets des CC sont plus avancés au niveau des espèces que des services écosystémiques (Montoya and Raffaelli 2010). Ceci est principalement dû au fait que les données pour certains services écosystémiques sont rares ou inexistantes (Schindler 2001). L'établissement d'un nouveau programme de suivi est une occasion unique de pallier à ce qui est considéré comme un problème par plusieurs (p. ex., Schindler 2001, Green et al. 2005). De plus, un suivi conjoint des espèces et des processus écosystémiques pourrait permettre de mieux comprendre les liens qui les unissent (Reyers et al. 2012) et permettrait de répondre aux aspirations de tous.

En plus de la réponse précédente, un autre élément nous indique que les participants souhaitent un suivi conjoint des espèces et des services écosystémiques. En effet, lorsque nous avons demandé aux participants de choisir un ou deux types d'organismes devant être suivis prioritairement (Figure 3.3b), les espèces rendant des services écosystémiques (p. ex., les bourdons pour la pollinisation) a été la réponse la plus choisie (46 % des participants). Notez ici que par type d'organismes, la question ne faisait pas référence à des taxons, mais à des catégories générales d'espèces (p. ex., rares, communes, économiquement importantes). En plus des espèces liées aux services, les espèces menacées ou vulnérables et les espèces envahissantes ont également été sélectionnées par une large portion des participants (45 et 41 % des participants respectivement). Hormis ces trois groupes, les espèces sauvages à importance économique, les espèces communes et les espèces rares (mais pas en danger) ont respectivement été sélectionnées par 21, 19 et 16 % des participants. Il est à noter que les espèces à importances économiques ont particulièrement été sélectionnées par les participants ayant de faibles connaissances en biodiversité comparativement à ceux avec une excellente connaissance (28 contre 16 %). Finalement, les espèces emblématiques ont peu été sélectionnées par les participants (3 %).

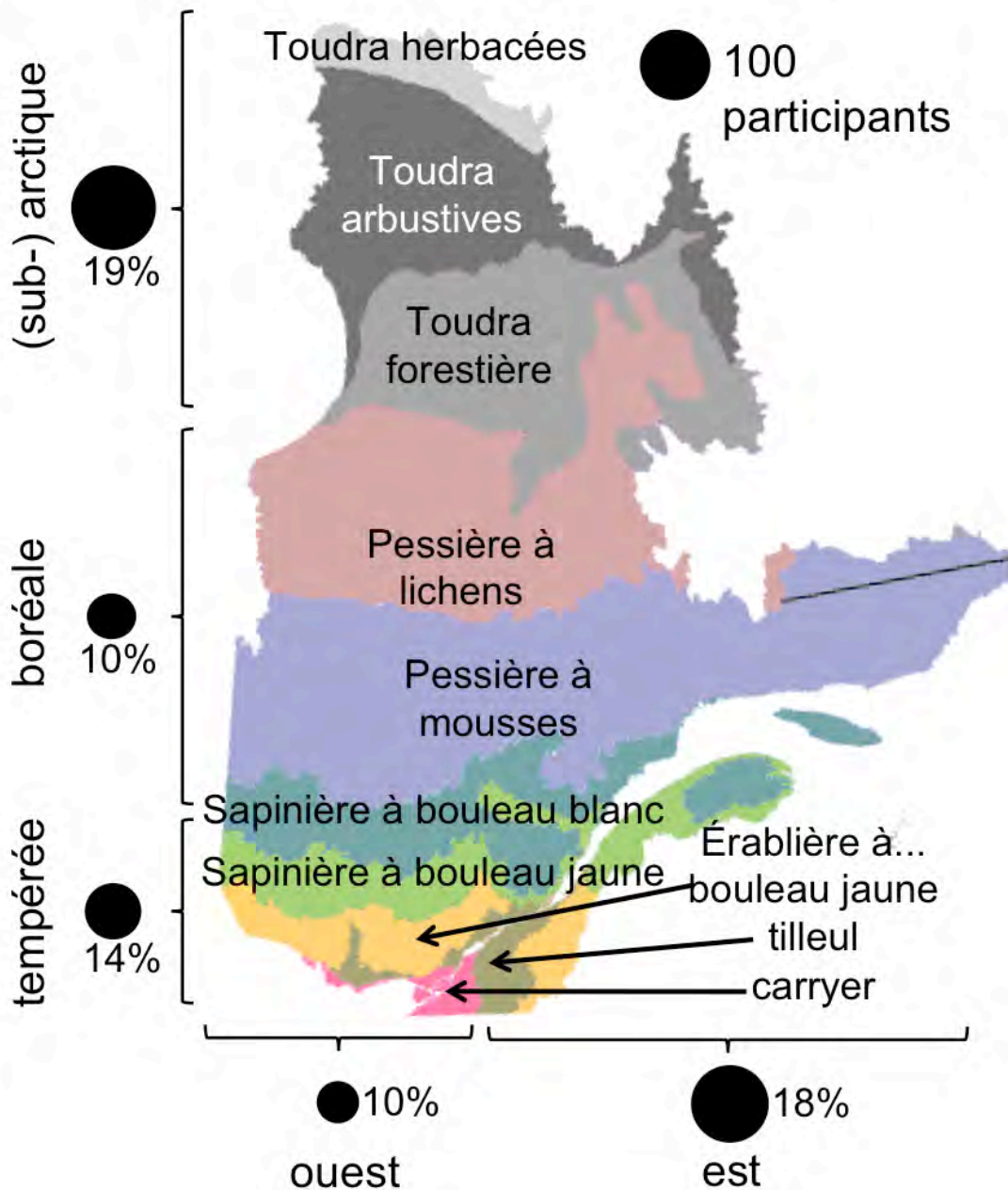


Figure 3.1 : Priorité de localisation pour le suivi de l'effet des changements climatiques sur la biodiversité du Québec pour les axes nord-sud et est-ouest. Les régions de différentes couleurs présentent les zones bioclimatiques du Québec. La taille des bulles correspond au nombre de participants ayant choisi les différentes options. Il est à noter que pour les deux axes, l'option « aucune priorité » était disponible et a été choisie par la majorité des participants (57 % et 71 % respectivement). L'axe nord-sud était subdivisé en partie tempérée, boréale et (sub-) arctique tandis que l'axe est-ouest était divisé en section est et ouest. La division est-ouest représente un gradient de diminution des précipitations s'accompagnant d'une augmentation de la récurrence des feux de forêts et entraînant des changements dans la composition forestière. Carte provenant du Ministère des Ressources naturelles du Québec⁹.

⁹ <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-zones-carte.jsp>, consultée le 23 octobre 2012

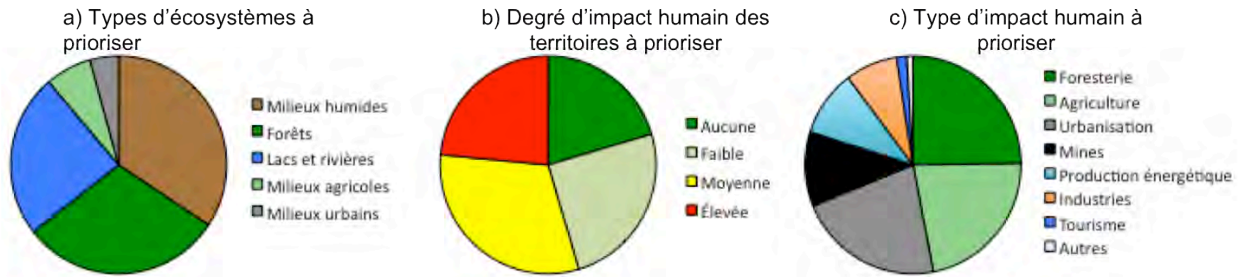


Figure 3.2 : Proportions de réponses des participants à 3 questions. a) Quels types d'écosystèmes devraient être priorisés lors d'un suivi de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques? Choisissez une ou deux options. b) Quel type de zones, en vertu de leur niveau d'impact humain, devrait être priorisé lors d'un programme de suivi de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques? Choisissez une option. c) Si le suivi de la biodiversité a lieu dans des zones avec des impacts humains, quel type d'activité devrait prioritairement être suivi? Choisissez une ou deux options.

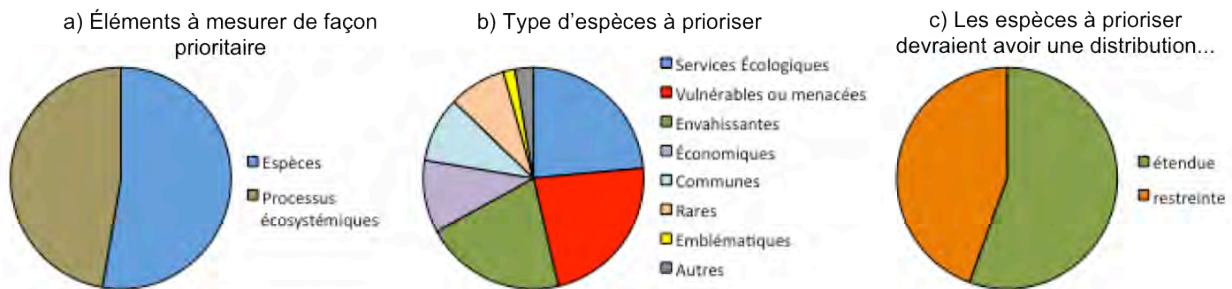


Figure 3.3 : Proportions de réponses des participants à 3 questions. a) Est-ce que le programme de suivi devrait se concentrer sur la prise de données au niveau des espèces ou des processus écosystémiques? Choisissez une option. b) Quels types d'espèces le programme de suivi devrait prioriser? Choisissez une ou deux options. c) Est-ce que le suivi devrait se concentrer sur des espèces avec une distribution étendue ou restreinte au Québec? Choisissez une option.

Tel que mentionné précédemment, les espèces liées aux services écosystémiques semblent une priorité pour les participants. Cependant, le choix de ces espèces dépend des services que l'on désire suivre. Par exemple, les microorganismes jouent un rôle prépondérant dans bon nombre de processus et services (p. ex., recyclage des nutriments), mais ceux-ci ne sont pas ou peu suivis dans la majorité des programmes ce qui limite notre compréhension de ces services (Dobson 2005). Malheureusement, aucune question ne demandait aux participants de prioriser les services écosystémiques (p. ex., pollinisation, production de bois, filtration d'eau et d'air). Cependant, dans une récente revue de littérature, Cardinale et al. (2001) ont répertorié les services écosystémiques pour lesquels peu ou pas d'études ont eu lieu. Certains de ces services écosystémiques pourraient être des cibles intéressantes dans un cadre scientifique, mais également dans un cadre d'aménagement et méritent de plus amples discussions avec nos partenaires (p. ex., stabilité de la production de bois en fonction de la biodiversité). En ce qui a trait à la possibilité de suivre les espèces menacées à large échelle, la faisabilité de cette option dépend de la rareté de ces espèces. En effet, les espèces menacées et rares présentent une difficulté parce que leur rareté fait en sorte qu'il est peu probable que des sites d'échantillonnage disposés aléatoirement (ou selon d'autres critères) contiennent des individus de ces espèces. Si l'on veut mesurer ces espèces, il faut viser directement des sites où elles se trouvent ce qui peut aller à l'encontre d'autres objectifs (p. ex., localiser des sites dans des zones où les CC sont

prévus être important). De tels problèmes ne sont pas à prévoir pour les espèces menacées, mais encore largement répandues. Finalement, les participants souhaitaient l'inclusion dans le suivi des espèces envahissantes. Étant donné que les espèces invasives arrivent généralement dans les lieux où le nombre de propagules non indigènes est élevé (Schneider et al. 2010; p. ex., les principaux points d'échanges commerciaux tels les ports, Ruiz-Labourdette et al. 2013), localiser les sites près des agglomérations urbaines devrait permettre de détecter de nouvelles espèces invasives. Finalement, les espèces emblématiques qui sont fréquemment utilisées en conservation dans le but de stimuler la protection de territoires (Verissimo et al. 2011) ne sont pas une priorité en ce qui concerne le suivi de la biodiversité lié aux CC.

Nous avons également demandé aux participants s'ils croyaient préférable de suivre des espèces avec une répartition étendue ou restreinte (Figure 3.3c). Il n'y a pas de tendance claire à ce sujet, alors que 56 % des participants (mais 47 % chez ceux avec une excellente connaissance de la biodiversité) ont répondu qu'il est préférable de suivre les espèces à répartition étendue. Cependant, le choix de taxons ou de groupes fonctionnels comme sujet d'étude (p. ex., les insectes du sol) et l'utilisation de méthodes d'échantillonnage non discriminantes (p. ex., des trappes d'émergence) peuvent permettre d'étudier les deux groupes sans effectuer de choix spécifiques.

3.4.4 Les compromis

Trois questions directement organisées autour de la notion de compromis ont été posées aux participants. L'idée derrière ces compromis est que plus le nombre d'éléments (sites ou espèces) suivi augmente, plus les chances de détecter des changements localisés ou n'affectant qu'une partie de la biodiversité croient. Cependant, en limitant la quantité d'information prise sur chaque élément, la capacité de déterminer la cause de ce changement s'en trouve diminuée. Ainsi, la première de ces questions demandait aux participants s'ils préféreraient un suivi contenant plus de sites et moins d'information par site ou moins de sites et plus d'information par site (Figure 3.4a). La majorité des participants (65 %) ont choisi un suivi comprenant plus de sites, préférant ainsi sacrifier la quantité d'indicateurs suivis pour une plus grande couverture spatiale. Ce choix se comprend par le fait que le Québec possède un grand territoire nécessitant une grande quantité de sites pour être couvert de façon significative.



Figure 3.4 : Proportions de réponses des participants à 3 questions. a) Est-ce que le programme de suivi devrait inclure plus de sites avec moins de données récoltées par site ou moins de sites avec plus de données collectées par site? Choisissez une option. b) Par site, est-ce que le programme de suivi devrait collecter moins de variables par espèces pour un plus grand nombre d'espèces ou moins de variables par espèces pour un plus grand nombre d'espèces? Choisissez une option. c) Est-ce que le suivi devrait être conçu de façon à générer des signaux d'alarme ou des connaissances scientifiques? Choisissez une option.

De façon semblable, nous avons demandé aux participants s'ils préféreraient suivre plus d'espèces avec moins de données par espèces ou moins d'espèces avec plus de données pour chaque (Figure 3.4b). Ici, la réponse était partagée alors que 49 % des participants ont choisi moins d'espèces et 51 % plus d'espèces. Il est à noter que pour ces deux questions, le pourcentage pour chacun des choix est similaire, peu importe le niveau de connaissances en biodiversité. Cependant, on trouve une certaine cohérence chez les répondants alors que ceux qui ont opté pour échantillonner beaucoup de sites ont opté à 59 % pour échantillonner beaucoup d'espèces alors que ceux qui ont opté pour peu de sites ont également opté pour peu d'espèces à 64 %. Finalement, nous avons explicitement demandé aux participants s'ils favoriseraient un programme de suivi basé sur la génération de signaux d'alarme ou sur la génération des connaissances scientifiques (Figure 3.4c). Par cette question, nous entendons qu'un système de suivi générant des signaux d'alarme devrait maximiser les chances de détection de changements alors qu'un système axé sur les connaissances devrait approfondir des cas plus spécifiques afin de favoriser l'explication des phénomènes observés. À cette question, 57 % des répondants ont choisi un programme générant des connaissances scientifiques. Il est généralement admis que les scientifiques et les aménagistes ont des objectifs de suivi différents (Yoccoz et al. 2001). Cependant, dans notre étude, il n'y avait pas de différence entre les réponses en fonction de l'employeur (agences gouvernementales versus universités), bien que les chercheurs (34) ont choisi à 84 % un programme scientifique et les coordonnateurs et gestionnaires (71) ont choisi le programme scientifique à 54 %. Il est cependant à noter qu'un grand nombre de répondants ont inscrit biologiste comme profession (117), ce qui inclut probablement des aménagistes et des chercheurs et limite notre capacité à discriminer les deux groupes.

3.4.5 L'éthique et la participation citoyenne

Nous avons demandé aux participants s'ils croyaient qu'il était justifiable d'euthanasier des organismes afin de les conserver et de les analyser lorsqu'une meilleure technologie sera disponible. À cette réponse, trois options de réponse étaient offertes: oui, non et je n'ai pas d'opinion à ce sujet. 42 % des participants ont répondu qu'ils étaient d'accord, 32 % contre et 26 % n'avaient pas d'opinion (Figure 3.5a). Il est à noter que ceux déclarant avoir peu de connaissance en biodiversité ont choisi les trois options à 33, 33 et 34 % respectivement alors que ceux ayant une excellente connaissance les ont plutôt choisis à 47, 34 et 18 % (moins d'indécis et plus de gens en accord). Cette question indique qu'une telle initiative serait probablement mieux acceptée par les gens du milieu de la biodiversité que par la population en général. Il est à noter que nous n'avons pas précisé quels types d'organismes pouvaient être l'objet d'euthanasie. Ainsi, on pourrait s'attendre à ce que le pourcentage d'acceptation ait été plus élevé si l'on avait précisé que les organismes étaient des insectes et moins si l'on avait précisé que les organismes étaient des grands mammifères. Cette question s'applique dans un cadre où les technologies évoluent rapidement et où il est envisageable de penser profiter de nouvelle technologie dans un avenir proche. Par exemple, les avancées en métagénomiques et en ADN environnementale (Baird and Hajibabae 2012) pourraient permettre de déterminer pour un faible coût tous les parasites et symbiotes des organismes (Cherry et al. 2011).

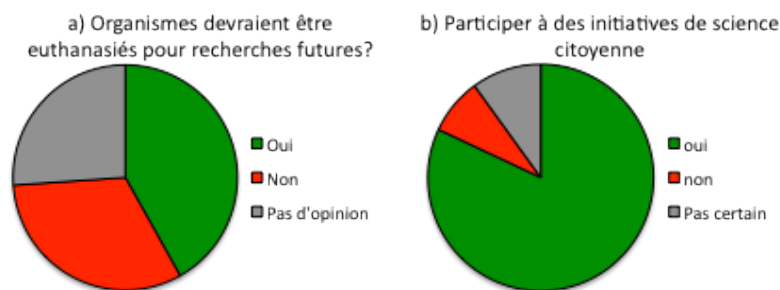


Figure 3.5 : Proportions de réponses des participants à 2 questions. a) Croyez-vous que des spécimens devraient être euthanasiés et placés dans des collections scientifiques pour être utilisés dans des recherches futures lorsque de meilleures technologies ou de plus grandes ressources seront disponibles pour les analyser? Choisissez une option. b) Seriez-vous prêt à consacrer une demi-journée par année, ou plus, de votre temps personnel pour participer à la collecte de données dans le cadre d'un programme de suivi de la biodiversité? Choisissez une option.

Enfin, nous avons demandé aux participants s'ils seraient prêts à investir bénévolement une demi-journée de leur temps par année à des activités d'échantillonnages, communément appelées science citoyenne. À cette question, 82 % ont répondu qu'ils seraient prêts à le faire, 8 % non et 10 % n'étaient pas certains (Figure 3.5b). Notre sondage a probablement été répondu majoritairement par des personnes intéressées à la biodiversité ce qui explique le haut pourcentage de gens intéressés à participer à de telles initiatives. Tout de même, ce haut taux d'intérêt indique qu'un programme utilisant la participation citoyenne aurait des bonnes chances de fonctionner s'ils possédaient une méthode de communication efficace (p. ex., en contactant les membres d'ONG en environnement *via* leurs associations). Les programmes impliquant la participation citoyenne sont de plus en plus nombreux et importants de par le monde (Silvertown 2009, Jiguet et al. 2011). Au Québec, l'Étude des populations d'oiseaux du Québec (ÉPOQ¹⁰), Opération Floraison¹¹ et d'autres fonctionnent déjà de cette façon. Malgré certains problèmes liés à l'analyse des données provenant de la science citoyenne (p. ex., différence dans la capacité d'identification et l'effort d'échantillonnage des bénévoles; Bonardi et al. 2011), la grande quantité de sites pouvant être couverts par l'utilisation de bénévoles compense en bonne partie ces lacunes. En fait, il a été montré que la quantité de données récoltées sur un groupe taxonomique est proportionnelle à la quantité de volontaires impliquées dans les mesures de données (Schmeller et al. 2009). Alors que plusieurs initiatives faisant appels aux citoyens existent déjà, un réseau de suivi institutionnalisé pourrait se concentrer sur des organismes non touchés par ces suivis et inclure des organismes plus difficiles à suivre pour des gens sans formation spécialisée.

3.5 Conclusions

Les choix des participants n'étaient influencés que par leur niveau de connaissances en biodiversité, quoique faiblement. De plus, bien que les participants étaient forcés de faire des choix, dans de nombreux cas, aucune option n'est sortie du lot. Parmi les tendances les plus importantes, les participants souhaitaient une couverture complète du Québec avec des sites localisés principalement dans les milieux naturels. Par contre, une faible majorité des participants

¹⁰ <http://www.oiseauxqc.org/epoq.jsp>

¹¹ <http://www.naturewatch.ca/francais/plantwatch/>

désire tout de même que l'influence d'autres perturbations que les CC soit incluse dans un éventuel programme de suivi (foresterie, agriculture, urbanisation). Il semble également se dégager un désir de suivre autant les espèces que les services écosystémiques en plus de suivre les espèces menacées et les espèces envahissantes. Finalement, une large proportion de participants se dit prête à participer à des initiatives de sciences citoyennes. Notre sondage montre donc qu'il est difficile, voire impossible, de satisfaire tous les acteurs, ou même une majorité, avec un seul design. Ainsi, pour un budget limité, les choix faits risquent de refléter les besoins particuliers d'un groupe de recherche ou d'aménagement et le programme qui en découlera subira inmanquablement les critiques d'autres groupes.

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont pris de leur précieux temps pour répondre au sondage.

*Ce sondage fera l'objet d'une publication scientifique qui sera soumise au journal *Ecology and Society*.*

3.6 Références

- Baird, D. J. and M. Hajibabae. 2012. Biomonitoring 2.0: a new paradigm in ecosystem assessment made possible by next-generation DNA sequencing. *Molecular Ecology* **23**:2039-2044.
- Balmford, A., P. Crane, A. Dobson, R. E. Green, and G. M. Mace. 2005. The 2010 challenge: data availability, information needs and extraterrestrial insights. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **360**:221-228.
- Bonardi, A., R. Manenti, A. Corbetta, V. Ferri, D. Fiacchini, G. Giovine, S. Macchi, E. Romanazzi, C. Soccini, L. Bottoni, E. Padoa-Schioppa, and G. F. Ficetola. 2011. Usefulness of volunteer data to measure the large scale decline of "common" toad populations. *Biological Conservation* **144**:2328-2334.
- CBD. 2010. Global biodiversity outlook 3. Montréal, Canada.
- Cherry, S. G., A. E. Derocher, K. A. Hobson, I. Stirling, and G. W. Thiemann. 2011. Quantifying dietary pathways of proteins and lipids to tissues of a marine predator. *Journal of Applied Ecology* **48**:373-381.
- De'ath, G. 2002. Multivariate regression trees: a new technique for modeling species-environment relationships. *Ecology* **83**:1105-1117.
- De'ath, G. 2012. Multivariate partitioning. R package version 1.6-0.
- Dobson, A. 2005. Monitoring global rates of biodiversity change: challenges that arise in meeting the Convention on Biological Diversity (CBD) 2010 goals. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **360**:229-241.
- Duarte, L. D. S., P. V. Prieto, and V. D. Pillar. 2012. Assessing spatial and environmental drivers of phylogenetic structure in Brazilian Araucaria forests. *Ecography* **35**:952-960.
- Federal, Provincial and Territorial Governments of Canada. 2010. Canadian biodiversity: ecosystem status and trends 2010.
- Geupel, G. R., D. Humple, and L. J. Roberts. 2011. Monitoring decisions: not as simple as they seem? *Trends in Ecology & Evolution* **26**:107.

-
- Green, R. E., A. Balmford, P. R. Crane, G. M. Mace, J. D. Reynolds, and R. K. Turner. 2005. A framework for improved monitoring of biodiversity: responses to the world summit on sustainable development. *Conservation Biology* **19**:56-65.
- Jiguet, F., V. Devictor, R. Julliard, and D. Couvet. 2012. French citizens monitoring ordinary birds provide tools for conservation and ecological sciences. *Acta Oecologica* **44**:58-66.
- Krebs, C. J. 1991. The experimental paradigm and long-term population studies. *Ibis* **133**:2-8.
- Legg, C. J. and L. Nagy. 2006. Why most conservation monitoring is, but need not be, a waste of time. *Journal of Environmental Management* **78**:194-199.
- Lepetz, V., M. Massot, D. S. Schmeller, and J. Clobert. 2009. Biodiversity monitoring: some proposals to adequately study species' responses to climate change. *Biodiversity and Conservation* **18**:3185-3203.
- Lindenmayer, D. B., P. Gibbons, M. A. X. Bourke, M. Burgman, C. R. Dickman, S. Ferrier, J. Fitzsimons, D. Freudenberger, S. T. Garnett, C. Groves, R. J. Hobbs, R. T. Kingsford, C. Krebs, S. Legge, A. J. Lowe, R. O. B. McLean, J. Montambault, H. Possingham, J. I. M. Radford, D. Robinson, L. Smallbone, D. Thomas, T. Varcoe, M. Vardon, G. Wardle, J. Woinarski, and A. Zerger. 2011. Improving biodiversity monitoring. *Austral Ecology* **37**:285-294.
- Lindenmayer, D. B. and G. E. Likens. 2009. Adaptive monitoring: a new paradigm for long-term research and monitoring. *Trends in Ecology & Evolution* **24**:482-486.
- Lindenmayer, D. B., G. E. Likens, A. Andersen, D. Bowman, C. M. Bull, E. Burns, C. R. Dickman, A. A. Hoffmann, D. A. Keith, M. J. Liddell, A. J. Lowe, D. J. Metcalfe, S. R. Phinn, J. Russell-Smith, N. Thurgate, and G. M. Wardle. 2012. Value of long-term ecological studies. *Austral Ecology* **37**:745-757.
- Lovett, G. M., D. A. Burns, C. T. Driscoll, J. C. Jenkins, M. J. Mitchell, L. Rustad, J. B. Shanley, G. E. Likens, and R. Haeuber. 2007. Who needs environmental monitoring? *Frontiers in Ecology and the Environment* **5**:253-260.
- Mace, G. M. and J. E. M. Baillie. 2007. The 2010 Biodiversity Indicators: Challenges for Science and Policy. *Conservation Biology* **21**:1406-1413.
- Mace, G. M., K. Norris, and A. H. Fitter. 2011. Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship. *Trends in Ecology & Evolution* **27**:19-26.
- Montoya, J. M. and D. Raffaelli. 2010. Climate change, biotic interactions and ecosystem services. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **365**:2013-2018.
- Normander, B., G. Levin, A.-P. Auvinen, H. Bratli, O. Stabbetorp, M. Hedblom, A. Glimskär, and G. A. Gudmundsson. 2012. Indicator framework for measuring quantity and quality of biodiversity—Exemplified in the Nordic countries. *Ecological Indicators* **13**:104-116.
- Oksanen, J., F. G. Blanchet, R. Kindt, P. Legendre, P. R. Minchin, R. B. O'Hara, G. L. Simpson, P. Solymos, M. H. H. Stevens, and H. Wagner. 2012. *vegan*: Community ecology package. R package version 2.0-3.
- Parmesan, C. and G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* **421**:37-42.
- R Development Core Team. 2008. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. R Development Core Team, Vienna, Austria.
- Reyers, B., S. Polasky, H. Tallis, H. A. Mooney, and A. Larigauderie. 2012. Finding Common Ground for Biodiversity and Ecosystem Services. *BioScience* **62**:503-507.

-
- Rudd, M. A. 2011. Scientists' Opinions on the Global Status and Management of Biological Diversity. *Conservation Biology* **25**:1165-1175.
- Ruiz-Labourdette, D., M. F. Schmitz, and F. D. Pineda. 2013. Changes in tree species composition in Mediterranean mountains under climate change: Indicators for conservation planning. *Ecological Indicators* **24**:310-323.
- Schindler, D. W. 2001. The cumulative effects of climate warming and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **58**:18-29.
- Schmeller, D. S., P.-Y. Henry, R. Julliard, B. Gruber, J. Clobert, F. Dziock, S. Lengyel, P. Nowicki, E. DÉRi, E. Budrys, T. Kull, K. Tali, B. Bauch, J. Settele, C. Van Swaay, A. Kobler, V. Babij, E. V. A. Papastergiadou, and K. Henle. 2009. Advantages of Volunteer-Based Biodiversity Monitoring in Europe. *Conservation Biology* **23**:307-316.
- Schneider, K. N., R. M. Newman, V. Card, S. Weisberg, and D. L. Pereira. 2010. Timing of Walleye Spawning as an Indicator of Climate Change. *Transactions of the American Fisheries Society* **139**:1198-1210.
- Silvertown, J. 2009. A new dawn for citizen science. *Trends in Ecology & Evolution* **24**:467-471.
- Verissimo, D., D. C. MacMillan, and R. J. Smith. 2011. Toward a systematic approach for identifying conservation flagships. *Conservation Letters* **4**:1-8.
- Watson, I. and P. Novelly. 2004. Making the biodiversity monitoring system sustainable: Design issues for large-scale monitoring systems. *Austral Ecology* **29**:16-30.
- Xenopoulos, M. A., D. M. Lodge, J. Alcamo, M. Marker, K. Schulze, and D. P. Van Vuuren. 2005. Scenarios of freshwater fish extinctions from climate change and water withdrawal. *Global Change Biology* **11**:1557-1564.
- Yoccoz, N. G., J. D. Nichols, and T. Boulinier. 2001. Monitoring of biological diversity in space and time. *Trends in Ecology & Evolution* **16**:446-453.

4 Des indicateurs de biodiversité pour le Québec

Auteurs : Frédéric Boivin^{1*}, Anouk Simard^{2*}, Jason Samson¹ et Pedro Peres-Neto¹

*Ces auteurs ont contribué également.

Affiliation : ¹Université du Québec à Montréal, Chaire du Canada en modélisation spatiale et biodiversité, ²Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs

4.1 Introduction

La biodiversité est un terme qui est devenu très populaire au cours des dernières années. Énoncée par E. O. Wilson en 1988, cette expression a évolué de façon à exprimer les préoccupations planétaires associées au déclin des espèces causé par les activités anthropiques (Boutin 2010), mais aussi celles associées aux conséquences de ce déclin sur la santé humaine (Chivian and Bernsrein 2008). Cette préoccupation est d'ailleurs pleinement sentie dans le slogan pour l'année internationale de la biodiversité : « La biodiversité c'est la vie, la biodiversité c'est notre vie » (Convention of Biological Biodiversity, 2010). La biodiversité est donc représentée comme un terme générique englobant la nature dans son ensemble, représentant à la fois les gènes, les espèces et les écosystèmes, mais également les biens et services sous-jacents qu'ils produisent (Boutin 2010).

Cette définition générique de la biodiversité confère l'avantage de pouvoir formuler certaines généralités à son propos. À titre d'exemple, il est reconnu que la biodiversité est en déclin mondial, causé principalement par l'exploitation des ressources, par la perte ou la perturbation d'écosystèmes et par l'introduction de nouvelles espèces (Kumpula and Nieminen 1991, Pimm et al. 2001). Il est aussi admis que les changements climatiques (CC) deviendront vraisemblablement une des causes les plus importantes de déclin de la biodiversité au cours du présent siècle (CBD 2010, Behera and Kushwaha 2012), et que, déjà, cet effet peut être anticipé par des signes précurseurs sur certaines populations (p. ex., changements de phénologie, réduction de la reproduction chez certains organismes ; Parmesan and Yohe 2003, Parmesan 2006). De façon générale, la biodiversité est négativement affectée par une multitude de facteurs inhérents au développement des sociétés et des économies humaines, bien que, paradoxalement, elle soit aussi à la base des sociétés et de leurs économies (Kumpula and Nieminen 1991, Costanza et al. 1997, Pimm et al. 2001). On reconnaît entre autres que la biodiversité confère à la société des services de régulation (p. ex., filtration de l'air et de l'eau, pollinisation), d'approvisionnement (p. ex., fibre, nourriture, énergie) et socioculturelle (p. ex., loisir, esthétisme, spiritualité) (Balmford et al. 2005, Cardinale et al. 2012).

L'aspect englobant du terme biodiversité, bien qu'utile pour visualiser l'ampleur des menaces et des enjeux, a toutefois le désavantage de masquer, en partie, la complexité associée à ce terme. En effet, toutes les composantes de la biodiversité ne réagiront pas de la même façon aux perturbations anthropiques. Afin de comprendre les mécanismes sous-jacents à ces complexes changements de biodiversité, il faut savoir identifier quels aspects de la biodiversité sont impliqués et de quelle façon, et quelles en seront les répercussions sur les autres composantes du système. Ces questions sont essentielles dans la perspective où l'on souhaite identifier des

solutions et mesurer leur efficacité. Cela signifie qu'il faut pouvoir définir le terme générique « biodiversité » dans une unité concrète et mesurable (Boutin 2010). La valeur des différentes composantes de la biodiversité sur le bien-être des sociétés et de l'économie aurait aussi avantage à être définie afin de pouvoir les intégrer dans les modèles de développement (Balmford et al. 2005, Cardinale et al. 2012).

Afin de comprendre les mécanismes associés au déclin de la biodiversité et les répercussions potentielles pour les sociétés, il est suggéré d'instaurer des suivis de la biodiversité (p. ex., Mace and Baillie 2007, Federal, Provincial and Territorial Governments of Canada 2010, Lindenmayer et al. 2012) et ce, à différentes échelles (p. ex., mondiaux et régionaux; Amano et al. 2010). Les suivis de la biodiversité permettraient, entre autres, de combler des lacunes dans nos connaissances, d'estimer les changements de biodiversité (Green et al. 2005), de formuler des actions de conservation en fonction de leur efficacité (Barrett and Gray 2011) et de détecter la détérioration des écosystèmes et les seuils causant la disparition de services écologiques (Scheffer et al. 2001, Vačkář et al. 2012). Dans un contexte de CC, un suivi de la biodiversité permettrait de quantifier comment les variations climatiques affectent les différentes composantes de la biodiversité (Grosbois et al. 2008, Bellard et al. 2012).

Toutefois, concevoir un suivi de la biodiversité est un défi de taille. Une des principales difficultés de ce défi réside dans le caractère générique du concept de biodiversité. En effet, presque toutes les variables écologiques pourraient être considérées soit comme un indicateur, soit comme une composante de la biodiversité (Boutin 2010). En contrepartie, il ne sera jamais possible de mesurer toutes les composantes de la biodiversité. Il est suggéré que la décision des indicateurs ou composantes de la biodiversité à suivre devrait être déterminée majoritairement par les objectifs du programme de suivi, le « pourquoi » du programme (Yoccoz et al. 2001). Si l'objectif ou la question est simple, le choix des indicateurs s'avérera plutôt évident. Par contre, si l'on fait face à une question plus générale, tel que « Comment la biodiversité change dans le temps et l'espace en réponse à l'activité humaine? » ou « en réponse aux CC? », il devient difficile de cibler les paramètres à suivre, car la majeure partie des composantes de la biodiversité risquent tôt ou tard de changer (Haughland et al. 2010). Si certains ont avancé différents critères devant permettre de choisir lesquelles des composantes de la biodiversité devraient être suivies (McDonald-Madden et al. 2010), d'autres stipulent que la réalité n'est pas si simple et que les connaissances limitées restreignent souvent la capacité à faire des choix éclairés (Geupel et al. 2011). Il apparaît d'ailleurs que la plupart des suivis déjà établis seraient biaisés en fonction des groupes taxonomiques les plus connus tels que les plantes, les mammifères et les oiseaux (Thuiller et al. 2011), et particulièrement pour les espèces charismatiques ou importantes économiquement (Dobson 2005, Normander et al. 2012). Pourtant, la vaste majorité de la biodiversité en terme de richesse en espèces, de divergence évolutive, de biomasse et de fonctions écosystémiques est associée aux espèces cryptiques, telles que les microorganismes et les insectes (McMahon et al. 2011).

Dans la perspective que le gouvernement du Québec souhaite mettre en place un programme de suivi de la biodiversité en fonction des CC, il est essentiel d'approfondir davantage les aspects inhérents aux choix des indicateurs. Par indicateurs, nous entendons tous aspects de la biodiversité pouvant être mesurés et reflétant des changements actuels ou futurs tant au niveau des individus, des populations, des espèces, des communautés, des écosystèmes ou des services écologiques. Les éléments qui seront développés dans les prochaines sections visent à identifier 1) les caractéristiques d'un bon indicateur pour suivre la biodiversité, 2) les types d'indicateurs

de biodiversité, et 3) les indicateurs de CC associés aux écosystèmes présents sur le territoire québécois. Nous incluons également (5) un résumé des suivis de biodiversité déjà existants au Québec, (6) les résultats des différentes initiatives de consultations prises pour identifier les indicateurs les plus pertinents pour le Québec (sondage et atelier consultatif), afin de conclure avec (7) une liste suggérée d'indicateurs à suivre dans le cadre d'un programme de suivi de la biodiversité dans un contexte de CC.

4.2 Facteurs déterminant pour le choix d'un indicateur

Un suivi consiste à effectuer une répétition de mesures dans le temps et, avec l'interprétation des résultats, d'en évaluer les changements (Green et al. 2005). Traditionnellement en écologie, les suivis ont été associés à l'échantillonnage d'un nombre limité de sites à l'échelle locale visant à évaluer l'effet d'un facteur de stress ciblé, tel un polluant ou une perturbation spécifique sur un nombre restreint d'organismes (p. ex. les macro-invertébrés benthiques, les oiseaux, ou les algues) (Baird and Hajibabae 2012). De telles études se caractérisent généralement par le traitement et l'énumération des unités taxonomiques échantillonnées, ce qui peut nécessiter une période de temps considérable, générant des données de précision faible et non validées et avec peu de consistances dans l'application des méthodes d'observations dans les différents types d'écosystèmes (Baird and Hajibabae 2012). Avec un tel portrait, il n'est pas surprenant que les suivis soient souvent considérés comme une science incertaine et qu'ils soient critiqués pour leurs manques de rigueur et d'efficacité (Lovett et al. 2007). Néanmoins, s'ils sont bien conçus, les suivis ont la capacité de jouer un rôle important dans la conservation de la biodiversité en permettant de détecter les tendances de la santé des écosystèmes (Nielsen et al. 2009, Barrett and Gray 2011). Le succès des suivis repose entre autres sur le choix des indicateurs (Hagan and Whitman 2006). Bien que ce choix soit loin d'être simple, un certain nombre de facteurs peut aider à bien diriger ces choix.

4.2.1 L'indicateur doit répondre à un objectif donné

Les suivis basés sur des objectives de recherche tentent généralement d'expliquer les changements survenant à l'intérieur d'un système. En comparaison, les suivis basés sur des objectifs de gestion cherchent plutôt à évaluer la résultante des changements sur ce système en y intégrant des variables associées à certains outils d'aménagement (p. ex. taux de prélèvement, disponibilité d'habitat) (Yoccoz et al. 2001). Ces deux approches nécessitent que l'on mesure des indicateurs sur l'état d'un système, mais également certains paramètres de changements (Yoccoz et al. 2001, Nichols and Williams 2006). Les compromis quant au choix et nombre d'indicateurs sélectionnés ne seront cependant pas nécessairement les mêmes si l'objectif vise à identifier les changements ou bien à les expliquer, mais il n'est pas rare qu'on souhaite répondre à ces deux aspects conjointement (Nichols and Williams 2006).

Plusieurs principes fondamentaux doivent être définis préalablement à l'élaboration d'un suivi, car ils dirigeront le choix des indicateurs en fonction de besoins ou d'avantages spécifiques. Il est d'abord nécessaire de définir si l'on vise les trois niveaux de diversité biologique, soit les gènes, les espèces ou les écosystèmes et si l'on souhaite surtout mesurer des éléments associés à la composition ou au fonctionnement. Les mesures de composition incluent des indicateurs de diversité spécifique pour certains groupes ou taxons, mais également des paramètres démographiques tels l'abondance de certaines espèces ou population. En contrepartie, lorsque l'objectif est d'évaluer la fonctionnalité des écosystèmes, on s'intéresse plutôt à des indicateurs

de processus écologiques dynamiques, de résiliences écosystémiques ou d'interactions trophiques dans les communautés. Étant donné que les objectifs de suivi visent fréquemment autant la composition et le fonctionnement des écosystèmes, il est aussi possible d'identifier certains indicateurs de composition directement associés au fonctionnement des écosystèmes (p. ex. la diversité des pollinisateurs ou décomposeurs). Davantage de détails quant aux types d'indicateurs seront donnés dans la section 4.3, mais il convient de spécifier de prime abord que les objectifs sous-jacents au programme de suivi sont essentiels afin d'effectuer un choix éclairé et que, souvent, plus d'une sorte d'indicateurs sont nécessaires pour répondre à certains objectifs.

Lorsque les suivis visent à améliorer ou à valoriser la gestion de la biodiversité, il est souvent pertinent que l'on cherche à incorporer des indicateurs qui puissent être reliés aux besoins ou valeurs de différentes parties afin de posséder différents leviers utiles à la conservation. Un suivi qui saurait répondre aux préoccupations de plusieurs parties prenantes aurait de meilleures chances de pérennités (Boutin et al. 2009). Par exemple, des données sur des espèces charismatiques sensibiliseront davantage le public (p. ex. orchidées), des indicateurs avec une importance économique (p. ex. croissance des arbres) rejoindront la classe politique et certains milieux d'affaires, alors que les espèces menacées vulnérables serviront aux enjeux importants de conservation (Caro and O'Doherty 1999, Bowen-Jones and Entwistle 2002). De plus en plus d'intérêt est porté aux indicateurs de services écologiques, car ils donnent un poids à certaines espèces ou paramètres écologiques en fonction de leur rôle dans les écosystèmes (Boutin et al. 2009). Afin de bien clarifier le choix des indicateurs en fonction de leurs attributs et de leur rôle potentiel, Caro et O'Doherty (1999) ont identifié différentes catégories. **Les indicateurs de santé des écosystèmes** impliquent des petits organismes avec un temps de génération court dont les traits d'histoire de vie sont directement dépendants de certaines conditions environnementales (p. ex., macro-invertébrés benthiques). Les espèces sensibles aux changements et en interaction directe avec d'autres espèces (p. ex. proie, prédateur, parasite, pollinisateur) permettent de suivre les tendances de plusieurs composantes d'une communauté et servent d'**indicateur de population**. Un **indicateur de diversité biologique** réfère à un groupe taxonomique réparti sur un grand territoire géographique et dont la diversité est représentative de la diversité d'autres taxons (p. ex. carabidés). Les **espèces ombrelles**, généralement une espèce à large domaine vital, sert à indiquer que des attributs spatiaux, structurels ou de composition sont présents sur un territoire assurant la présence d'autres espèces aux besoins similaires (p. ex. caribou des bois dont la présence indique un milieu où la fragmentation est faible). En comparaison, **une espèce phare** est une espèce populaire ou charismatique, sensible aux facteurs anthropiques, et qui stimule des actions de la conservation (p. ex. ours polaire). **Une espèce clé de voûte** joue un rôle prépondérant dans un système relativement à son abondance (p. ex. castor). Il existe plusieurs autres catégories d'indicateurs qui pourraient être associées à un objectif de gestion particulier, dont certains paramètres d'écosystème, l'important étant avant tout de comprendre que certaines spécificités propres à un indicateur doivent être considérées en fonction de l'objectif qu'il doit servir.

L'utilisation d'indicateurs pour substituer certains aspects de la biodiversité doit par contre être faite avec prudence. Par exemple, les indicateurs de diversité biologiques dont la diversité est sensée représenter d'autres espèces ou paramètres d'écosystèmes peuvent parfois présenter un portrait bien partiel de la biodiversité (p. ex., Simberloff 1998). Similairement, lorsque l'on utilise des variables associées à un filtre brut (p. ex. l'abondance ou qualité d'habitat) pour suivre la biodiversité, il se peut que l'on traduise mal les effets de ces changements au niveau des écosystèmes. Par exemple, les processus et les services associés à un écosystème peuvent être

conservés même si plusieurs des espèces sont remplacées ou perdues (Duro et al. 2007). Il est souhaitable d'avoir plus d'un indicateur pour suivre adéquatement la biodiversité, mais comme le nombre choisi influence directement la complexité du suivi, il devient essentiel de balancer les coûts et bénéfices associés à l'ajout d'indicateurs (Nielsen et al. 2009).

4.2.2 *L'indicateur doit apporter une puissance statistique suffisante*

L'objectif de la majorité des programmes de suivi est de détecter les changements de biodiversité en fonction des perturbations anthropiques (Balmford et al. 2005, Boutin et al. 2009). Il est donc essentiel de s'intéresser à la capacité de détection d'un indicateur ou plus spécifiquement à sa puissance statistique. Bien que souvent omis (Legg and Nagy 2006), cet aspect est crucial afin d'éviter de faire une erreur de type II (faux négatif) qui aurait un impact désastreux sur des décisions de conservation (Field et al. 2004). Les erreurs de type I (faux positif) semblent d'ailleurs plus rares, car la puissance de détection est rarement suffisante (Field et al. 2004). La puissance d'un indicateur augmente avec le nombre de sites et la fréquence de l'échantillonnage, il faut donc considérer la portée spatiale et temporelle à laquelle un indicateur peut être suivi (Field et al. 2004, Boutin et al. 2009, Nielsen et al. 2009), mais aussi la variance associée à cette mesure (Field et al. 2004). Des indicateurs qui ont une répartition locale ou inégale et ne peuvent être ré-échantillonnés fréquemment, à cause de contraintes biologiques ou logistiques, seront moins puissants.

La résolution spatiale à laquelle un indicateur est suivi est déterminante par rapport à la précision des réponses que l'on peut en tirer (Bellard et al. 2012). Par exemple, la persistance de l'habitat nécessaire à la survie d'un organisme dans le temps en fonction des CC peut sembler improbable lorsque des simulations sont effectuées à une échelle grossière (p. ex., Europe entière, grille 10 x 10'). Cependant, ce même habitat peut sembler persister lorsque les analyses sont effectuées à une échelle fine (grille 25 x 25 m) (Randin et al. 2009). Dans ce cas, l'échelle grossière ne réussit pas à traduire adéquatement l'hétérogénéité et la diversité de certaines composantes environnementales (p. ex., habitats alpins). Les indicateurs à grande échelle (indice satellitaire) peuvent néanmoins s'avérer intéressants, car ils englobent plusieurs paramètres de biodiversité et peuvent être utilisés pour étudier les régions éloignées où l'échantillonnage est coûteux (p. ex., le Nord québécois; Barrett and Gray 2011). En contrepartie, ces indicateurs engendrent peu de connaissances sur les causes des changements affectant certains groupes d'espèces (Thuiller 2003), car plusieurs phénomènes sont seulement observables *in situ* (Barrett and Gray 2011). De ce fait, étant donné les avantages et inconvénients de chaque type d'indicateurs, il est suggéré d'identifier, en plus des indicateurs à l'échelle des sites, des indicateurs de biodiversité applicables à une échelle de 100 à 1000 km² sur plusieurs décennies de façon à capter les effets à larges échelles des changements globaux (Boutin et al. 2009, Haughland et al. 2010).

La résolution temporelle d'un indicateur est tout aussi déterminante que sa résolution spatiale, surtout que ces deux aspects sont généralement liés (c.-à-d., les événements se produisant à larges échelles spatiales peuvent être captés par un pas de temps plus long). La résolution spatiale idéale pour un indicateur (c.-à-d., la durée minimale de la prise de mesure et l'intervalle d'échantillonnage) dépend de multiples facteurs. Entre autres, cela est fonction de la variabilité temporelle naturelle, du temps de génération, de la variabilité spatiale, du patron d'occurrence ou de détection, et de la sensibilité de l'indicateur au facteur de changement (Field et al. 2005). De manière générale, pour détecter adéquatement la présence de tendances dans le temps on suggère

d'avoir une série temporelle d'au moins 20 ans, bien qu'une série de 10 ans puisse aussi être suffisante, mais au désavantage d'augmenter les risques d'erreur de type II (Dixon and Pechmann 2005). Il n'en demeure pas moins que les suivis sur de plus longues périodes sont généralement plus avantageux (Nielsen et al. 2009). Pour assurer une bonne puissance de détection, la fréquence de l'échantillonnage doit également être prise en compte (Balmford et al. 2005). D'ailleurs, on peut parfois contrebalancer une faible puissance statistique due à une faible couverture spatiale d'un indicateur en mesurant celui-ci plus fréquemment à un même site (revu dans Boutin et al. 2009). Il faut choisir adéquatement la fréquence du suivi d'un indicateur de façon à contrer l'effet de variations stochastique qui pourrait biaiser les patrons observés, mais aussi en fonction de spécificités propres à l'indicateur quant à sa variabilité temporelle, au patron de cyclicité ou de saisonnalité. La durée et la fréquence temporelle associées au suivi d'un indicateur sont plus souvent considérées dans la perspective présente ou future du suivi, mais elles sont tout aussi pertinentes dans un contexte historique. Les données de référence avec lesquelles on peut comparer les données récentes ne sont pas à négliger, car si les points de comparaison dans le temps sont biaisés, il se produit ce qu'on appelle un syndrome du changement dans l'état de référence (Baird and Hajibabae 2012). Par exemple, si la majorité des indicateurs choisis pour suivre les changements de la biodiversité dans un contexte de CC ne sont suivis qu'à partir de l'an 2013, sans aucune donnée de référence passée, il serait difficile de statuer sur ce qu'on devrait qualifier de valeur de base. Il est donc parfois nécessaire de considérer l'utilisation d'un indicateur « imparfait », mais pour lequel on possède une grande quantité et qualité de données historiques.

Le même compromis entre la puissance statistique et la complexité d'un programme touche le nombre de variables mesurées pour décrire un paramètre de biodiversité. En effet, la puissance statistique associée à la détection d'un changement au niveau d'un élément de biodiversité peut être accrue en ciblant plusieurs indicateurs associés à cet élément. Par exemple, la diversité des oiseaux forestiers peut être suivi en estimant leur richesse spécifique par l'écoute de leur chant, mais un portrait plus précis pour modéliser les tendances futures pourrait être obtenu en ajoutant des mesures associées à la phénologie reproductive, au taux de survis, au succès de nidification ou à la condition corporelle de différentes espèces. De plus, certains indicateurs peuvent répondre plus ou moins rapidement ou radicalement aux changements environnementaux (p. ex. phénologie réponse rapide, mais lien indirect et incertain avec l'avenir des communautés; démographie réponse lente, mais lien direct avec l'avenir des communautés). Ainsi, une association de certains indicateurs peut produire un signal très fort de changements (Maes and Dyck 2005). Malgré l'intérêt de multiplier les mesures pour augmenter la force du signal, il faut restreindre leur nombre au strict nécessaire pour répondre aux objectifs du suivi. Un enjeu des programmes de surveillance impliquant un grand nombre de variables est justement qu'il est difficile d'optimiser l'échantillonnage pour tous les indicateurs. Bien que certains proposent d'alterner entre l'échantillonnage exhaustif et intensif (beaucoup de sites en surface et quelques sites en détail) (di Castri et al. 1992), d'autres suggèrent qu'il est plus adéquat d'avoir une approche systématique ou aléatoire, mais de minimiser et bien comprendre les limites associées à un dispositif pour en solidifier l'inférence (Nielsen et al. 2009).

D'autres caractéristiques des indicateurs sont aussi susceptibles d'influencer leur puissance, c'est le cas notamment de la méthode d'échantillonnage et d'analyse, le biais (déviations systématiques de la valeur réelle) et la précision (le degré auquel des mesures d'un élément inchangé donne des valeurs identiques) des mesures, l'effectif et la variance (Field et al. 2004, Legg and Nagy 2006). Par exemple, les méthodes d'échantillonnage qualitatives ou semi-quantitatives, telles que les

données de présence-absence, de qualité d'habitat et les estimés relatifs (p. ex., densité ou condition d'une population), peuvent contribuer à augmenter la variabilité des données (Legg and Nagy 2006). Pour réduire le risque associé aux erreurs de mesure, on suggère de sélectionner des indicateurs qui ont un haut rapport signal sur bruit et d'effectuer l'échantillonnage dans une même fenêtre saisonnière, par du personnel qualifié et en utilisant des méthodes standardisées (Seavy and Reynolds 2007). Néanmoins, lorsqu'il existe des inquiétudes face à la précision ou l'exactitude d'un indicateur, il vaut mieux considérer son remplacement dans les programmes de suivi que de se contenter de données non représentatives (Balmford et al. 2005). Malheureusement, la précision des données relativement à un indicateur n'est pas toujours adéquatement quantifiée. Par exemple, certains indicateurs incorporent un biais lorsqu'on omet de considérer la variabilité de détection entre les espèces dans le temps (Buckland et al. 2012). Plus le taux de détection associé à un indicateur est faible et plus il sera nécessaire de visiter le site souvent (Mackenzie and Royle 2005). Les méthodes d'échantillonnages devraient aussi être définies en tenant compte des contraintes logistiques associées au temps et aux ressources disponibles (Balmford et al. 2005). Par exemple, les erreurs d'échantillonnage sont plus probables lorsque les suivis sont basés sur des initiatives citoyennes (p. ex., suivis des oiseaux nicheurs), mais ce désavantage peut être compensé par la capacité d'avoir des données sur une grande échelle spatiale et temporelle, de diminuer considérablement le coût de suivi et par le fait que de tels programmes valorisent et stimulent l'implication citoyenne à la conservation. Une option adéquate pour ce genre de suivi serait de simplifier les méthodes d'échantillonnage à effectuer de façon à minimiser les sources de biais ou d'imprécision.

4.2.3 L'indicateur doit être associé à des facteurs de stress spécifiques

Certains auteurs soutiennent qu'il ne faut pas seulement choisir des indicateurs dont les facteurs de stress sont connus, car, étant donné que nos connaissances des effets des facteurs de stress sur la biodiversité sont incomplètes, des effets importants, mais inattendus peuvent ainsi être découverts (Balmford et al. 2005, Boutin et al. 2009). Cependant, bien que certains programmes historiques aient permis de détecter des événements non anticipés (p. ex., déclin des oiseaux associé aux fermes), les enjeux de conservation actuels sont si importants et les ressources si limitées, qu'il serait injustifié de choisir des indicateurs pour lesquels aucun changement n'est attendu (Nichols and Williams 2006). De cette façon, les effets non anticipés seraient seulement un sous-produit (Nichols and Williams 2006).

C'est pourquoi les suivis biologiques utilisent habituellement des indicateurs permettant de déterminer directement l'effet d'un facteur de stress (perturbation) sur la biodiversité, et ce, soit en comparant des sites intacts et perturbés ou en comparant des sites le long d'un gradient de perturbation. Cette approche sert à isoler les effets d'un facteur de stress et à faciliter l'attribution des causes aux effets observés (Boutin et al. 2009). Or, plus récemment, on a cherché à identifier des approches ou des indicateurs de suivi environnementaux qui permettraient de séparer l'effet spécifique de différents facteurs de stress concomitants (Nichols and Williams 2006). Un tel suivi multi-stress, surnommé « suivi de surveillance », doit pouvoir prendre en compte des effets cumulatifs et évaluer les synergies entre les facteurs de stress (Nichols and Williams 2006). Cependant, certains considèrent que la distribution des organismes est à ce point complexe (p. ex., liens directs et indirects avec ou sans synergies), qu'il serait surprenant d'arriver à identifier autre chose qu'une tendance binaire qualitative (p. ex. dégradation vs amélioration) avec un programme de suivi multi-stress passif (Lindenmayer and Likens 2010). Pour espérer arriver à de meilleurs résultats lorsque plusieurs facteurs de stress sont susceptibles d'interagir (p. ex.,

déforestation riveraine, construction de routes, dépôt de nutriments et CC), il est nécessaire de bien connaître la sensibilité des indicateurs aux différents facteurs de stress (Baird and Hajibabae 2012), mais de telles connaissances détaillées existent rarement. Ainsi, afin de détecter une vaste gamme d'effets écologiques, il est donc nécessaire d'avoir une large gamme d'indicateurs, chacun ayant une vulnérabilité différente face aux différents facteurs, afin de corrélérer les changements des différents indicateurs aux différents facteurs de stress.

4.2.4 L'indicateur doit pouvoir servir aux processus de prise de décision

Lorsqu'on instaure un programme de suivi avec des objectifs liés à la conservation de la biodiversité, il est essentiel de considérer la façon dont les indicateurs choisis pourront être utilisés pour la gestion, et cela peut aussi être le cas dans un suivi scientifique. Les indicateurs qui permettent d'améliorer les décisions de gestion sont ceux qui informent sur l'état d'un système dans son contexte d'aménagement. Ces indicateurs mesurent l'effet des actions de gestion sur la biodiversité et peuvent permettre d'améliorer celles-ci (Balmford et al. 2005, McDonald-Madden et al. 2010). Par exemple dans un contexte de CC certaines stratégies de gestion sont possibles et pourraient orienter le choix de certains indicateurs : 1) améliorer la connectivité du territoire pour faciliter la migration entre les habitats favorables, 2) éviter la gestion centrée sur l'espèce en tenant compte des interactions entre espèces et d'autres aspects fonctionnels de la biodiversité, 3) favoriser le maintien d'habitats à haute valeur écologique, 4) améliorer la représentativité des zones protégées et élargir leur zone tampon (Heller and Zavaleta 2009, Bellard et al. 2012). En intégrant dans le choix des indicateurs des considérations liées à la sensibilité des espèces et aux interventions de gestion possibles pour leur maintien, on obtient un cadre plus efficace pour la conservation. Lorsqu'un programme de suivi n'établit pas au départ ce lien clair avec les prises de décision, il peut être difficile d'intégrer après coup les résultats dans l'aménagement et la gestion (Barrett and Gray 2011).

Pour que les indicateurs de biodiversité puissent être utilisables dans le processus de décision, il est aussi suggéré de standardiser les protocoles de suivi (en incluant les postulats et les incertitudes) et le design d'échantillonnage entre les différentes régions afin de pouvoir évaluer les mesures de gestion à plus grande échelle (Balmford et al. 2005, Boutin et al. 2009). L'avantage d'une telle standardisation est qu'elle permet à différents groupes de participer au suivi (p. ex., agences gouvernementales, industries, groupes environnementaux; Boutin et al. 2009). De plus, pour qu'un indicateur serve au processus de décision, il faut ultimement que celui-ci soit rapporté de façon claire aux gestionnaires et décideurs. Cette étape est souvent beaucoup plus complexe que l'on pense et demande un effort considérable (Boutin et al. 2009).

Malheureusement, les décisions stratégiques sont souvent basées sur un nombre très limité de données, ce qui peut biaiser ou restreindre l'élaboration de certaines politiques. Par exemple, à l'heure actuelle, la majorité des décisions de conservation sont prises en ne considérant qu'une seule espèce et en faisant abstraction des interactions entre les organismes et des processus et services écosystémiques (Baird and Hajibabae 2012). S'il est essentiel de bien réfléchir aux implications qui découleront des indicateurs sélectionnés dans un suivi, cela est aussi vrai pour ceux qui sont écartés ou non-considérés, car l'« on gère ce que l'on mesure » (revu par Boutin et al. 2009). Également, les ressources qui ne peuvent être traduites dans un système de mesures accepté sont généralement marginalisées dans les processus de décision et, parallèlement, ils soulèveront peu de préoccupations même si leur développement n'est pas viable (Boutin et al. 2009). Les indicateurs qui ne connectent pas directement avec le bien-être humain sont peu susceptibles de susciter l'intérêt du gouvernement, du monde des affaires, et du public tant que

leur valeur n'est pas clairement démontrée (Balmford et al. 2005). Ainsi, au Canada, il est présentement estimé que le suivi de la biodiversité forestière n'est pas suffisamment développé pour produire des indicateurs rigoureux permettant une gestion efficace de la ressource (Boutin et al. 2009). Selon Balmford et al. (2005), même le suivi conçu par le CDB (*Convention on Biological Diversity*) serait incomplet dans le nombre de taxons et de biomes considérés. Plus fondamentalement, notre compréhension des mécanismes liant la biodiversité au processus services écosystémiques et aux des décisions et actions humaines est trop superficielle pour éclairer convenablement nos actions (Balmford et al. 2005, Behera and Kushwaha 2012). Entre autres, la majorité des services écosystémiques nécessaires à nos sociétés (p. ex., maintien de la fertilité des sols et la qualité de l'eau potable) dépendent d'un réseau complexe d'interactions impliquant autant des vertébrés que des micro-organismes (Behera and Kushwaha 2012). Cependant, les suivis actuels sont presque exclusivement consacrés aux vertébrés et aux espèces charismatiques, alors que les micro-organismes sont essentiellement exclus de tous suivis. Or, il incombe de développer des approches consistantes au maintien de tous les aspects qui composent la biodiversité (Baird and Hajibabae 2012).

4.2.5 Le choix des indicateurs doit tenir compte du rapport coûts-bénéfices

Une des principales limites à l'établissement d'un programme de suivi est un financement inadéquat (Kallimanis et al. 2012). Il faut mettre en perspective que les programmes de suivi de la biodiversité à grande échelle sont généralement très coûteux, car ceux-ci nécessitent de concevoir, collecter, entreposer, analyser, synthétiser et communiquer une très grande quantité de données (Green et al. 2005). Dans ce tableau, les indicateurs choisis ont un impact majeur sur le coût du suivi. Par exemple, certains indicateurs s'appuyant sur des groupes dont la taxonomie est difficile nécessitent le savoir-faire d'experts aux honoraires élevés (Kallimanis et al. 2012). De plus, la fréquence d'échantillonnage requis pour un indicateur est un facteur pouvant fortement influencer son coût; il sera coûteux de mesurer un indicateur sur une fréquence annuelle (ou plus), mais une telle fréquence peut s'avérer nécessaire dans le cas d'un système d'alerte hâtif (Yoccoz et al. 2001, Nichols and Williams 2006).

Afin de contenir les coûts du suivi, il faut donc faire des compromis dans le choix des indicateurs tout en s'assurant de conserver une crédibilité scientifique et de produire de l'information pertinente aux différentes parties (Kallimanis et al. 2012). À cet effet, il faut noter que la puissance statistique d'un indicateur pour détecter l'effet d'une perturbation augmente de façon asymptotique avec l'intensité de l'échantillonnage (c.-à-d., elle atteint un plateau) alors que les coûts augmentent linéairement (Nielsen et al. 2009). Ainsi, passé un certain stade, une augmentation de l'intensité d'échantillonnage (p. ex., mesurer un indicateur à plus de sites ou à une fréquence plus élevée) ne va entraîner qu'une augmentation marginale de la puissance statistique par rapport à l'accroissement des coûts. Il faut également noter que la relation entre l'intensité de l'échantillonnage et la puissance d'un indicateur variera en fonction de la sensibilité de l'indicateur face à la perturbation étudiée. Les indicateurs permettant un lien direct avec la gestion peuvent également engendrer des économies à long terme (Nichols and Williams 2006). En effet, si les programmes de surveillance visent seulement à détecter des déclin sans en identifier les causes et solutions potentielles, de nouvelles recherches seront nécessaires à postériori afin de les identifier, entraînant ainsi des coûts supplémentaires.

4.2.6 *Le choix d'un indicateur doit tenir compte de plusieurs aspects, balançant avantages et désavantages*

Nous avons énoncées plusieurs aspects à considérer afin de choisir les indicateurs de façon éclairée et balançant les forces et les faiblesses de chacun. Le Tableau 4.1 fait état des principaux points qu'il faut retenir dans le processus de choix des indicateurs.

Tableau 4.1. Résumé des caractéristiques désirées chez les indicateurs. Tiré de Atkinson et al. (2004).

Appropriés à la gestion
<ul style="list-style-type: none"> * Appropriés aux buts et objectifs du programme * Appropriés au processus de gestion * Échelle spatiale appropriée * Échelle temporelle appropriée
Défendables scientifiquement
<ul style="list-style-type: none"> * Pertinents du point de vue biologique, reflètent le statut et la dynamique du système sous gestion * Appuyés sur des bases scientifiques suffisantes, supportées par des études scientifiques publiées ou des modèles conceptuels
Valables statistiquement et interprétables
<ul style="list-style-type: none"> * Directement reliés aux composantes de l'écosystème qu'ils doivent représenter ou sont un substitut acceptable * Sensibles aux changements dans les composantes de l'écosystème qu'ils représentent * Indiquent les causes d'un changement aussi bien que l'existence du changement * Appropriés à la période (cédule) de gestion * Permettent d'anticiper, servent de signal d'alarme d'un changement * Répondent selon le niveau adéquat de stress, c'est-à-dire qu'ils fournissent une évaluation en continu sur une vaste gamme de stress ou complètent d'autres variables de surveillance pour atteindre le niveau nécessaire * Ayant des propriétés statistiques connues, avec des fondements, références ou limites disponibles
Mesurables et réalisables
<ul style="list-style-type: none"> * Réalisables techniquement; mesurables selon des méthodologies standards * Exactes et précises, avec une faible variabilité ou biais liés à l'observateur * Efficaces en termes de coûts * Ayant un faible impact sur le système sous surveillance * Présentant un faible risque pour le personnel sur le terrain
Coordonnées avec les programmes et séries de données existants
<ul style="list-style-type: none"> * Compatibles avec les collectes de données des programmes de surveillance existants ou peuvent être modifiés pour l'être * Si des données préalables existent, elles sont disponibles, préférablement sur une longue

période
Facilement compréhensibles
<ul style="list-style-type: none">* Simples, directs* Faciles à communiquer, à interpréter et à expliquer* Documentés; supportés au point de vue méthodologique par des procédures standards

4.3 Quatre étapes pour sélectionner des indicateurs

Avoir identifié des critères importants dans le choix des indicateurs ne garantit pas que le processus de décision sera facile et évident; certains compromis pouvant même être douloureux. Afin de faciliter ce processus, nous résumerons les principales étapes énoncées par Hagan et Whitman (2006) qui visent à faciliter le choix des indicateurs en standardisant la démarche et qui résument une partie des critères exposés précédemment.

Première étape : Subdiviser la biodiversité en différents paramètres représentatifs de son ensemble et qui permettraient de répondre aux préoccupations de différents groupes (chercheurs, agences gouvernementales, industries, public).

La biodiversité peut être divisée en 5 à 15 paramètres qui représentent l'ensemble des valeurs et qui seraient pertinents pour la gestion ou la conservation. Dans le cas des écosystèmes forestiers, Hagan and Whitman (2006) présentent quelques exemples tels que 1) la structure de la forêt, 2-3) les habitats de débuts et de fin de succession, 4) l'étendu des variations naturelles, 5) les habitats aquatiques et riverains, 6-7) les espèces de vertébrés identifiées comme ressources (gibier, poisons, fourrure) ou pour les loisirs (observation), 8) la richesse spécifique, 9) la diversité d'habitats, 10) les fonctions écosystémiques, 11) le cycle du carbone, 12) les espèces et habitats rares, et 13) les pestes forestières. Il faut faire attention de ne pas diviser la biodiversité en trop de composantes, car le choix des indicateurs associés sera demandant, néanmoins il ne faut pas négliger des aspects importants, car certains acteurs du milieu pourraient se sentir floués et remettre en question le suivi. Il est important de consulter différents groupes afin d'identifier ces aspects.

Deuxième étape : Pour chaque composante de la biodiversité, il incombe d'identifier des indicateurs associés à l'état et au processus des écosystèmes et également des indicateurs facilitant la prise de décision en gestion et conservation.

Tel que mentionné précédemment, il est important que les indicateurs choisis permettent d'identifier comment différents facteurs de stress agissent sur un système et ainsi comment il serait possible d'y remédier. Un indicateur d'état ou de condition décrit le statut ou la condition actuelle d'une ressource ou d'un aspect de la biodiversité. Un indicateur de processus ou de pression informe sur un phénomène, positif ou négatif qui affecte l'état d'une ressource. Un indicateur de prise de décision pourra être utilisé dans une stratégie de gestion ou de

conservation afin d'identifier ou de soutenir des politiques qui permettraient de maintenir ou d'améliorer la condition d'une ressource.

Troisième étape. Évaluer chaque indicateur par rapport à son mérite scientifique, sa niche écologique étendue, son utilité, ses aspects pratiques, et sa pertinence pour différents acteurs du milieu.

Le mérite scientifique d'un indicateur est fonction de sa puissance statistique, mais aussi de la solidité de la relation qui a été établie entre cet indicateur et la composante de la biodiversité d'intérêt. Un indicateur a une niche écologique étendue lorsque celui-ci est corrélé avec plusieurs autres composantes de la biodiversité qui ne sont pas mesurées permettant ainsi de réduire le nombre d'indicateurs nécessaires pour évaluer les changements dans la biodiversité. Les aspects pratiques d'un indicateur réfèrent au coût de l'échantillonnage, au besoin technique et à l'expertise nécessaire lors de l'échantillonnage et des analyses et à la disponibilité de données existantes. Ces aspects sont cruciaux dans un contexte budgétaire restreint. Un indicateur est utile lorsqu'il sert au processus de décision pour la gestion, la conservation ou pour d'autres aspects plus politiques ou économiques tels que la gestion du territoire. Un indicateur est pertinent lorsqu'il représente les valeurs de différentes parties prenantes face à la biodiversité et qu'il permet d'évaluer si ces aspects sont sur la voie de la durabilité.

Quatrième étape. Choisir les indicateurs qui répondent le mieux à un ensemble de critères.

Les concepts précédents aident à saisir l'aspect multidimensionnel associé aux indicateurs et à les comparer afin d'effectuer une sélection structurée, logique et transparente. Les indicateurs choisis devraient clairement être liés aux valeurs des acteurs du milieu et évalués de façon à ce que les meilleurs indicateurs soient choisis et utilisés. Une série de principes additionnels énoncés dans la Boîte 4.1 peuvent d'ailleurs être considérés afin de s'assurer que la démarche du choix des indicateurs répond bien aux attentes des différentes parties prenantes (selon Hagan and Whitman 2006).

Boîte 4.1 :

1. Établir un cadre décisionnel avant de sélectionner des indicateurs afin de s'assurer qu'ils répondent aux besoins pour lesquels ils ont été identifiés. Un tel cadre devrait répondre à des questions telles que : Quelles sont les ressources disponibles? Qui va mesurer les indicateurs ? À quelle fréquence et à qui rapporter l'information? Qui inclure dans le processus de décision? Quelles actions sont associées aux indicateurs? Même si certaines de ces questions sont très difficiles à répondre à priori, il peut s'avérer contreproductif de ne pas les considérer.
2. Préciser le rôle de chaque partie prenante dans la sélection des indicateurs : les différents acteurs du milieu peuvent identifier la valeur de certaines composantes de la biodiversité pour eux; les scientifiques peuvent identifier les meilleurs indicateurs pour répondre à ces valeurs; les gestionnaires de la biodiversité peuvent évaluer l'applicabilité et l'utilité des indicateurs. Il

est important d'intégrer les intérêts et habilités de chacun dans le processus de décision.

3. Établir un leadership partagé entre les acteurs du milieu, les gestionnaires et les scientifiques pour guider la sélection et l'utilisation des indicateurs.

4. Ne pas sous-estimer l'importance du capital social dans le choix des indicateurs. Les indicateurs devraient refléter les valeurs que les gens veulent soutenir.

5. Établir une cible ou un but pour chacun des indicateurs afin de savoir si les résultats obtenus nécessitent un ajustement des mesures ou des politiques de gestion. Certains indicateurs n'auront pas de but défini, mais leurs valeurs pour certains acteurs sont si importantes qu'il convient de les considérer.

6. Clairement définir l'échelle spatiale à laquelle l'indicateur est appliqué (p. ex. à l'échelle du bassin versant, de la communauté, une région, etc.).

7. Considérer les efforts qui sont faits sur d'autres indicateurs similaires (ou les mêmes) à des échelles locales ou globales afin de pouvoir coordonner, autant que possible, les indicateurs choisis. Une telle coordination peut améliorer l'image obtenue en accroissant la puissance statistique, ce qui n'aurait pu être possible autrement.

4.4 Les différentes catégories d'indicateurs

Jusqu'à maintenant nous avons considéré les indicateurs de la biodiversité de façon plutôt abstraite. Le terme indicateur a été utilisé dans une perspective large pouvant s'appliquer à une grande diversité de mesures de biodiversité. La partie qui suit amène davantage de lumière sur la vaste gamme de paramètres ou variables en lien avec les organismes, les populations, les espèces, les communautés, les écosystèmes ou les biomes qu'il est possible de considérer comme indicateurs de biodiversité (voir le Tableau 4.2 tiré de Bellard et al. 2012). Nous ne décrivons pas tous les types d'indicateurs associés au tableau 4.2, mais présenterons les plus communs avec leurs avantages et inconvénients.

Tableau 4.2. Différents types d'indicateurs de biodiversité en fonction du gradient des échelles d'organisation (tiré de Bellard et al. 2012).

← Individus		Population		Espèces	Communautés	Écosystèmes	Biomes ⇒	
Génétique	Valeur adaptative, comportement & physiologie	Phénologie	Dynamiques	Distribution	Relations Interspécifiques	Productivité	Services écosystémiques	Biomes
Diversité d'allèles Sélection naturelle Taux de mutation Richesse hétérozygotie	Fécondité Survie Taux d'activité Susceptibilité aux maladies Condition corporelle Croissance	Date de migration Hibernation & diapause Saison de croissance Bourgeonnement floraison Naissance dispersion	Recrutement Structure d'âge Ratio des sexes Abondance	Quantité qualité d'habitats Niche écologique Localisation de la distribution Étendue de la distribution	Nouvelles interactions Désynchronisation Déséquilibre Découplement	Abondance biomasse Érosion Fréquence de perturbations Flux d'énergie Flux de matière	Composition Fonction Production	Caractéristiques d'écotypes Changement de distribution Résilience Fréquence des catastrophes Désertification

4.4.1 *Les indicateurs associés aux individus*

Les suivis de la biodiversité sont généralement associés à des mesures effectuées au niveau des communautés et se limitant à des données de présence-absence. Or, ces observations sont la résultante d'une somme d'évènements se produisant à l'échelle des individus (p. ex., naissance, reproduction, migration et mortalité) et se répercutant sur la composition finale de la communauté. Ce qui est observé est donc le résultat et non la cause du changement. Une plus grande compréhension des phénomènes à l'étude peut donc être acquise si la prise de mesures s'effectue au niveau des individus. Cependant, l'effort à investir pour ce genre d'approche est très important et, de ce fait, la plupart des études centrées sur l'individu se limitent à l'échelle locale. Certains aspects peuvent tout de même être mesurés à large échelle et contribuer à notre compréhension des changements de biodiversité en plus de produire des signaux précurseurs de changements démographiques.

La génétique

La génétique est le plus bas niveau d'organisation utilisé pour décrire la biodiversité et, bien qu'elle soit souvent laissée pour compte, est un élément important de celle-ci. Les changements environnementaux comme les CC sont susceptibles d'agir directement sur la génétique en modifiant la sélection et la migration. À leur tour, ces changements génétiques sont susceptibles d'avoir des répercussions sur la capacité d'adaptation des populations et sur la résilience et le fonctionnement des écosystèmes (Noss 1990, Bellard et al. 2012). Suivre des indicateurs génétiques apporterait donc des informations intéressantes dans une perspective écologique et évolutive (Schwartz et al. 2007), cependant, le coût et la complexité des analyses génétiques ont historiquement été un frein important à leur mise en place (Noss 1990). Or, les outils moléculaires sont de plus en plus abordables et le développement de nouvelles approches facilite d'autant plus leur utilisation, incitant certains à en recommander l'emploi pour les suivis (Schwartz et al. 2007, Pereira 2013). À ce titre, Schwartz et al. (2007) suggèrent que le potentiel des marqueurs génétiques pour les suivis est souvent sous-estimé et présentent en revue différentes utilisations de ces outils. D'abord, en permettant de distinguer les individus, les marqueurs moléculaires peuvent servir à estimer l'abondance des populations (surtout pour les espèces rares), à corriger certains biais dans les estimations d'abondances liés aux erreurs de détection et à estimer des paramètres démographiques (survie et recrutement) en calculant le renouvellement des individus dans le temps. Pour ce faire, des mesures non invasives existent, notamment l'identification d'individus à partir de poils ou de plumes. De plus, les marqueurs génétiques permettent, entre autres, d'évaluer l'effet de perturbations sur le flux génétique, d'estimer la migration entre les populations et de détecter les cas d'hybridation (Schwartz et al. 2007).

Toutefois, même si le suivi génétique offre des possibilités intéressantes, de nombreux défis subsistent. Notamment, le coût pour mesurer la diversité génétique d'une population demeure élevé, les estimations démographiques peuvent être biaisées suite à des erreurs de génotypage et les séries temporelles à long terme pouvant servir de références sont quasi inexistantes. Malgré ces limites, les développements dans ce domaine sont très rapides et le suivi génétique a le potentiel de pouvoir répondre à de nombreuses questions clés en écologie et en conservation dans un proche futur (Schwartz et al. 2007).

Le comportement, la physiologie et la valeur adaptative

Face à un changement environnemental, beaucoup d'organismes afficheront de la plasticité phénotypique, c'est-à-dire, une modification de leur physiologie (p. ex., évapotranspiration, torpeur/dormance, hormone, condition corporelle) et/ou de leur comportement (p. ex., diète, activité, budget énergétique) qui influencera leur survie et *fitness* dans ces nouvelles conditions (Stearns 1992, Parmesan 2006). Ces modifications seront d'autant plus marquées si les changements environnementaux influencent le succès ou le moment d'évènements importants (p. ex., migration ou reproduction), la disponibilité de la nourriture ou de l'habitat, la résistance aux maladies ou si les conditions environnementales s'éloignent des seuils de tolérances physiologiques des individus (Reed et al. 2013).

Chez les animaux, une des réponses plastiques particulièrement importantes est la réponse endocrinienne, c'est-à-dire, la production d'hormones. Par exemple, les hormones de stress tel les glucocorticoïdes sont très importantes chez les vertébrés, car elles modifient l'allocation d'énergie, la physiologie et le comportement des individus (Crespi et al. 2013) et leurs permettraient ainsi de répondre aux changements environnementaux. Boonstra et Fox (2013) soutiennent même que cette hormone de stress permet de prédire les cycles d'abondance de certaines espèces. Le stress que subit un individu devrait aussi être visible sur sa condition corporelle, un facteur qui intègre à la fois la disponibilité des ressources, les dépenses énergétiques et l'allocation énergétique entre la croissance, le maintien et la reproduction (Parker et al. 2009). La condition corporelle peut être mesurée différemment en fonction des taxons (p. ex., indices lipidiques ou protéiques, masse, volume, densité) et la signification écologique des changements observés, s'il y a lieu, dépendra de l'élément mesuré (Jakob et al. 1996, Diaz et al. 2007, Moya-Laraño et al. 2008). La condition corporelle des individus est un paramètre décisif, car en plus de réagir rapidement aux changements, il est connu pour influencer directement la survie et la reproduction des individus (Naulleau and Bonnet 1996, Kasumovic et al. 2009, Parker et al. 2009). Les principaux désavantages des indicateurs de conditions corporelles demeurent qu'ils sont très exigeants à mesurer et qu'ils peuvent varier en fonction de paramètres locaux (p. ex., habitat) et régionaux (p. ex., climat). Il est donc nécessaire d'obtenir des données sur beaucoup d'individus pour traduire une tendance régionale. Il existe plusieurs autres indicateurs de changements physiologiques ou comportementaux (les réponses phénologiques seront exposées plus loin), cependant, plusieurs d'entre eux sont spécifiques à des taxons particuliers et ne seront donc pas exposés en détail.

Les changements environnementaux peuvent également influencer la valeur adaptative (croissance, reproduction et survie) des individus (Grosbois et al. 2008) et affecter différemment les organismes en fonction de leur stade de vie (Zeigler and Bradshaw 2013; p. ex., l'effet des CC est plus marqué sur les larves que sur les adultes de papillons, Radchuk et al. 2013). À ce titre, la croissance et la taille, bien qu'elles demandent un certain effort d'échantillonnage, sont des variables relativement faciles à mesurer pouvant fournir de l'information sur les contraintes auxquelles les individus font face. Les organismes qui ont une croissance continue permettront de récolter des informations sur une longue période (p. ex., les arbres), alors que pour d'autres la taille est fonction des conditions rencontrées en début de vie. Le taux de reproduction, le but ultime de tout organisme, est également une mesure d'intérêt (Clobert and Lebreton 1991), car un organisme qui ne parvient pas à se reproduire subit fort probablement des facteurs de stress importants. La santé reproductive d'un individu correspond à sa fertilité (capacité à se reproduire ou non) et à sa fécondité (nombre de rejetons par femelle). L'âge de la primiparité (première

reproduction) est aussi un élément décisif (Clobert and Lebreton 1991). Mesurer des indicateurs de reproduction n'est pas nécessairement difficile pour un nombre restreint d'individus, mais demandera un effort considérable si plusieurs individus sont visés sur un vaste territoire. Plusieurs indicateurs de succès reproducteur ont été développés en fonction des taxons (p. ex., taux de floraison, nombre d'œufs produit, taille de la portée, nombre de fruits ou graines, nombre de rhizomes). Certains indicateurs incluent également la dimension de survie de la progéniture (p. ex., taux de germination des graines, nombre de jeunes à l'envol) qui, ultimement, sont plus représentatifs de succès reproductif réel d'un individu. Les indices de survie sont généralement beaucoup plus difficiles à obtenir et peuvent être biaisés par des problèmes de détections (Grosbois et al. 2008).

La phénologie

La phénologie correspond au synchronisme des événements d'histoire de vie cycliques chez les organismes (p. ex., les dates de floraison, de migration saisonnière ou de ponte). La réponse phénologique est une réponse plastique permettant aux organismes d'ajuster ces événements d'histoire de vie aux changements environnementaux afin de rester en phase avec leur milieu et ainsi maximiser leur valeur adaptative. Bellard et al. (2012) situent la phénologie à mi-chemin entre les phénomènes se produisant à l'échelle des individus et des populations (voir Tableau 4.2), car bien que cette réponse se fasse sur une base individuelle (les individus étant plus ou moins plastique), ces changements devraient exercer une influence à l'échelle de la population. Une modification dans la phénologie des organismes est la réponse la plus répandue face aux CC (Parmesan 2006, Charmantier et al. 2008). Bien qu'on considère principalement les réponses phénologiques associées aux saisons, celles-ci peuvent aussi s'effectuer sur des échelles temporelles plus courtes, par exemple, avec la modification des patrons d'activités journaliers permettant d'ajuster les dépenses énergétiques aux conditions abiotiques (Bellard et al. 2012).

Depuis les 50 dernières années, il a été démontré que les organismes, incluant la faune et la flore, ont devancé en moyenne de 5,1 jours les événements phénologiques en réponse au CC (Root et al. 2003). Cependant, ces changements ne sont pas équivalents entre les espèces et varient en fonction des traits (Diamond et al. 2011) et de la clade (Davis et al. 2010) des organismes. Ainsi, des décalages entre des organismes entretenant des interactions peuvent survenir (p. ex., prédateurs-proies, pollinateurs) et affecter les communautés (Parmesan 2006, Rogers et al. 2013). De plus, les réponses phénologiques de plusieurs organismes ne sont pas assez importantes par rapport à l'amplitude des CC ce qui peut affecter négativement certaines activités saisonnières (Visser et Both 2005). Les changements phénologiques peuvent également amplifier d'autres facteurs de stress, notamment en ce qui a trait aux espèces exotiques qui sont susceptibles d'avoir des réponses phénologiques différentes des espèces indigènes (p. ex., le verdissement des plantes exotiques est souvent plus hâtif que pour les indigènes, Wilsey et al. 2011). Ces multiples relations sont hautement complexes et, jusqu'à présent, mal comprises (Davis et al. 2010, Reed et al. 2011).

4.4.2 Les indicateurs associés aux populations

Une population regroupe tous les individus d'une espèce, dans un lieu et un temps donné. L'état d'une population peut différer de celle de l'espèce entière et refléter un contexte régional distinct

et, ainsi, permettre une meilleure compréhension des facteurs locaux affectant la distribution des espèces (Sæther et al. 2004). Notamment, pour une espèce donnée, les différentes populations peuvent être caractérisées par des probabilités d'extinction distinctes (p. ex., plus grandes pour les populations petites et isolées, Doak and Morris 2010). Or, la plupart des modèles de distributions et de risque d'extinction sont établis au niveau des espèces et se basent sur l'entière des aires de distribution (Peterson et al. 2002). Agir au niveau des populations permettrait de détecter des changements plus tôt et, ainsi, d'agir avant que le déclin de l'espèce ne soit trop avancé.

La dynamique de population

Les principaux paramètres démographiques à considérer pour évaluer la santé d'une population sont les taux de reproduction, de survie, d'émigration et d'immigration. L'intégration de tous ces facteurs produit le taux d'accroissement démographique de la population (Caughley 1977). Le taux d'accroissement peut aussi être estimé directement à partir des changements d'abondance d'une population. Par contre, de cette façon, la compréhension des mécanismes à l'origine des changements est plus restreinte. Pour déterminer l'effet de l'environnement sur les paramètres démographiques, il est avantageux d'utiliser des modèles tenant compte des classes d'âge et/ou du sexe, car ceux-ci peuvent avoir des sensibilités différentes aux variations environnementales (Gaillard et al. 1998). Généralement chez les vertébrés, les changements s'observent d'abord *via* la survie juvénile, ensuite à l'âge de la première reproduction et, finalement, dans la reproduction des femelles matures (Eberhardt 2002). La survie adulte est généralement peu variable, mais peut affecter grandement la démographie d'une population (Gaillard and Yoccoz 2003). Malheureusement, il est parfois très difficile d'obtenir des estimations des paramètres démographiques à l'échelle des populations et la seule alternative demeure alors de se baser sur des données à l'échelle individuelle (Nichols 1992). Par exemple, les données par marquage - recapture fournissent généralement beaucoup d'information sur les paramètres démographiques tels que la survie, la transition entre les stades reproductifs, les taux de dispersion, et les taux de recrutement (revue dans Nichols 1992, Grosbois et al. 2008). La disponibilité des données démographiques est souvent biaisée pour les vertébrés, et particulièrement les grands mammifères.

Considérant la complexité d'obtenir des données démographiques, les données disponibles au niveau des populations se limitent généralement à des indices d'abondance. Ces indices sont utiles afin d'évaluer les tendances à la hausse ou la baisse des populations et le sont d'autant plus lorsqu'ils incluent la structure d'âges et le rapport des sexes. Néanmoins, les données d'abondance ne sont pas toujours précises (Krebs 1991) dû à des contraintes logistiques liées principalement à la détectabilité des organismes. De ce fait, les estimations sont rarement précises (faibles variances) ou non biaisées (faibles déviations des valeurs vraies; Hone 2008). Par exemple, les estimations de densité faites à partir d'inventaires aériens pour les ongulés sous-estiment généralement les densités réelles (Potvin and Breton 2005). Lorsque des mesures directes d'abondance ne sont pas disponibles, d'autres indices tels les signaux acoustiques (Nichols et al. 2000), la densité de fèces (Acevedo et al. 2008), la collecte de tissus et/ou ADN (Mowat and Strobeck 2000) et les statistiques de récolte (Collier and Sissenwine 1983) peuvent être utilisés pour estimer les fluctuations d'abondance. Malheureusement, les biais et imprécisions de ces indices sont souvent difficiles à déterminer (Shieck 1997, Acevedo et al.

2008) et, de plus, ceux-ci peuvent varier en fonction de la densité de la population. Or, il est important de tenir compte de ces sources potentielles d'erreur afin de ne pas compromettre la validité des résultats (Solow 2001, Freckleton et al. 2006). Malgré cela, plusieurs études qui utilisent des indices d'abondance comme indicateurs de changement négligent les aspects associés à la détection (Tanadini and Schmidt 2011). Tout comme pour les paramètres démographiques, il existe un biais taxonomique envers les vertébrés (principalement les oiseaux chanteurs et la sauvagine) et les plantes dans la disponibilité des données d'abondance (Boutin et al. 2009).

4.4.3 *Les indicateurs associés aux espèces*

La biodiversité est souvent associée directement à la diversité spécifique. Il n'est donc pas surprenant que les données le plus souvent utilisées pour l'étude de la biodiversité soient celles de présence (ou présence-absence) à partir desquelles les distributions des espèces sont extrapolées. Cette échelle est un peu plus grossière que celle de la population, car elle se limite à souligner l'occurrence (c.-à-d. présence-absence) d'une espèce à un endroit donné et éventuellement d'associer cet état aux conditions environnementales (Bellard et al. 2012). Connaître la distribution des espèces est malgré tout un outil puissant qui permet d'évaluer comment la richesse spécifique change dans le temps et l'espace et de comptabiliser l'arrivée et l'extinction d'espèces.

L'occurrence d'une espèce

La majorité des modèles et des indices intégrateurs de biodiversité (p. ex, Shannon) utilisent des données d'occurrence. Ce type de données est souvent considéré comme la base de tout programme de suivi de la biodiversité, car il permet de mesurer les tendances (déclin, stabilité ou augmentation) de la biodiversité. Lorsque l'on compile toutes les données d'occurrence, on obtient une matrice présence-absence (où une présence est indiquée par 1 et une absence par 0) qui est à la base de multiples analyses en écologie des communautés et en biogéographie (voir chapitre 7).

Cependant, plusieurs problèmes peuvent être rencontrés avec les données d'occurrence. On reproche notamment aux mentions d'occurrence d'être souvent effectuées sans schémas d'échantillonnage sous-jacents. On récolte donc de façon éparse des spécimens (p. ex., herbiers), des photos ou des points de localisations de sorte que la plupart des données se limitent à des présences, l'absence réelle de l'organisme n'étant pas vérifiée. Ainsi, les matrices de présence-absence correspondent généralement à une grille de présence confirmée versus non confirmée (Elith et al. 2006). L'absence de schémas d'échantillonnage peut également limiter la représentativité des analyses pour une région donnée (Buckland et al. 2012). Ceci risque d'être d'autant plus vrai avec la popularité croissante des programmes de détection faite par des citoyens (p. ex., les outils Internet pour la détection d'espèces menacées ou exotiques).

La détection imparfaite des organismes (une espèce était présente et n'a pas été vue) est également une source d'erreur importante (Tanadini and Schmidt 2011). Ceci peut être amplifié lorsque la détectabilité d'espèces appartenant à un même taxon et échantillonnée simultanément diffère (Buckland et al. 2012). Il est d'ailleurs démontré que la probabilité de détection de différentes espèces en fonction du moment de l'échantillonnage peut varier de 10 et 95 %

(Buckland et al. 2012). Il est cependant possible d'évaluer la détectabilité des organismes et les facteurs l'influençant afin de corriger ce problème (p. ex., Buckland et al. 2001, Tanadini and Schmidt 2011). Il est également possible de créer des protocoles d'échantillonnage (nombre et moment de l'échantillonnage) permettant d'atteindre un taux de détection désiré. Malheureusement pour certains groupes, il sera nécessaire d'avoir des inventaires multiples pour valider ces protocoles, ce qui demande un effort considérable (Halme et al. 2012). Il est donc important d'utiliser les données d'occurrence de façon critique et de savoir comment concevoir la prise de données de façon à limiter les biais.

La distribution des espèces

Les modèles de distribution utilisent les données de présence-absence qu'ils relient à des facteurs environnementaux. Les données d'occurrences servent donc à évaluer la distribution géographique et environnementale des espèces et à comprendre les déterminants écologiques, évolutifs et biogéographiques à la base des patrons de répartition de la biodiversité (Elith et al. 2006). Les données sur la distribution des espèces permettent de répondre à plusieurs questions en écologie, en évolution et en conservation, par exemple : la relation entre les paramètres environnementaux et la richesse spécifique, la persistance des espèces en lien avec la configuration des habitats et le potentiel d'invasion des espèces non indigènes (revue dans Elith et al. 2006). Cependant, d'un point de vue de gestion, les données de distribution ont le désavantage d'être un signal tardif de changements : lorsqu'une espèce est extirpée d'un site, il est souvent trop tard pour renverser la vapeur. Néanmoins, la disparition d'espèces dans un secteur peut servir à détecter les lieux où des changements importants ont cours ou démontrer l'urgence de développer des mesures de conservations aux autres sites où ces espèces sont présentes. Similairement, lorsqu'on découvre une espèce exotique dans un secteur, on peut réagir en mettant en place des mesures qui permettront d'éviter sa propagation. Les données sur la distribution des espèces sont particulièrement pertinentes dans un contexte de CC (Bellard et al. 2012) où des changements de distribution (contraction ou expansion) ont déjà été observés pour plus de 1000 espèces (Parmesan 2006).

4.4.4 Les indicateurs associés aux communautés

Il peut être désavantageux d'utiliser seulement des indicateurs de biodiversité qui se rapportent à l'individu, la population ou l'espèce pour suivre la biodiversité, car on néglige alors les interdépendances entre les espèces. En effet, la disparition ou le déclin d'une espèce à l'intérieur d'une communauté peut avoir un effet cascade d'une ampleur sous-estimée, notamment à travers des interactions secondaires. L'étude de systèmes interspécifiques, incluant les pollinisateurs et les parasites, a effectivement démontré que 6300 espèces pourraient disparaître suivant la disparition de leurs plantes hôtes (Koh et al. 2004). L'approche espèce centrée peut faillir à représenter des propriétés connues des réseaux trophiques, telles qu'une augmentation de la résilience découlant d'une connectivité accrue, et la co-occurrence à long terme d'espèces profitant d'interactions asymétriques (revue par Araújo et al. 2011). Il est essentiel de concevoir que les interactions interspécifiques peuvent structurer les écosystèmes de manière importante, autant à fine qu'à large échelle. Il faut donc développer des indicateurs en conséquence.

Les associations trophiques peuvent s'établir à différentes échelles spatiales et temporelles et être basées sur des variations abiotiques (court terme), phénologiques (saisonniers), climatiques (annuelles), successionales (décennales ou centenaires) ou géologiques (millénaires) (Strong et al. 1984, Ricklefs and Schluter 1993). Il n'est donc pas surprenant que ces associations influencent la biodiversité tant au niveau de la génétique, des espèces, des groupes fonctionnels que des écosystèmes (Wolters et al. 2000). Le premier mécanisme par lequel la biodiversité de certains groupes taxonomiques ou fonctionnels est interreliée est par des relations spécifiques, c'est-à-dire, qu'au moins un des partenaires est obligatoirement associé à l'autre (p. ex., un herbivore peut être spécifique à une espèce de plantes, mais la plante peut avoir plusieurs herbivores associés; Hooper et al. 2013). Le deuxième mécanisme inclut les relations dites asymétriques impliquant qu'une espèce soit associée à plusieurs espèces. Ceci arrive lorsque, par exemple, un organisme a une influence disproportionnée sur un système (espèce clé de voûte), participe à de multiples interactions indirectes ou modifie les conditions environnementales (p. ex., la canopée arborescente) ce qui peut leur conférer une grande influence sur la croissance ou diversité d'autres organismes (p. ex., lombrics, castors) (Hooper et al. 2013). Troisièmement, le mécanisme de la richesse causale est produite lorsque la diversité de différents types d'espèces ou groupes fonctionnels peut être associée à la diversité d'autres espèces ou groupes dans un lien « plusieurs à plusieurs » (Hooper et al. 2013). Notamment, une grande diversité de plantes produit une litière variée et hétérogène pouvant soutenir différents décomposeurs, détritivores ou champignons. Alternativement, une grande diversité de ressources et d'espèces dans le sol peut engendrer une grande diversité d'espèces au-dessus du sol (revue par Hooper et al. 2013). Il s'avère cependant difficile de trouver des indicateurs permettant de mesurer la stabilité des relations entre les organismes vivants au-dessus et au-dessous du sol, car près de 99 % des bactéries et des nématodes du sol serait encore inconnu (Wall and Virginia 2000).

Les trajectoires des organismes appartenant à une communauté subissant un changement environnemental peuvent être corrélées positivement ou négativement (p. ex., l'augmentation d'une espèce entraîne respectivement une augmentation ou une diminution de l'espèce associée) ou non corrélées (Hooper et al. 2013). Les relations de compétition sont un exemple de corrélations négatives qui peuvent fortement moduler la trajectoire des espèces alors que l'augmentation d'une espèce peut limiter l'accès aux ressources d'une autre espèce et en causer le déclin (Lavergne et al. 2010). Les espèces exotiques envahissantes sont d'ailleurs reconnues pour modifier les patrons compétitifs à l'intérieur des écosystèmes (Dukes and Mooney 1999). Les changements dans les interactions positives telles que le mutualisme ou la facilitation peuvent également avoir des effets très importants sur les organismes (Brooker et al. 2007). Par exemple, certaines plantes dépendent de la présence de certains pollinisateurs ou de mycorhizes pour leur survie et reproduction et, de plus, ces relations doivent souvent être synchronisées au niveau de la phénologie des deux espèces (Hegland et al. 2009). Les interactions négatives ou positives sont susceptibles d'influencer la structure complète d'un assemblage d'espèces et le maintien de la biodiversité dans le temps. Malheureusement, il s'avère beaucoup plus difficile d'identifier des indicateurs pour mesurer les changements de relations entre les espèces, que ceux d'une seule espèce ou groupe d'espèces (Lavergne et al. 2010).

Les interactions trophiques compliquent grandement la compréhension et les prédictions des effets des CC sur la biodiversité. Par exemple, une espèce qui disparaît suite à un stress environnemental peut déstabiliser les processus compétitifs de l'écosystème entier (Ives and Cardinale 2004). Une espèce changeant d'aire de répartition peut être libérée de ses prédateurs,

compétiteurs ou autres et connaître une croissance fulgurante. Alternativement, l'arrivée de nouveaux pathogènes, parasites, prédateurs ou herbivores peut moduler les effets des CC sur les communautés d'accueil (revue dans Lavergne et al. 2010). Les espèces locales peuvent aussi modifier la réponse attendue des écosystèmes face aux CC. Par exemple, le broutement par le caribou tamponne l'effet du climat sur la communauté de plantes (Post and Pedersen 2008). Les CC ont le potentiel d'affecter grandement les associations interspécifiques à travers l'impact sur leur synchronie. Les relations trophiques sont particulièrement sensibles aux changements phénologiques (Visser and Both 2005). Néanmoins, les systèmes basés sur des espèces généralistes plutôt que spécialistes, tels que certaines associations plantes-pollinisateurs, sont plus robustes à un découplage spatial ou temporel, bien que la perte de certaines des espèces généralistes peut avoir des répercussions majeures sur les écosystèmes (revue dans Lavergne et al. 2010).

Le découplage des interactions trophiques dû aux CC pourrait compromettre non seulement l'espèce directement affectée, mais aussi toute la communauté par le truchement des interactions directes ou indirectes de cette espèce. L'ampleur de l'impact sur la communauté dépend de la niche de l'espèce affectée et de sa place dans la chaîne trophique {Schweiger, 2008 #2600}. Ainsi, si l'espèce la plus affectée est en plus une espèce clé de voute dans l'écosystème, l'effet peut être majeur. L'hétérogénéité dans la réponse des espèces aux CC peut également modifier la composition des communautés et favoriser l'apparition de communautés non-analogues où de nouvelles interactions auront lieu {Tingley, 2009 #2601}, ce qui est d'ailleurs déjà observé {Hobbs, 2009 #2602}. À l'inverse, certaines communautés peuvent être dotées d'une plus grande stabilité qu'attendue dû, par exemple, à la stabilité de chaînes trophiques associée à des mécanismes d'autorégulation ou à des effets compensatoires (Ives & Cardinale 2004). Ignorer les interactions interspécifiques pourrait donc entraîner des prédictions largement erronées des effets des CC sur les espèces et écosystèmes. En fait, s'il est possible de prédire la distribution des espèces à grande échelle en ignorant les interactions, celles-ci peuvent néanmoins influencer la vitesse des changements d'aires de répartition et s'avèrent indispensables pour comprendre les changements dans les communautés à l'échelle locale (revue dans Lavergne et al., 2010). Il s'avère donc essentiel de prendre en compte des indicateurs qui informent sur les interactions trophiques pour suivre et comprendre les changements dans la diversité en lien avec les CC. Par contre, ceci s'avère un défi de taille, car cet aspect des suivis écologiques est encore très peu développé et demeure extrêmement complexe.

4.4.5 Les outils de détection

Il existe de nombreuses manières d'obtenir des informations sur l'état de la biodiversité sans avoir des biologistes sur le terrain. Bien que la qualité des données puisse parfois être sous-optimale, la quantité de données recueillies et les faibles ressources financières nécessaires pour l'utilisation de ces outils font qu'ils peuvent être importants pour un programme de suivi de la biodiversité. Dans cette section, nous discutons d'ADN environnemental et de télédétection satellitaire, acoustique et par caméra.

ADN environnemental

Le suivi par ADN environnemental consiste à analyser l'ADN contenu dans un échantillon afin de déterminer si une espèce ou un gène y est présent ou pour y identifier tous les organismes qui

s'y trouvent. Par exemple, cette technique est utilisée dans le bassin des Grands Lacs afin de déterminer si les carpes asiatiques, des espèces envahissantes, y sont présentes (Jerde et al. 2011). En analysant l'eau provenant de certaines rivières, il a ainsi été démontré que ces carpes étaient présentes alors que des tentatives précédentes à la pêche électrique n'avaient pas réussi à en capturer. Il est également possible d'utiliser cette technique pour identifier tous les organismes d'un taxon présent dans un échantillon donné. En effet, en association avec les grandes bases de données contenant de l'information sur l'ADN de multiples organismes (DNA barcoding; Hebert et al. 2003), il est de plus en plus facile de lier un brin d'ADN à l'espèce à qui il appartient. Ceci est particulièrement efficace pour identifier les organismes présents à partir d'échantillon d'eau et de sol (Minamoto et al. 2012, Thomsen et al. 2012, Yoccoz et al. 2012) ou encore pour identifier les organismes par leurs fèces ainsi que les espèces qu'ils avaient ingérées (Joo and Park 2012). Récemment, il a également été montré qu'il est possible de suivre la composition des populations de vertébrés en analysant l'ADN du sang recueilli dans les insectes piqueurs (Pfeifer et al. 2011). Les coûts pour l'analyse de tels échantillons ont grandement diminué lors des dernières années passant pour l'une des techniques (le pyroséquençage 454) de 1000 \$ en 2008 à 500 \$ en 2011 (Baird and Hajibabae 2012). De plus, la puissance des appareils pour effectuer les analyses a augmenté de façon considérable (Shokralla et al. 2012). Ces améliorations (baisse des coûts et augmentations de la qualité du séquençage) vont continuer à s'accélérer, si bien que le principal problème deviendra la puissance des ordinateurs qui ne sera plus suffisante pour analyser la quantité de données que peuvent fournir ces analyses (Shokralla et al. 2012).

Cette méthode a le potentiel de révolutionner l'écologie, mais elle comporte son lot de défis à résoudre avant son déploiement à large échelle (Yoccoz 2012). Par exemple, étant donné que l'ADN d'un individu peut lui survivre, il est possible qu'une partie des organismes observée soit morte ou ait quitté l'endroit ("ADN zombie" ; Dejean et al. 2011). Également, les analyses statistiques et la capacité de lier les séquences d'ADN aux organismes sont complexes et demandent du personnel hautement spécialisé (Yoccoz 2012). En fait, quiconque voulant utiliser cette méthode se doit d'abord d'investir une grande quantité d'argent et d'énergie pour y parvenir (Yoccoz 2012). Nul doute que le potentiel est présent et que de plus en plus de chercheurs iront dans cette direction, le meilleur est à venir, mais les défis sont pour le moment grands.

Téledétection satellitaire

Malgré le fait que les dynamiques façonnant les écosystèmes soient très complexes, les paysages résultants de ces dynamiques peuvent être généralisés en des variables plus simples qui nous renseignent sur leurs changements tant spatiaux que temporels. Par exemple, une sapinière va contraster fortement avec une érablière lorsque vue du ciel. Similairement, une image d'une parcelle de forêt boréale sera très différente avant et après un feu de forêt. Il existe maintenant plusieurs outils de téledétection satellitaire qui peuvent être utiles afin de quantifier l'impact des CC sur le paysage.

La visualisation des paysages peut nous renseigner sur la productivité primaire, la structure de la végétation, la phénologie, et bien entendu la présence de feux de forêts. Toutes ces variables sont très probablement sensibles aux CC. De plus, certains changements dans la structure de la végétation peuvent altérer les flux d'énergie à l'échelle locale, modifiant ainsi le climat régional

et créant ainsi des cycles de rétroaction où les CC amènent un changement de structure végétale qui modifie à son tour le climat local (Feddema et al. 2005).

Il existe deux principaux types de télédétection satellitaire, soit 1) les indices du spectre de la végétation (IV) dérivés de mesures de réflexions spectrales crues et 2) les observations de la terre (OT). L'indice le plus connu des IV est le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Cet indice est très utile pour évaluer les changements dans la végétation, mais possède aussi certaines faiblesses (Figure 4.1 et Tableau 4.3). Les OT procurent de l'information sur plusieurs longueurs d'onde, dont le visible. Les données du *Modis Land Cover Type Product* (MCD12Q1 v5) sont un exemple d'OT et beaucoup d'autres données sont disponibles gratuitement¹². Malgré la plus grande couverture et résolution spatiale des OT, le compromis entre la résolution spatiale et temporelle de ces techniques suggère d'utiliser les deux techniques selon les cibles à atteindre, d'autant plus que l'information disponible diffère. Une discussion détaillée de l'information disponible, des avantages et des limitations de ces techniques est disponible dans l'article de Pfeifer et al. (2011).

Télédétection visuelle à petite échelle

La télédétection visuelle par caméras peut se faire pour enregistrer la présence d'espèces, mais aussi pour décrire l'hétérogénéité, la structure et la richesse des communautés végétales (Proulx and Parrott 2008). De plus, la télédétection visuelle par caméras peut procurer des indices pour des phénomènes pour lesquels les méthodes de suivi traditionnelles seraient dispendieuses. Par exemple, Pépino et al. (2013) ont découvert que la période de reproduction d'espèces de truites était fortement corrélée avec la couleur de la végétation, permettant un suivi phénologique de la reproduction des salmonidés à faibles coûts. De plus, ce type de suivi permettrait de savoir si la synchronie phénologique entre la végétation et les salmonidés est liée à des variables climatiques ou bien à d'autres signaux environnementaux (p. ex. la photopériode). Bien que la télédétection visuelle en soit encore à ses débuts, les intégrateurs écologiques, définis par les variables corrélées à d'autres variables pouvant être utilisées pour mieux comprendre et suivre les changements écologiques, sont prometteurs pour les programmes de suivis tant en termes d'économie que d'accumulation de données pouvant être utilisées en recherche écologique.

¹² Voir par exemple, http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle
<http://geodata.grid.unep.ch/>

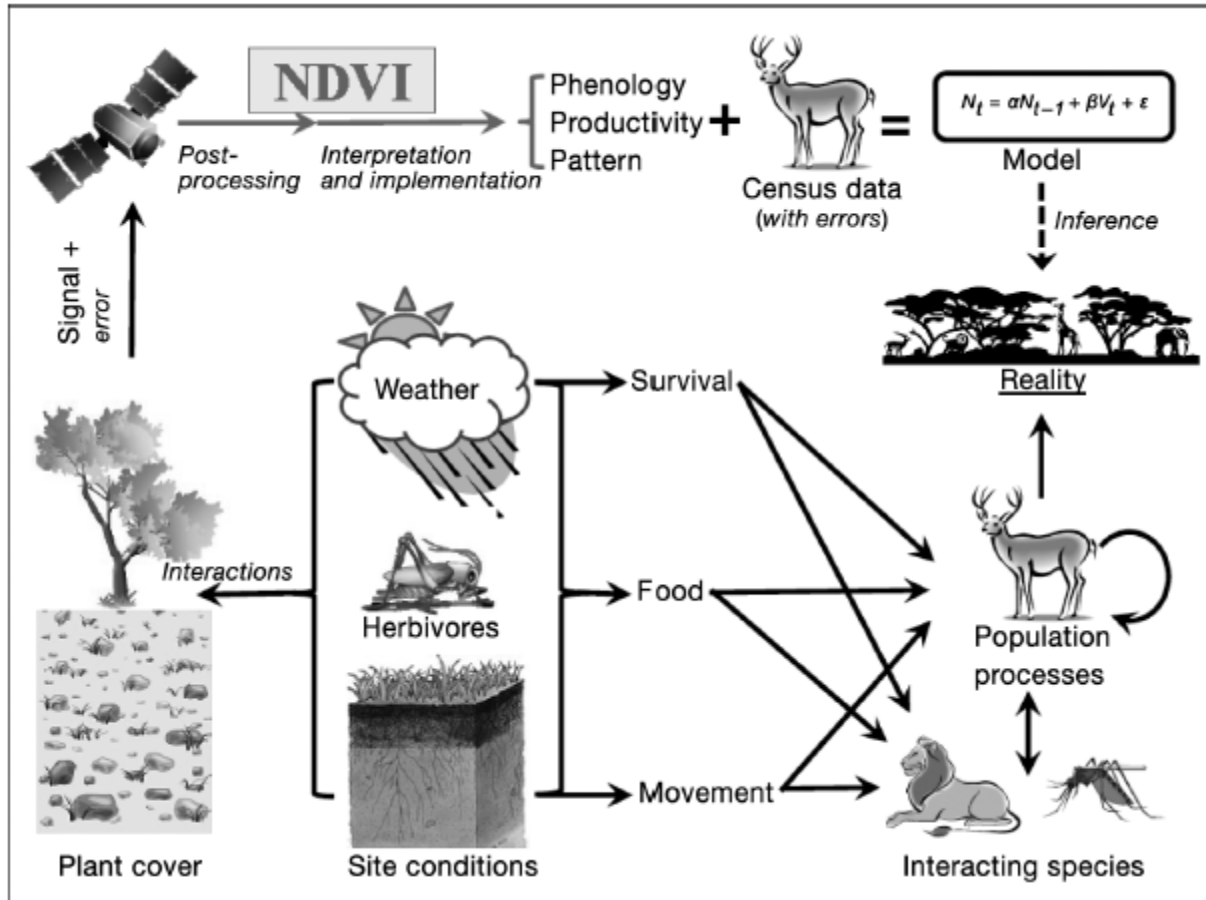


Figure 4.1: Représentation schématique de la méthode *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Les conditions météorologiques, les herbivores et les variables biophysiques locales influencent la productivité primaire. Les satellites captent la réflectance de la végétation, quoique imparfaitement. Les données doivent être analysées afin de minimiser les erreurs en sacrifiant une partie de la résolution spatiale ou temporelle. Puis les données NDVI peuvent être utilisées pour faire le suivi de végétation et même pour répondre à des questions écologiques à des niveaux trophiques supérieurs. Adaptée de Pettorelli et al. (2011).

Tableau 4.3: Comparaison des indices du spectre de la végétation et des observations de la terre pour les analyses en écologie. Adaptée de Pfeifer et al. (2011).

	Indices de végétation	Observations de la terre
Expertise requise	Connaissances approfondies de traitement de l'image avant son utilisation	Transfert direct dans des logiciels d'analyses spatiales
Compromis résolution spatiale vs temporelle	Haute résolution spatiale $\geq 10\text{m}$ (SPOT) et $\geq 30\text{m}$ (Landsat) mais observations espacées dans le temps	Faible résolution spatiale mais forte résolution temporelle (couvert végétal $\geq 30\text{m}$ et annuelle, feux $\geq 500\text{m}$ et journalière, productivité $\geq 1\text{km}$ et journalière)
Couverture spatiale	Requiert beaucoup de puissance informatique pour étudier une grande région; inter-comparaisons limitées par des trous dans les données et des relations non-linéaires entre les IV, la productivité et l'indice de surface foliaire lorsque la végétation est dense ou quasi-absente	Globale et les indices de productivité et de surface foliaire sont basés sur des algorithmes standardisés
Capacité de détection des changements	Peut-être difficile selon l'angle de vue et du soleil; facile à utiliser mais requiert des corrections pour la contamination par les nuages et les aérosols	Évaluation précise par pixel mais peut-être limitée par la résolution spatiale pour des environnements très hétérogènes
Utilisation pour la modélisation écologique	Limitée de par la faible couverture spatiale	Très bonne puisque les valeurs par pixel sont validées

Téledétection sonore

La téledétection sonore se fait depuis longtemps pour les mammifères marins (Johnson and Tyack 2003, Marcoux et al. 2011, Rogers et al. 2013), mais cette technique est de plus en plus appliquée pour la faune terrestre. Cela fait maintenant plusieurs années que des techniques acoustiques sont utilisées pour étudier les oiseaux (Anderson et al. 1996, Chen and Maher 2006, Taylor 2012) et il y a aussi d'autres taxons qui peuvent être suivis de manière efficace. Par exemple, les chauves-souris et les amphibiens peuvent être suivies avec des appareils stationnaires et automatiques qui collectent les données (Acevedo et al. 2009, Stahlschmidt and Bruehl 2012). De plus, dans le cas chauve-souris, il a été démontré que cette méthode est plus précise et beaucoup moins dispendieuse, que les transects effectués par des techniciens de la faune (Stahlschmidt and Bruehl 2012). Il est à noter que les données n'ont même pas à être téléchargées en visitant de manière régulière les sites de suivi, mais qu'elles peuvent être transmises par satellites (McKown et al. 2012), ce qui pourrait rendre possible un suivi du nord du Québec où l'accessibilité est compliquée et dispendieuse. Une équipe de recherche australienne a développé un site internet dans lequel il est possible de télécharger plusieurs outils d'analyse acoustique¹³.

4.4.6 Choisir les taxons à suivre

Mis à part certains outils, comme l'ADN environnemental, il est essentiel de cibler les espèces ou les taxons pour lesquelles on veut évaluer l'occurrence, la distribution ou tout autre indicateur populationnel ou individuel. Tel que mentionné précédemment, le choix de l'espèce va dépendre principalement de l'objectif visé, certaines espèces étant plus adéquates pour répondre à certaines questions ou sensibiliser différents groupes d'intérêts (Caro and O'Doherty 1999). Ainsi, si l'on veut connaître l'effet d'une perturbation sur un écosystème, on peut, par exemple, porter notre attention sur les taxons considérés sensibles à ce stress (Baird and Hajibabae 2012). Les traits fonctionnels de certaines espèces sont notamment susceptibles d'influencer leur réponse aux changements globaux, par exemple la taille corporelle, mode de reproduction, temps de génération, patron de dispersion, choix d'habitats, niche écologique (Jiguet et al. 2007). Cependant, la décision d'inclure seulement des espèces dont la sensibilité à un stress donné est connue ne fait pas l'unanimité, car la sensibilité de nombreux taxons est inconnue et des surprises peuvent survenir (Nichols and Williams 2006, Boutin et al. 2009). À ce titre, Boutin et al. (2009) suggèrent de sélectionner une diversité de taxons variant en terme d'abondance, de niveau trophique, de taille et de traits d'histoire de vie. Si plusieurs semblent néanmoins s'entendre sur le fait qu'il faut sélectionner les espèces en fonction de certains traits d'histoire de vie, il demeure souvent difficile de faire un choix éclairé lorsque vient le temps de cibler plus spécifiquement quelles espèces couvrir. Des biais importants sont généralement reconnus dans le choix des espèces utilisées dans les programmes de suivi, notamment pour les vertébrés, bien qu'ils ne constituent généralement pas plus de 3 % de toutes les espèces connues (Boutin et al. 2009). Il existe des moyens plus impartiaux de déterminer le choix des espèces comme indicateurs.

Di Castri et al. (1992) propose une méthode pour faciliter le choix des espèces à suivre dans les programmes de suivi. Étant donné qu'il existe certains groupes très diversifiés comme les

¹³ <http://sensor.mquter.qut.edu.au/>

arthropodes et les champignons, il est souvent nécessaire d'être hautement sélectif. Ils suggèrent des critères basés sur les rôles écologiques et les traits d'histoire de vie. Idéalement, les taxons devraient représenter :

- (1) Toutes les guildes fonctionnelles majeures : les producteurs, les herbivores, les carnivores, les parasites, les mutualistes, les pathogènes, les saprobiontes (décomposeurs);
- (2) Toutes l'étendues des formes de croissances des plantes vasculaires, aux champignons, en passant par toutes les tailles et formes animales;
- (3) Si celles-ci existent, toutes les espèces clés ou représentant des espèces clés de voûte, peu importe leur taxon;
- (4) Des taxons représentent divers patrons des distributions géographiques, incluant les espèces endémiques ou très localisées à celles couvrant une large étendue.
- (5) Les taxons représentant les groupes riches et pauvres en espèces, les groupes d'espèces rares et abondantes.
- (6) Mettre l'emphase sur les espèces ou les groupes qui sont considérés comme bioindicateurs de perturbations environnementales, de pollution, de changements climatiques ou qui jouent des fonctions clés.

Évidemment, il sera rarement possible de réaliser un tel suivi, donc di Castri et al. (1992) fournissent également une liste préliminaire couvrant certains aspects écologiques et pratiques qui peuvent être considérés de prime abord. En dépit des obstacles associés à l'étude de groupes aussi divers et relativement peu connus, il leur apparaît essentiel d'inclure des groupes d'insectes et de champignons étant donné qu'ils représentent des tailles et des rôles fonctionnels peu couverts par les autres groupes davantage connus.

Voici un exemple pour les écosystèmes forestiers :

Arbres (tous les taxons)

Sélectionner des groupes de plantes dominantes dans la strate herbacée

Champignons (lichens, mycorhizes et autres groupes spécifiques)

Arthropodes

Araignées (familles sélectionnées)

Insectes (environ 10 à 15 familles ou sous-familles en considérant différentes tailles et différents niveaux trophiques d'insectes, tels que des groupes plus connus comme les stercoraires [bousiers], les cicindèles et les papillons)

Vertébrés

Amphibiens (tous les taxons)

Reptiles (tous les taxons)

Mammifères (tous les taxons)

Oiseaux (tous les taxons)

Bien que l'approche proposée par (di Castri et al. 1992) est intéressante, elle exige néanmoins de couvrir un très grand nombre de taxons ce qui ne sera pas toujours possible. Il est préoccupant d'avoir à limiter le nombre de taxons suivi à un minimum, car cela augmente la « pression » sur les groupes choisis pour qu'ils soient de bons représentants des autres espèces. Surtout que le lien entre le taxon substitut et les autres espèces est rarement évalué adéquatement. De plus, moins le nombre de taxons utilisés est grands et plus les risques que les solutions des gestions visent principalement ces espèces seront grands (Boutin et al. 2009). Certaines solutions sont néanmoins envisageables. Plutôt que d'identifier les organismes à l'espèce, il est parfois possible d'obtenir des indices de diversité en se fiant au nombre de taxons, familles, genres ou ordre en fonction de la complexité des groupes (Kallimanis et al. 2012). En fait, les études ont démontré que la diversité en espèce pouvait être efficacement prédite par la diversité en taxon, et également par la diversité en genres, mais un peu moins par la diversité en terme de familles. Cette méthode performe généralement bien et pour les milieux terrestres, aquatiques ou riverains, et a été évaluée pour les plantes, les algues, les mammifères, les oiseaux, les amphibiens et les reptiles (revue dans Kallimanis et al. 2012). L'avantage d'échantillonner les niveaux taxonomiques plus hauts est que cela demande moins d'efforts, de temps, d'argent et d'expertise.

Une autre alternative pour éviter d'avoir à incorporer un trop grand nombre d'espèces dans les suivis est celle suggérée par (Boutin et al. 2009). Selon lui la liste d'indicateurs présentement utilisés pour évaluer la diversité forestière est largement insuffisante pour servir de thermomètre adéquat à la biodiversité. Il propose plutôt une approche filtre brute où l'on considérerait les grands groupes responsables de services écologiques. Dans cette optique, il serait sans doute intéressant de choisir des indicateurs à d'autres niveaux organisationnels que celui des espèces, soit celui des interactions trophiques ou des écosystèmes.

4.5 Les effets des CC sur les organismes et écosystèmes

La recherche dans le but de comprendre les effets des CC sur les organismes et les écosystèmes est en pleine expansion (Figure 4.2). À titre d'exemple, différentes requêtes effectuées dans le moteur de recherche Scopus¹⁴ en associant l'expression « climate change » aux termes « biodiversity », « fish », « ecosystem function » ou « *Rangifer tarandus* » (caribou) ont respectivement mené à 4833, 2085, 685 et 140 publications. De cette quantité de recherche, il est clair que les CC ont déjà de nombreux impacts sur une variété d'organismes et que ces impacts iront en augmentant à mesure que les CC deviendront plus important (Parmesan and Yohe 2003, Parmesan 2006). Ultimement, face aux nouvelles conditions environnementales, les organismes feront face à trois choix, migrer pour suivre l'enveloppe climatique qu'ils préfèrent (l'ensemble des variables climatiques définissant un territoire), s'adapter aux nouvelles conditions ou disparaître. Les nouvelles conditions environnementales aideront certaines espèces à augmenter leur abondance et leur distribution (p. ex., le dendroctone du pin ; Bentz et al. 2010) alors que d'autres s'éteindront (Thomas et al. 2004) entraînant des changements de compositions des communautés à l'échelle planétaire. Ces changements de compositions auront à leur tour des effets (difficiles à prévoir) sur les écosystèmes et les services écologiques qu'ils fournissent à

¹⁴ <http://www.scopus.com/>, consulté le 31 janvier 2013

l'homme (Civantos et al. 2012, Staudinger et al. 2012, Prather et al. 2013). Entre autre, les réponses des différents types d'organismes et d'écosystèmes devraient varier considérablement.

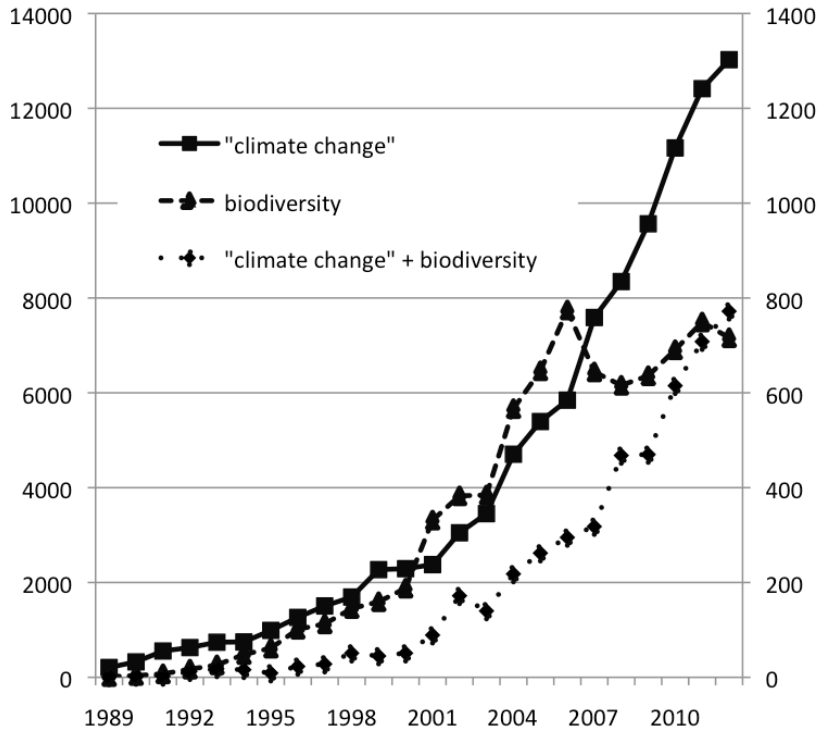


Figure 4.2 : Nombre de publications répertoriées dans le moteur Scopus par année de 1989 à 2012 incluant dans le résumé, les mots clefs ou le titre l'expression « climate change » (carré), « biodiversity » (triangle) ou « climate change » et « biodiversity » (losange). Notez que la recherche « climate change » et « biodiversity » utilise l'axe des Y à droite qui est réduite d'un facteur 10 par rapport à l'axe de gauche. On remarque que le nombre de publications sur la biodiversité en général s'est stabilisé alors que les recherches sur les changements climatiques et sur les changements climatiques et la biodiversité continuent d'augmenter.

4.5.1 Les principaux écosystèmes du Québec

Le Québec est un territoire immense comprenant une succession d'écosystèmes principalement distribués sur l'axe nord-sud. Les milieux terrestres du sud et du centre du Québec sont couverts de forêts desquelles les forêts feuillues du sud (principalement des érablières) laissent peu à peu leur place aux forêts mixtes dominées par les sapins et les bouleaux et, finalement, les grandes étendues de pessières. Ces zones de forêts fermées laissent ensuite place à la forêt ouverte (taïga) et à la toundra plus au nord (voir Figure 3.1). Les différentes forêts denses du Québec (de l'érablière à la pessière) représentent une superficie de 760 000 km² soit 2 % des forêts mondiales. Les deux principaux écosystèmes nordiques, la taïga et la toundra couvrent respectivement 20 % et 24 % de la superficie du Québec¹⁵. Le Québec contient peu de milieux alpins (Figure 6.3), mais quelques populations alpines caractéristiques se retrouvent dans le sud de la province (p. ex., toundra alpine du Mont-Albert en Gaspésie et des Hautes-Georges de la Rivière-Malbaie dans Charlevoix).

¹⁵ http://redpath-museum.mcgill.ca/Qbp_fr/histoire_naturelle/fnat_hist.html

Les milieux humides quant à eux recouvrent 170 000 km², soit 10 % du Québec et sont principalement constitués de tourbières distribuées dans les zones boréales et arctiques¹⁶. Les milieux humides incluent également des marais (zones inondées de façon périodiques principalement en bordure des rivières et lacs), marécage (essentiellement une tourbière ou un marais dominé par des arbres ou des arbustes dus à des eaux riches en minéraux dissous) et des étangs (bassin occupé par de l'eau stagnante de façon permanente ou temporaire) (Warner and Rubec 1997). Le Québec contient également une vaste proportion d'eau douce avec ses 4 500 rivières et son demi-million de lacs représentant 3 % des réserves d'eau douce du monde¹⁷. Ces étendues d'eau sont dispersées dans 450 bassins versant majeurs dont 100 ont une superficie de drainage d'au moins 4000 km²¹⁸.

Ces différents paysages naturels s'imbriquent dans une matrice peu anthropisée où les principales perturbations directes (urbanisation et agriculture) se concentrent au sud (Figure 6.9). L'exploitation forestière est l'autre source principale de perturbation anthropique et est restreinte au sud du 51° nord.

4.5.2 *Milieux arctiques*

La biodiversité des milieux arctiques est peu connue par rapport à celle des autres écosystèmes (Post et al. 2009, Federal, Provincial and Territorial Governments of Canada 2010). Ce manque de connaissances est principalement dû aux nombreux défis financiers (p. ex., coûts élevés des transports), logistiques (p. ex., distance des centres de recherche) et humains (p. ex., nécessité de partir pour de longues campagnes d'échantillonnage) liés à l'échantillonnage du nord. De plus, les milieux nordiques étant peu exploités, comprendre la dynamique de ces écosystèmes a comporté historiquement moins d'incitatifs. Or, dans le cadre des CC, plusieurs raisons rendent le suivi de la biodiversité de ces territoires pertinent. Premièrement, l'arctique est présentement un puits de carbone où il est estimé que les sols gelés en permanence (pergélisol) contiennent 1672 Pg de carbone, soit le double de ce qui est contenu dans l'atmosphère (Tarnocai et al. 2009). Or, avec la fonte du pergélisol, une partie de ce carbone deviendra disponible à la décomposition avec la possibilité que l'arctique devienne un puissant émetteur de gaz à effet de serre (GES), accélérant grandement les CC (IPCC 2007b). Ce relâchement de carbone surviendra si les microorganismes parviennent à décomposer la litière plus rapidement que celle-ci s'accumulera, mais il est difficile de prédire de quel côté la balance penchera.

Il est en effet observé que l'activité microbienne dans l'arctique augmente avec l'accroissement de la température (Nielsen and Wall 2013). Cependant, il est également observé qu'il y a une augmentation de la croissance végétale dans le nord (Convey et al. 2012, McLennan et al. 2012), et ce, particulièrement chez les arbustes au détriment des herbacées. Comme la décomposition des feuilles des arbustes est généralement plus lente que celle des herbacées, il se pourrait donc qu'il y ait accumulation de carbone malgré l'augmentation de l'activité microbienne (Cornelissen et al. 2007). De plus, il est fort à parier que les changements de composition végétale s'accompagneront de changement au niveau des communautés des sols (Nielsen and Wall 2013). Au total, l'effet net de l'augmentation de la température sur la composition des communautés de plantes et d'organismes des sols et, ultimement, sur le bilan de carbone de la

¹⁶ <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/rives/milieuxhumides.htm>

¹⁷ <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/inter.htm>

¹⁸ <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/bassins/index.htm>

région demeure inconnu. Résoudre cette question est de première importance pour comprendre et prédire le climat futur de la planète.

En plus de la nécessité de connaître le destin du carbone des sols arctiques, l'étude de la biodiversité nordique est intéressante pour la conservation et la science. Au niveau de la conservation, la faible diversité des milieux arctiques les rend particulièrement sensibles aux perturbations. En effet, il est reconnu qu'une plus grande diversité augmente la stabilité des écosystèmes, car la redondance des fonctions des organismes implique que lorsqu'un organisme disparaît, un autre peut remplir sa tâche (Loreau et al. 2013). Comme les écosystèmes arctiques ont une faible diversité, la disparition d'une espèce a donc une plus forte probabilité de déstabiliser l'écosystème en entier (Post et al. 2009). De plus, l'arctique est considéré comme l'un des endroits devant subir les plus importants bouleversements dus aux CC. En effet, les CC provoqueront un déplacement vers les pôles et en altitude des enveloppes climatiques entraînant graduellement la disparition des conditions alpines et arctiques actuelles (Ohlemuller 2011). Les organismes habitants les milieux arctiques et alpins seront donc particulièrement sensibles aux CC car ils ne pourront migrer pour suivre leurs conditions environnementales optimales (Parmesan 2006, IPCC 2007b). De plus, il est attendu que les milieux arctiques subiront les plus importantes augmentations de température et une plus grande récurrence d'évènements extrêmes ce qui amplifiera la pression sur les organismes de ces écosystèmes (Post et al. 2009, Nielsen and Wall 2013). En fait, la seule option pour plusieurs des organismes des milieux arctiques sera de s'adapter aux nouvelles conditions environnementales. Il a été montré que de tels adaptations ont présentement court (p. ex., changements phénologiques chez l'écureuil roux; Berteaux et al. 2004), mais les espèces risquent de ne pouvoir suivre la cadence, surtout avec l'accélération attendue des CC. De plus, des espèces provenant du sud et mieux adaptées aux nouvelles conditions entreront en compétition avec les espèces de ces régions risquant de les déloger avant qu'elles puissent s'adapter (p. ex., déplacement du renard arctique par le renard roux en Norvège et en Alaska; Post et al. 2009, Nielsen and Wall 2013). Les communautés arctiques ont déjà commencé à changer, mais leur biodiversité est encore peu connue. Il est donc urgent d'échantillonner ces habitats afin d'établir des points de référence à laquelle l'on pourra comparer la diversité future de ces écosystèmes afin de déterminer ce qui y a changé et en comprendre les conséquences (Post et al. 2009, Culp et al. 2012b, Nielsen and Wall 2013).

Les écosystèmes arctiques possèdent également une dynamique particulière dû à l'importante que joue la glace et la neige, deux éléments qui diminueront dû aux CC (Post et al. 2009). Par exemple, la durée du couvert de neige influencent la durée de la saison de croissance et la composition de la végétation (Nielsen and Wall 2013) et l'épaisseur et la durée de la glace influencent l'accession d'espèces tel l'ours polaire (*Ursus maritimus*) à leur nourriture (Derocher et al. 2013). Les changements de couverts niveaux peuvent également avoir des effets inattendus. Par exemple, il a été observé qu'un plus faible couvert de neige peut entraîner des dommages par le froid sur les plantes et réduire la productivité l'été subséquente (Bokhorst et al. 2009). La fonte rapide du pergélisol, de la glace et de la neige pourrait accroître le lessivage des sols et augmenter la quantité de nutriments dans les écosystèmes d'eaux douces et la production primaire (Culp et al. 2012b). Ainsi, le suivi des variables abiotiques (couvert de glace et de neige) par satellite s'avèrera essentiel pour comprendre les changements de biodiversité des milieux nordique.

Malgré tous les changements attendus, les quelques observations à l'heure actuelle ne rapportent pas toujours d'aussi grands effets qu'attendu et varient grandement d'un endroit à l'autre (Post et al. 2009). Par exemple, sur une durée de 60 ans, il a été observé que les changements de diversité chez les abeilles et les papillons de l'arctique Suédois étaient plus faibles qu'escompté malgré un déplacement apparent des espèces vers le nord et en altitude (Franzén and Öckinger 2011). Ces plus faibles changements sont peut-être dus au fait que l'arctique subit naturellement de large variation météorologique et que, conséquemment, les ectothermes nordiques y ont développé une plus grande tolérance aux changements de température (Deutsch et al. 2008). Cependant, dû au peu de connaissance de la diversité nordique, de telles analyses ne peuvent être menées que pour quelques organismes. Ainsi, les vertébrés (principalement les oiseaux) sont considérés comme les seuls types d'organismes pour lesquels on peut dresser des tendances à large échelle pour l'arctique et ils sont d'ailleurs suggérés comme indicateurs de la santé des écosystèmes nordiques (McRae et al. 2012). Cependant, dans le cadre d'un suivi de la biodiversité, se limiter qu'aux seuls vertébrés est réducteur. En fait, afin de comprendre les effets directs et indirects des CC sur les écosystèmes, il semble essentiel de faire le suivi de différents niveaux trophiques (Post et al. 2009). Par exemple, au Groenland, il a été observé que le moment de la mise bas des caribous n'est plus synchronisé avec les pics de productivité des plantes, laissant les femelles caribous avec moins de sources énergétiques et causant une réduction apparente de leur reproduction et de la survie de leur rejetons (Post and Forchhammer 2008). Comprendre ces interactions trophiques et ses répercussions est particulièrement important pour les quelques organismes considérés clefs de voûte comme les lemmings et les campagnols (McLennan et al. 2012).

En conclusion, dû à la faible diversité des milieux nordiques, comprendre les changements de biodiversité de ces milieux pourrait s'avérer plus facile que pour d'autres écosystèmes (di Prisco et al. 2012). La toundra pourrait donc servir de lieu sentinelle et servir d'indication permettant de mieux appréhender les changements qui surviendront au sud. Cependant, le coût élevé d'étudier les milieux nordiques fait que pour un budget donné, moins de sites ou moins d'indicateurs peuvent être échantillonnés dans les latitudes nord que sud. Il est par conséquent difficile d'évaluer si le gain de connaissance acquis en étudiant un système plus simple puisse compenser la diminution de données récoltées dans ces lieux. Comme les milieux alpins subiront le même genre de perturbations que les milieux nordiques, étudier les quelques milieux « alpins » situés au sud (p. ex., végétations de type toundra du Parc des Grands Jardins et du Parc National de la Gaspésie) pourraient servir de sentinelles afin d'estimer ce qui se passe au nord. Finalement, impliquer les populations autochtones du nord dans l'échantillonnage de leur territoire serait une autre option permettant de diminuer les coûts tout en profitant de leur connaissance du territoire.

4.5.3 *Milieux aquatiques d'eau douce*

Les milieux aquatiques d'eau douce supportent 6 % des espèces décrites bien qu'ils ne représentent que 0.8 % de la surface terrestre (Heino et al. 2009), plusieurs des organismes n'y étant que pour une partie de leur cycle de vie (p. ex., stade larvaire de certains insectes). Or, tout comme les milieux arctiques et alpins, les milieux d'eau douce devraient être l'un des écosystèmes les plus touchés par les CC (IPCC 2007b) et sont considérés comme des milieux sentinelles des effets des CC sur la biodiversité (Woodward et al. 2010). L'une des principales raisons de la sensibilité des milieux aquatiques est qu'hormis certains petits organismes pouvant être transportés par des oiseaux et des mammifères terrestres d'un plan d'eau à l'autre (Woodward

et al. 2010), les organismes aquatiques ont une capacité de dispersion faible. En effet, les organismes tels les poissons doivent constamment demeurer dans l'eau (c.-à-d., ils ne peuvent être transportés par les oiseaux) et ils ne peuvent pas, pour la plupart, transiter des milieux d'eau douce à saline les restreignant ainsi à demeurer dans leurs bassins versants (Jeppesen et al. 2010, Woodward et al. 2010). De plus, dans le sud, la dispersion des organismes aquatiques est limitée par les obstacles humains (p. ex., barrage) et par les conditions changeantes causées par différentes sources de pollution (p. ex., partie de rivière eutrophe). Ainsi, tout comme dans les milieux arctiques, pour plusieurs organismes aquatiques le choix sera de s'adapter ou de s'éteindre.

L'adaptation ne sera cependant pas aisée. Tout d'abord, la variation dans la capacité de disperser des organismes aura de larges effets sur la composition des communautés, car les espèces de poissons demeureront les mêmes alors que le phyto- et le zooplancton risque de changer. Plusieurs petits organismes des milieux changeront non seulement dû à la migration, mais également par l'émergence d'organismes cryptiques en dormance qui profiteront des nouvelles conditions leurs étant favorables (Woodward et al. 2010). Ces changements de composition risquent de causer une séparation spatiale entre proies et prédateurs et d'amplifier les effets des séparations phénologiques également prévues (Woodward et al. 2010). L'adaptation des organismes aquatiques risque également d'être compliquée par l'amplitude élevée des CC attendue dans ces milieux. Par exemple, il est attendu que les lacs de la zone boréale canadienne subissent des augmentations des températures de surface aussi élevées que 18°C (Sharma et al. 2007). Comme les milieux aquatiques sont principalement habités par des organismes ectothermes, donc sensibles à la température ambiante, ces changements pourraient avoir des effets drastiques sur la composition des communautés (Woodward et al. 2010). Ceci est particulièrement vrai pour les organismes sténothermes (avec une faible tolérance aux variations de température; p. ex., les salmonidés) dépendant des eaux froides qui seront désavantagés face aux espèces à large tolérance thermiques (eurythermes; p. ex., carpes) (Lappalainen and Lehtonen 1997, Crozier and Zabel 2006).

Une façon de s'adapter pour les organismes sténothermes sera de s'établir dans des refuges thermiques (p. ex., des fausses profondes). Par contre, ces refuges finiront vraisemblablement par disparaître, et ce, plus rapidement dans les petits cours d'eau et dans les lacs peu profonds, entraînant des changements plus rapides dans ces milieux (Jeppesen et al. 2010). En fait, pour tous les lacs, la stratification thermique changera et la taille de la zone demeurant froide diminuera. L'augmentation de la température de l'eau va également diminuer la quantité d'oxygène dissout, et ce, tout en causant une augmentation de la demande en oxygène. Ainsi, dans les lacs peu profonds où les refuges thermiques seront déjà peu présents, plusieurs espèces pourraient ne plus avoir accès à assez d'oxygène, augmentant ainsi la pression sur ces organismes (Feuchtmayr et al. 2009, Moran et al. 2010). Dans les cours d'eau où il y a de la pollution par des nutriments, ce qui augmente la croissance des algues et diminue d'autant plus l'oxygène, l'effet sera encore exacerbé. L'effet synergétique de l'augmentation de la température et des nutriments sur les poissons a d'ailleurs été expérimenté en mésocosmes où l'effet combiné des deux sources de stress résultait dans la disparition des poissons (*Gasterosteus aculeatus*; Moran et al. 2010). De plus, il est de plus en plus observé que les cyanobactéries seront avantagées par les nouvelles conditions climatiques en association avec la pollution par les nutriments (Lüring and De Senerpont Domis 2013), accentuant les pressions sur les organismes par le relâchement de toxines dans l'environnement.

Les effets des CC sur les écosystèmes aquatiques devraient donc s'accompagner d'une perte d'espèces non aléatoire où les grandes espèces (plus rares) des niveaux trophiques plus élevés disparaîtront en premier affectant l'entière de la chaîne trophique (Jeppesen et al. 2010). Ces changements devraient être particulièrement importants dans les systèmes nordiques (Woodward et al. 2010) où l'augmentation de la température est déjà liée à des changements de compositions (Smol 2005). Par exemple, les poissons prédateurs (les plus à risque d'être affectés par les CC) peuvent contrôler les populations d'invertébrés brouteurs qui, à leur tour, contrôlent le périphyton qui contrôle les populations de plantes (Jones and Sayer 2003, Jeppesen et al. 2010) et leur diminution pourrait avoir de grands effets sur les écosystèmes (Woodward 2009). Ainsi, il est souvent observé qu'il y a une plus forte proportion de petits poissons dans les communautés des lacs plus chauds (dû à l'absence de grands poissons prédateurs), ce qui se traduit par une plus forte prédation sur le zooplancton et une diminution de la taille moyenne des cladocères et copépodes (des zooplanctons) ainsi qu'un changement des ratios zooplancton / phytoplancton (Jeppesen et al. 2010). Un changement dans le ratio zooplancton / phytoplancton est également observé suite aux variations de la couverture de glace interannuelle affectant la survie des poissons (Jackson et al. 2007). Finalement, il a aussi été montré que les poissons habitants des latitudes nordiques (eaux plus froides) ont tendance à croître plus lentement, devenir plus grands, devenir mature plus tard, vivre plus longtemps, et accordé plus d'énergie à la reproduction que des individus plus au sud, et ce, même à l'intérieur des espèces (Blanck and Lamouroux 2006).

Un des groupes les plus étudiés pour les eaux douces est celui des macroinvertébrés benthiques (MIB) dont la composition des communautés est influencée par la température et l'hydrologie. À ce titre, les changements de compositions des communautés de MIB sont utilisés comme indicateurs de changements environnementaux (p. ex., Hamilton et al. 2010, Lawrence et al. 2010) et une liste de taxons préférant les eaux froides aux eaux chaudes peut être trouvée dans Stamp et al. (2010). De nombreux changements de distribution ont déjà été observés chez les MIB avec, jusqu'à présent, une réponse plus marquée chez les odonates probablement due à leur bonne capacité à voler (Heino et al. 2009). Ces organismes sont également sensibles à d'autres perturbations comme la pollution agricole et industrielle ce qui nécessite de les isoler de ces impacts pour comprendre l'effet des CC.

Les CC auront aussi des effets sur les « chaînes trophiques brunes » (de décomposition). Ainsi, des expériences en laboratoire sur des moules (unionidés) ont montré que l'assimilation et le recyclage des nutriments par ces organismes étaient grandement dépendants de la température (Spooner and Vaughn 2008). Il a également été démontré que l'augmentation de la température de l'eau affecte la composition des communautés de champignons aquatiques (hyphomycètes) ce qui change la vitesse de décomposition de la matière organique et des feuilles (Dang et al. 2009). Ces champignons jouent un rôle important en rendant la matière organique plus digestible pour les invertébrés qui à leurs tours aident les champignons en fractionnant la matière organique augmentant ainsi son ratio surface / volume (Jeppesen et al. 2010).

Ces nombreux changements attendus au niveau de la composition des communautés aquatiques auront possiblement des effets au niveau des services écosystémiques, mais ils demeurent difficiles à prévoir. Afin d'aider à prévoir et comprendre ces changements, plusieurs auteurs suggèrent que les traits fonctionnels des organismes soient également suivis, car ils sont plus aptes à expliquer le fonctionnement des milieux aquatiques que la simple diversité taxonomique (Woodward 2009). Ceci est dû au fait que beaucoup d'organismes des milieux aquatiques sont

généralistes et ont des diètes semblables ce qui entraîne une saturation rapide du lien diversité - fonction (Jonsson and Malmqvist 2003, Dang et al. 2009). De ces traits, la taille des organismes est particulièrement importante pour comprendre les chaînes alimentaires des systèmes aquatiques en plus d'être facilement mesurable et devrait donc être contrôlé (c.-à-d., mesuré) dans un suivi de ces milieux (Woodward et al. 2010).

Récemment, Culp et al. (2012b), dans le cadre du "*Arctic Council's Freshwater Expert Monitoring Group of the Circumpolar Biodiversity Monitoring Program*", ont identifié les composantes écosystémiques cibles (*focal ecosystem components* ; des indicateurs) à suivre dans les milieux aquatiques d'eau douce. Ces indicateurs ont pour but de standardiser et coordonner la prise et le type de données pour les suivis de la biodiversité aquatiques nordiques et des protocoles sont également suggérés pour chacun (Culp et al. 2012a). Bien que ces cibles ont été établies pour le milieu nordique, celles-ci s'appliquent également aux milieux tempérés nordiques et boréaux du Québec. Ces indicateurs ont été choisis pour leur sensibilité aux changements environnementaux, leur validité scientifique, leur facilité de suivi et la disponibilité de référence pour certains (Culp et al. 2012b). Les indicateurs suggérés sont la composition du phytoplancton, du zooplancton, des algues benthiques, des invertébrées benthiques, des poissons, des macrophytes aquatiques accompagnés de plusieurs variables abiotiques (régimes thermaux, hydrologies et régimes des glaces, qualités de l'eau, température et le pergélisol). En plus de la diversité (nombre de taxon et quantité d'individus), Culp et al. (2012b) suggèrent de suivre la biomasse totale de phytoplancton, la biomasse totale et par individu (taille) pour les poissons, les macroinvertébrés et les zooplanctons, ainsi que l'âge des individus et leur contamination parasitaire (par exemple chez les poissons). Finalement, ils suggèrent d'échantillonner des rivières et lacs provenant de bassins-versants petits à moyens, car ils seront plus sensibles aux CC, les sites avec une haute diversité et ceux avec des données existantes.

4.5.4 Milieux humides

Les milieux humides sont des écosystèmes inondés ou saturés en eau une partie de l'année où la croissance de plantes a lieu (Parish et al. 2008). À l'échelle de la planète, les milieux humides renferment deux fois plus de carbone que toute la biomasse forestière et 10 % des réserves d'eau douce bien qu'ils ne représentent que 3 % de la surface terrestre (Parish et al. 2008). Au Québec, les milieux humides occupent 10 % du territoire et se présente sous différentes formes (étangs, marais, marécages et tourbières) dont les tourbières sont les plus importantes en superficie¹⁹. Dans le sud du Québec, les milieux humides subissent des pressions anthropiques importantes où ils sont drainés pour laisser place à l'agriculture et à l'urbanisation (diminution de 32 % aux abords du fleuve St-Laurent ; Mitsch and Hernandez 2012) et la tourbe des tourbières est récoltée à des fins agricoles (Environment Canada 2004). Les milieux humides sont également affectés par la pollution atmosphérique (dépôt d'azote) causant une fertilisation de ces milieux généralement pauvres en nutriments et entraînant des changements de compositions (Moore 2002, Wiedermann et al. 2007, Parish et al. 2008). Il pourrait s'avérer difficile de distinguer les effets des CC de ceux des dépôts atmosphériques.

¹⁹ <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/rives/milieuxhumides.htm>

Les milieux humides sont des milieux de haute diversité pour certains groupes taxonomiques. Il est estimé que lorsque les milieux humides représentent 10 % de la superficie d'un territoire, il contiennent de 20 à 30 % des espèces de plantes (particulièrement chez les bryophytes), d'invertébrés et d'oiseaux du paysage dont 5 à 25 % de ces espèces ne vivent strictement qu'en milieux humides (Parish et al. 2008). Les milieux humides sont également essentielles à plusieurs organismes qui y passent une partie de leur cycle de vie (p. ex., oiseaux migrateurs s'arrêtant pour s'y nourrir ; Erwin 2009). Comme les conditions de vie des milieux humides sont particulières (p. ex., anoxie, acidité), l'adaptation à ces milieux nécessite un long temps évolutif et les espèces s'y retrouvant présentent souvent des adaptations uniques et présentent un legs évolutif particulier (Parish et al. 2008). Finalement, comme les milieux humides sont marginaux pour bon nombre d'activités économiques (p. ex., foresterie et agriculture), ils sont souvent les derniers endroits non perturbés dans les paysages et peuvent servir de refuge pour divers organismes (Parish et al. 2008).

Les milieux humides sont uniques parmi les écosystèmes par le fait que la condition abiotique la plus importante y est le niveau de l'eau (Andersen et al. 2013, Junk et al. 2013) et, de ce fait, les effets des CC sur la biodiversité de ces écosystèmes dépendront principalement des effets des CC sur leur bilan hydrique. Par exemple, les effets des CC sur les tourbières minérotrophes, dont l'eau provient principalement du sol, dépendra des changements hydriques au niveau des bassins versants (p. ex., taux de recharge des aquifères). Quant aux tourbières ombrotrophes, pour lesquelles l'eau provient des précipitations, elles seront strictement affectées par les changements au niveau des patrons de précipitations et d'évapotranspiration (Mortsch et al. 2006). Pour les milieux riverains, les changements dans les débits, les crues et les niveaux des rivières, lacs et océans entraîneront des déplacements de la ligne des eaux et forceront les organismes à se déplacer. Étant donné que les organismes dans les milieux riverains ont souvent des taux de croissance faibles, des changements rapides pourraient compromettre leur capacité à suivre le déplacement de la ligne des eaux (Burkett and Kusler 2000, Mitsch and Hernandez 2012). Cette dépendance au niveau d'eau implique que la façon dont l'eau sera gérée dans les zones habitées ou exploitées pourra contribuer ou mitiger les effets des CC sur les milieux humides (Carroll et al. 2011). Cependant, les effets attendus des CC sur les patrons de précipitation sont beaucoup plus imprécis que ceux sur la température (IPCC 2007b). De plus, très peu de sites de suivis et de données à long terme existent dans les milieux humides limitant notre connaissance de ces écosystèmes et, conséquemment, notre capacité d'y prédire les effets des CC (Burkett and Kusler 2000, Cihlar and Tarnocai 2000, Environment Canada 2004). Ainsi, il est estimé que la limite sud des tourbières boréales pourrait être réduite de 200 à 400 km d'ici 2050, mais cette estimation est hautement incertaine (Environment Canada 2004, Junk et al. 2013).

Les niveaux d'eau affectent les milieux humides de plusieurs façons. Par exemple, dans les tourbières, les niveaux d'eau élevés créent des conditions où la croissance des plantes est supérieure aux taux de décomposition entraînant l'accumulation de matière organique sous forme de tourbe (Parish et al. 2008). Or, si les niveaux d'eau baissent, la décomposition n'est plus limitée par la quantité d'oxygène et peut égaler ou surpasser la productivité du milieu affectant le bilan de carbone. Par contre, si les niveaux d'eau dépassent un certain seuil, les plantes ne peuvent plus croître et les milieux humides font places à des milieux aquatiques (Parish et al. 2008). Une diminution des niveaux d'eau peut également entraîner une expansion des arbres dans les milieux humides. Comme les arbres consomment plus d'eau et ont un plus faible albédo que les plantes qu'ils remplacent, ce processus peut accélérer l'assèchement des

milieux humides et avoir une rétroaction positive sur le réchauffement du climat (Moore 2002, Parish et al. 2008). Les effets des CC sur les milieux humides dépendront donc des patrons de précipitations (quantité et distribution) et des changements au niveau des bassins versants (p. ex., capacité de rétention d'eau) tandis que la température agira de façon indirecte en modifiant les taux d'évaporation (Moore 2002).

La biodiversité des tourbières est en lien avec les plantes qui y sont dominantes (elles-mêmes influencées par les niveaux d'eau), car celles-ci influencent les caractéristiques physico-chimiques du milieu (p. ex., l'acidité de l'eau) et la nature de la matière organique. L'observation des plantes et des niveaux d'eau est donc essentielle à tout suivi de ces milieux (Parish et al. 2008). Habituellement, les communautés des tourbières (plantes et autres organismes associés) sont stables et, ainsi, un petit changement de composition peut indiquer un grand changement dans l'environnement (Parish et al. 2008). En effet, les plantes des tourbières ont une forte diversité intra-spécifique et une haute plasticité phénotypique leur permettant de s'adapter à diverses conditions (Parish et al. 2008, Orwin and Ostle 2012). Un changement de composition implique donc que les conditions ont assez changé pour surpasser ces différents niveaux adaptatifs à l'intérieur des espèces. Les changements de proportion entre les bryophytes et les plantes vasculaires ont le potentiel d'avoir les plus larges répercussions sur ces écosystèmes et de modifier les dynamiques d'accumulation de matières organiques (Turetsky et al. 2008, Aerts et al. 2009, Lang et al. 2009). Cependant, quelques expériences et suivis à long terme existant en milieux humides montrent que les communautés végétales des milieux humides semblent pour l'instant stable face aux variations de température (Hájková et al. 2011, Keuper et al. 2011, Lang et al. 2012), et ce, malgré le fait que des changements de performance en fonction de la température et des niveaux d'eau soient observés dans les expériences en laboratoire (p. ex., Robroek et al. 2007). Au final, même si les effets sont peut apparent à l'heure actuelle, il est fort à parier que l'effet combiné de l'augmentation du CO₂, de l'élévation de la température, de la pollution atmosphérique (notamment les dépôts d'azote) et des changements hydriques affectera la productivité et la composition végétale de ces écosystèmes.

Hormis les changements chez les plantes, l'impact des CC sur la composition des communautés de micro-organismes responsable de la décomposition et de la production de méthane est de grande importance pour le bilan de carbone de ces écosystèmes (Mitsch et al. 2012). Or, la diversité des microorganismes des tourbières (bactéries, archéobactéries, protistes, algues et champignons) est probablement élevée, mais peu connue et le lien entre cette composition et les services écosystémiques est mal compris (Andersen et al. 2013). En fait, selon Andersen et collaborateurs (2013), la question la plus urgente à répondre est « Quels sont ces micro-organismes? ». Plusieurs de ces organismes ne pouvant être cultivés en laboratoire, ce n'est que tout récemment avec l'ADN environnemental que l'on peut commencer à comprendre le lien entre ces organismes et les importants services rendus par les milieux humides. Du peu qui est connu, il semble que la composition des communautés de micro-organismes dépend plus de la chimie et de la composition végétale du milieu humide que de la température (Andersen et al. 2013). Des expériences de CC artificielles en milieu naturel n'ont d'ailleurs pas entraîné de changements dans la composition des communautés bactériennes bien que la biomasse totale a été affectée (Weedon et al. 2012). Les connaissances sont encore plus superficielles au niveau des communautés de champignons, également importantes pour la décomposition (Andersen et al. 2013), et chez les archéobactéries responsables de 20 à 25% de toutes les émissions de méthane atmosphérique (Junk et al. 2013). Au final, la capacité des milieux humides de

demeurer des puits de carbone, comme cela semble toujours être le cas (Nilsson et al. 2008), va dépendre de la composition en plante et de l'importance relative des processus aérobiques versus anaérobiques (responsable de la production de méthane) dictée par les compositions de micro-organismes (Parish et al. 2008). Les CC, via les changements des niveaux d'eau et des communautés végétales, affecteront la composition des communautés d'autres organismes habitants les tourbières (p. ex., les amibes à thèque, des indicateurs paléo-climatiques très utilisés ; Jassey et al. 2011, Tsyganov et al. 2012) et rendront ainsi les communautés, déjà sous stress, plus vulnérables à l'invasion par des espèces exotiques (Junk et al. 2013). Cependant, le destin de ces organismes est dur à prévoir et dépendra du destin des végétaux.

4.5.5 *Milieux forestiers*

Les forêts rendent de nombreux services écosystémiques nécessaires à la vie humaine (p. ex., bois, énergie, filtration de l'air). Les arbres, responsables de la majeure partie de la production primaire, de la consommation d'eau, de la séquestration des nutriments et de la biomasse (p. ex., Stahlschmidt and Bruehl 2012, Taylor 2012), sont à la base de ces services. Comme les différents stades de vie et espèces d'arbres n'influencent pas l'environnement de la même façon (p. ex., différent ratio C : N et interception de la lumière), la composition arborescente et le stade de succession des forêts influencent fortement la composition des autres organismes forestiers. Ainsi, de nombreuses espèces fauniques, fongiques et bactériennes se trouvent étroitement associées à des types de forêts ou des stades de succession particuliers (Rustad et al. 2012). Or, tant la composition arborescente que la structure d'âge des peuplements risquent d'être affectées par les CC entraînant des répercussions sur les communautés forestières entières.

La première façon dont les CC affecteront la dynamique forestière est en modulant la croissance des arbres de façons différentielles, changeant ainsi la balance des interactions compétitives et, ultimement, la composition forestière (Forget et al. 2003). Entre autres, il a été démontré que l'augmentation du CO₂ entraîne des réponses de croissances différentes entre les espèces (Zhang and Dang 2007). Cependant, l'effet à long terme de l'augmentation du CO₂ est incertain, certaines espèces retournant à une croissance normale après un certain temps et l'effet étant surtout visible chez les jeunes arbres (Long et al. 2004, Kallarackal and Roby 2012). Contrairement à l'effet du CO₂, l'effet des modifications de température et de précipitations sur la croissance des arbres semble se maintenir dans le temps (Skre and Næss 1999, Zhang and Dang 2007) tout en différenciant en fonction des espèces (p. ex., Lopatin 2007, Way and Sage 2008). Ces changements de croissance peuvent prendre des directions inverses pour des espèces concurrentes (p. ex., peuplier faux-tremble et épinette noire ; Drobyshev et al. 2012). L'augmentation de la température modifiera également la capacité des espèces à interagir avec leurs champignons mycorhiziens essentiels à l'absorption de l'eau et des nutriments (Lukac et al. 2003, Johnson et al. 2005). La diminution du couvert de neige modifiera l'isolation des sols et affectera la croissance des arbres de façon différente (Frechette et al. 2011). Finalement, l'augmentation de la température modifiera la vitesse de décomposition de la matière organique et la disponibilité en nutriments (Emmett et al. 2004). Comme les différentes espèces d'arbres ne sont pas limitées par les minéraux de façon équivalente (Bigelow and Canham 2007), une remise en circulation plus rapide des nutriments pourrait modifier la capacité de croître des espèces de façon non proportionnelle. Tous ces changements se produisent également chez les plantes de sous-bois (herbacées et arbustes) où des changements de dominance et une augmentation des proportions en espèces ligneuses pourraient survenir (Kallarackal and Roby 2012). De plus,

l'augmentation du CO₂ semble provoquer une augmentation de la surface foliaire (*leaf area index*) chez les arbres, ce qui modifie la quantité de lumière atteignant le sous-bois et y influence d'autant plus la flore s'y trouvant (Kallarackal and Roby 2012).

L'effet combiné de ces facteurs sur le succès des différentes espèces d'arbres et la composition forestière est difficilement prévisible (Kallarackal and Roby 2012). Par exemple, contrairement aux attentes, 59 % des espèces d'arbres aux États-Unis présentent une contraction de leur aire de répartition, alors que seulement 21 % présentent une expansion vers le nord (Zhu et al. 2012). L'avenir des systèmes forestiers reste donc difficile à prévoir. Cependant, comme les phases de régénération dans les écosystèmes forestiers sont plus dynamiques que les forêts matures (c.-à-d., une plus grande densité et mortalité ; Kozlowski 2002), les effets des CC risquent d'y être visible plus rapidement.

Les CC affecteront également les arbres et les forêts en modifiant la fréquence et l'intensité des perturbations naturelles (principalement épidémie d'insectes et feu). Par exemple, l'ouest canadien est déjà aux prises avec des épidémies de dendrochtone du pin attribuées à l'augmentation des températures hivernales diminuant la mortalité de cet insecte (Bentz et al. 2010). Au Québec, les forêts sont affectées de façon récurrente par des épidémies de tordeuse des bourgeons d'épinette (*Choristoneura fumiferana*) causant la destruction de vastes étendues de forêts résineuses et, dans une moindre mesure, par la livrée des forêts (*Malacosoma disstria*) s'attaquant aux forêts feuillues. Les CC affecteront les cycles de reproduction de ces insectes, la synchronie trophique entre ravageurs-hôtes, mais également la valeur nutritive des arbres (p. ex., ratio C : N, concentration en tanins) ce qui pourraient augmenter ou diminuer la fréquence et l'intensité des infestations (Bale et al. 2002, Forget et al. 2003, Long et al. 2004, Zvereva and Kozlov 2006). De plus, des pathogènes normalement non nuisibles ou provenant du sud pourraient faire leur apparition avec l'augmentation des températures (Forget et al. 2003, Rustad et al. 2012).

Les CC agiront sur la fréquence, l'intensité et la longueur de la saison des feux, l'autre perturbation majeure des forêts boréales québécoises (Soja et al. 2007). Les changements dans le régime des feux affecteront directement les espèces dont le cycle de vie dépend directement des incendies (p. ex., pin gris, bleuets et orignaux) et modifiera la structure d'âge et de composition des forêts dans le paysage (Forget et al. 2003, Soja et al. 2007). En fait, la modification du régime des feux, plus que l'augmentation de la température, risque d'être le principal facteur de changements de la forêt boréale (Soja et al. 2007). Tous ces changements de compositions et de perturbations forestières pourront interagir avec le climat en entraînant la libération ou la capture de larges quantités de carbone et en changeant l'albédo des forêts (Chapin III et al. 2004).

Les premiers signes évidents de l'effet des CC en milieu forestier se situent au niveau des changements de phénologie des espèces. Bien que des changements phénologiques ont été observés chez des espèces animales (p. ex., la date des chants d'accouplement chez les anoues et les dates de migrations chez les oiseaux), la majorité des études à ce sujet ont été faites chez les plantes (Parmesan 2006). Globalement, la date de débourrement des bourgeons et l'éclosion des fleurs surviennent plus tôt au printemps (Cook et al. 2012, Wu and Liu 2013). Les plantes réagissent de cette façon à l'augmentation des températures printanières, mais également aux changements de températures et précipitations automnales et hivernales (Cook et al. 2012, Wu and Liu 2013). Des hivers plus chauds peuvent également retarder le débourrement printanier chez certaines plantes (Cook et al. 2012). Les changements de phénologies pourront avoir de très

grande répercussion, particulièrement en affectant la synchronie des interactions prédateurs - proies, pathogènes - hôtes et pollinisateurs - plantes. En général, la synchronie des espèces s'en trouve diminuée (Rogers et al. 2013).

Les organismes autres que les plantes seront également affectés directement par les CC en fonction de leur tolérance physiologique. Ces changements ont le potentiel d'influencer à leur tour la composition des peuplements forestiers (Feddema et al. 2005). Cependant, hormis pour les oiseaux, peu d'information existe en milieu forestier (Boutin et al. 2009). Par exemple, dans le nord-est de l'Amérique du Nord, les connaissances sur les insectes se limitent à quelques groupes taxonomiques (lépidoptères et coléoptères) dont on ne sait pas s'ils sont représentatifs des insectes en général (Rodenhouse et al. 2009). En Europe, où le suivi de ces organismes est plus étroit, les odonates sont les insectes qui ont subi les plus importants changements de répartitions (McKown et al. 2012). Des changements au niveau de la composition des invertébrés des sols sont également attendus (p. ex., augmentation de la présence des vers de terre), avec la possibilité d'affecter la composition végétale des forêts (Araujo and New 2007). Les insectes, avec leur courte durée de vie et leur haut niveau de spécialisation, risquent d'être dans les premiers organismes à réagir (Rodenhouse et al. 2009). D'intérêt particulier sera le voltinisme des espèces (c.-à-d., le nombre de générations par année) qui pourra être augmenté par l'allongement de la saison de croissance et l'accélération de la croissance causés par l'augmentation des températures (Rodenhouse et al. 2009).

La réaction des mammifères est également peu connue. Par exemple, il a été observé que les rongeurs du nord-est des États-Unis se sont fortement déplacés vers le nord au cours du dernier siècle (Myers et al. 2009), mais les conséquences de ces déplacements sont inconnues. Le chevreuil remplace de plus en plus l'orignal vers le nord ce qui pourrait avoir une influence sur la composition forestière alors que le chevreuil se nourrit plus des feuillus que l'orignal (Araujo and New 2007). De plus, le broutage des feuillues et du sapin baumier (*Abies balsamea*) par les cervidés pourrait augmenter avec la diminution du couvert nivale ce qui pourrait limiter la migration des feuillus vers le nord (Rodenhouse et al. 2009, Post 2013). Les chauves-souris, déjà affectées par le syndrome du nez blanc, une infection fongique causée par *Geomyces destructans* (Stainforth et al. 2005), seront particulièrement sensibles à tout élément affectant leur réserve énergétique (p. ex., désynchronisation avec leurs proies).

Les amphibiens, un groupe contenant beaucoup d'espèces menacées et représentant une partie importante de la biomasse vertébrée forestière, risquent d'être les organismes forestiers les plus affectés par les CC (Rodenhouse et al. 2009). En effet, ces organismes sont dépendant d'hydropériode spécifique qui risque de changer avec les CC ce qui pourrait fortement affectés la reproduction et la survie de ces organismes (Parmesan and Yohe 2003, Parmesan 2006, Rustad et al. 2012). De ce fait, plusieurs amphibiens ont déjà modifié leur période d'accouplement pour s'adapter aux nouvelles conditions (Parmesan 2006, Rodenhouse et al. 2009). Dû aux changements d'utilisation des terres, à des infections fongiques causées par *Batrachochytrium dendrobatidis* et aux CC, les amphibiens sont déjà le groupe de vertébrés dont les populations diminuent le plus rapidement à l'échelle mondiale (Walther et al. 2002). Dans le nord-est de l'Amérique du Nord, les infections à *B. dendrobatidis* sont la source la plus importante du déclin de ces organismes (Walther et al. 2002).

Quant aux oiseaux, ils sont, et de loin, le groupe le plus étudié. Ils sont représentés dans pas moins de 37 % des programmes de suivi en Europe (Henry et al. 2008) et ils sont le sujet de

75 % des atlas du monde (Greenwood 2007). Globalement, la tendance des populations d'oiseaux forestiers au Canada est neutre depuis 40 ans, bien que les tendances spécifiques des différentes espèces varient considérablement (Initiative de conservation des oiseaux de l'Amérique du Nord 2012). Beaucoup des espèces subissant des déclin sont des espèces migratrices dont le déclin pourrait être causé par des changements dans leur aire d'hivernage (Initiative de conservation des oiseaux de l'Amérique du Nord 2012). Les espèces d'oiseaux associés à des types particuliers d'écosystèmes (p. ex., les pics avec les vieilles forêts) et les spécialistes risquent d'être particulièrement affectés par les changements de compositions et de structure forestière dans les paysages (Rodenhouse et al. 2009). Les insectivores (y compris les chauves-souris) vont également être affectés par les changements de précipitations, car une vaste partie des insectes volants leur servant de nourriture ont une phase larvaire aquatique (Rodenhouse et al. 2009).

Les micro-organismes, possiblement plus que les autres groupes taxonomiques majeurs, ont la possibilité de fortement mitiger ou exacerber les effets des CC sur les écosystèmes et les services que l'on en retire, mais ils demeurent les organismes les moins étudiés et ceux pour lesquels l'effet des CC demeurent les plus nébuleux (Johnson and Tyack 2003, Balmford et al. 2005, Music and Caya 2007). De ce qui est su et attendu, la composition en micro-organismes des sols devrait principalement être affectée par les changements de composition, de physiologie et de morphologie chez les plantes (p. ex., architecture racinaire modifiée ; Johnson and Tyack 2003). Au niveau des variables abiotiques, les changements de températures semblent affecter plus fortement l'abondance des micro-organismes alors que les changements de précipitations influencent plus fortement leur diversité (IPCC 2007a). Jusqu'à présent, les expériences indiquent que la réponse à l'augmentation de CO₂ des mycorhizes et des bactéries en association avec les plantes sont généralement positives (c.-à-d., leur abondance augmente) alors que les changements de température ont des effets variables (Anderson et al. 1996). Si des changements positifs se concrétisent chez les mycorhizes et les bactéries de la rhizosphère, ces changements ont le potentiel d'aider les plantes à résister à différents stress associés aux CC (Anderson et al. 1996).

Le réajustement des communautés forestières aux CC dépendra en large partie de la capacité des organismes à migrer pour suivre leurs conditions climatiques optimales. À ce niveau, les organismes ne partent pas tous équivalents et les insectes volants, les oiseaux et certains mammifères devraient être avantagés. Cependant, chez les arbres, il a été déjà montré que même les espèces à graines légères et reproduction rapides (p. ex., peupliers et bouleaux) ne devraient pas être capable de suivre la cadence des CC (Nathan et al. 2011). La migration des espèces d'arbres devrait également être ralentie par les différences au niveau des sols et de la géomorphologie qui empêcheront plusieurs espèces de s'établir (Forget et al. 2003). La migration sera également affectée par la fragmentation du territoire induite par les coupes forestières, l'agriculture et l'urbanisation (Forget et al. 2003). Cependant, les coupes forestières, en éliminant la compétition, pourraient aider les espèces intolérantes à l'ombre à migrer en offrant des milieux exempts de compétiteurs. Finalement, en milieu forestier comme ailleurs, les CC interagissent avec d'autres perturbations (p. ex., pluie acide) avec des effets encore plus imprévisibles (Parmesan et al. 2011). Les effets des CC sur les forêts seront probablement importants et les forêts de demain, même les plus résilientes, devraient basculer vers des compositions ne ressemblant pas aux compositions actuelles (Thompson et al. 2009, Rustad et al. 2012).

4.5.6 Facteurs de risques des espèces

Tous les organismes seront affectés par les CC. Ils le seront plus ou moins rapidement, plus ou moins intensément, mais il y a peu de doutes sur le fait que tous les organismes seront touchés. En effet, même les organismes pouvant bien tolérer l'influence directe des CC seront affectés de façons indirectes *via* les changements que provoqueront les CC chez les espèces avec lesquelles ils interagissent (p. ex., proies, prédateurs, symbiontes, compétiteurs, parasites). De plus, ces organismes pourraient également être affectés par des événements extrêmes plus difficiles à prédire. Cependant, même si l'on peut affirmer que tous les organismes seront affectés, prédire le résultat net de ces changements sur la démographie et les risques d'extinction des organismes demeure ardu. Par exemple, en Suisse où le plus vaste programme de suivi de la biodiversité a lieu, le déplacement de plusieurs espèces et l'arrivée de nouvelles sont observés sans toutefois que des prédictions d'extinction des espèces puissent être faites avec un haut niveau de confiance (Vittoz et al. 2013). Cette difficulté réside dans la complexité des changements attendus, dans le fait que la résistance physiologique aux variations de conditions abiotiques de la majorité des espèces est inconnue et également dans le fait que les éléments qui causeront les plus grands changements sont probablement inconnus (p. ex., des patrons complexes d'évènements extrêmes ; Parmesan et al. 2011).

Ceci étant dit, quelques caractéristiques augmentant la sensibilité des espèces aux CC peuvent être identifiées. Ainsi, les organismes sensibles sont principalement ceux vivant dans des écosystèmes isolés (p. ex., sommet d'une montagne), avec une faible capacité de dispersion, dépendant d'une ou peu de source de nourriture ou d'habitats (p. ex., chenille se nourrissant d'une espèce de plante), sensibles à des hydropériodes particulières, ayant des traits d'histoire de vie avec une courte fenêtre de temps (p. ex., période de reproduction synchronisée sur quelques jours), déjà vulnérables (p. ex., dû à des maladies, à l'exploitation ou à la pollution) ou ayant une faible diversité intraspécifique (Parmesan 2006, Behera and Kushwaha 2012, Hering et al. 2009, Rodenhouse et al. 2009, Rustad et al. 2012). Jusqu'à présent, les espèces ayant une distribution restreinte sont celles ayant subi les plus fortes contractions de leurs distributions (Parmesan 2006). À l'opposé, il est possible que l'évolution permette à certaines espèces de s'adapter aux nouvelles conditions. Toutefois, l'évolution devra être rapide afin de compenser la vitesse des CC. À ce niveau, les organismes avec un voltinisme élevé (généralement les petits organismes), une large progéniture, une large population initiale et une variation intraspécifique élevée seront avantagés (Bell and Gonzalez 2009, Gonzalez et al. 2013). Par exemple, il est déjà observé que certaines espèces de libellules ont développé des ailes plus grandes améliorant la dispersion et leur permettant de mieux suivre les conditions qui leur sont favorables (Parmesan 2006). La très grande variation de réponses possibles des organismes implique qu'une utilisation de nombreux indicateurs est nécessaire afin de comprendre l'impact des CC sur la biodiversité (Dawson et al. 2011). Dans ce contexte, il est également nécessaire de déterminer la capacité des indicateurs à distinguer, du moins en partie, la contribution des CC par rapport à d'autres perturbations dans le système. Ceci est important, car, à l'échelle régionale, une des mesures d'adaptation qui risque de s'avérer la plus efficace est d'agir sur les stress non climatiques sur lesquels on a un contrôle plus élevé (Heller and Zavaleta 2009, Behera and Kushwaha 2012).

4.6 Sondage sur les priorités de suivi

Pour nous aider dans le choix des indicateurs, nous avons demandé à de nombreux professionnels de nous fournir des questions auxquels devraient répondre un suivi de la biodiversité en fonction des CC au Québec. Ces questions (Annexe A) ont été prises en considération lors du choix des indicateurs (section 4.9), mais ont également inspiré un plus large sondage auquel 621 personnes ont répondu. Les détails de ce sondage et des résultats sont disponibles dans le chapitre 2. Nous présentons ici les éléments en lien avec le choix des indicateurs.

Premièrement, la majorité des participants souhaitent que le programme de suivi couvre tout le Québec. De plus, les participants désirent que le programme se concentre sur les milieux naturels, soit les milieux humides, forestiers et aquatiques d'eau douce (lacs et rivières). Ainsi, idéalement, les indicateurs devraient refléter cette perspective en étant reproductibles sur l'ensemble du territoire (c.-à-d., du nord au sud et d'est en ouest) et s'appliquer aux milieux naturels. Au niveau des organismes à suivre, les espèces rendant des services écosystémiques (p. ex., les bourdons pour la pollinisation), les espèces menacées et vulnérables et les espèces envahissantes ont été les plus choisies par les participants (41 à 46 % des participants). Les espèces sauvages à importance économique, les espèces communes et les espèces rares (mais pas en danger) ont également été sélectionnées par environ 20 % des participants. Finalement, les espèces emblématiques, souvent utilisées en conservation, ont peu été sélectionnées par les participants (3 %). Les participants souhaitent que l'on favorise un plus grand nombre de sites par rapport à un plus grand nombre d'indicateurs. Finalement, nous avons explicitement demandé aux participants s'ils favorisaient un programme de suivi basé sur la génération de signaux d'alarme ou sur la génération des connaissances scientifiques. À cette question, 57 % des répondants ont choisi un programme générant des connaissances scientifiques.

4.7 Consultations pour déterminer des indicateurs pour le Québec

Nous avons fait plusieurs consultations afin de nous aider à déterminer des indicateurs de biodiversité pour le Québec. La plus grande d'entre elles a consisté en une rencontre de 2 jours réunissant 33 spécialistes de différents groupes taxonomiques. Le compte-rendu de cette rencontre (Annexe C) expose les éléments portés à notre attention lors de cette rencontre, soit, les espèces ou groupes d'intérêts pour les taxons principaux (p. ex., taxons menacées, économiquement importants), les types de mesures pouvant être prises, les difficultés de suivre les différents organismes, les suivis existants, les connaissances taxonomiques de la province ainsi que d'autres éléments. Ces consultations nous ont aidés à faire le choix d'indicateurs en nous éclairant sur différentes caractéristiques des principaux groupes taxonomiques et leurs liens avec les CC.

4.8 Les suivis de biodiversité existants au Québec

Un des éléments importants à prendre en considération dans le choix des indicateurs est ce qui est déjà ou a déjà été fait comme suivi au Québec. La connaissance des suivis existants peut influencer le choix des indicateurs de plusieurs façons. Premièrement, si un indicateur est déjà

suivi à grande échelle, dupliquer les mêmes mesures sur le même territoire apparaît comme un investissement inapproprié. Dans ce cas, s'il est possible de partager les données, ils seraient avantageux d'obtenir des ententes avec les détenteurs des données plutôt que de doubler l'effort d'échantillonnage. Deuxièmement, les données et suivis existants (actifs ou discontinués) permettent de comparer les mesures contemporaines à des références historiques plus tardives où l'emprunte des CC était moindre. Troisièmement, plusieurs suivis existent dans les différents ministères québécois et un suivi de la biodiversité pourrait s'intégrer dans l'un de ceux-ci et, ainsi, créer des synergies et des diminutions de coûts. Finalement, la connaissance des suivis existants au Québec permet d'identifier des lacunes au niveau de la couverture taxonomique et spatiale pouvant influencer le choix des indicateurs.

Dans ce cadre, nous avons identifié une grande quantité de programmes de suivi, d'atlas et de base de données pour la province (Annexe D, un fichier Excel disponible à part). Un exercice similaire a également été effectué par Lepage (2012). Nul doute que d'autres suivis que ceux inscrits dans ces listes existent, mais il est difficile d'accéder à cette information et il est également difficile d'obtenir la collaboration des gestionnaires et des scientifiques pour qu'ils nous transmettent les méta-données des suivis (c.-à-d., qu'ils nous disent qu'elles mesures sont prises). Un effort devrait d'ailleurs être fait à l'intérieur des différents ministères et universités afin de centraliser l'information sur les différents suivis existants.

Du nombre des suivis répertoriés, peu sont faits à grande échelle avec un protocole appliqué à l'ensemble des sites. Les suivis les plus importants du genre sont les suivis liés aux ressources naturelles effectués par les différents ministères (suivis forestiers centrés sur l'arbre, données de chasse, pêche et trappage, suivi ichtyologique du fleuve) et les suivis faits par des regroupements citoyens (principalement oiseaux, mais également amphibiens et reptiles, phénologie des plantes, ver de terre). Cette situation est commune à l'échelle planétaire alors que les oiseaux sont les animaux les plus suivis de la planète (grâce aux ordres d'ornithologues amateurs) et que les organismes exploités sont suivis régulièrement afin d'en planifier et contrôler l'extraction. On peut remarquer dans cette liste que la majorité des groupes taxonomiques majeurs (p. ex., champignons, bactéries, les plantes hormis les arbres, la majorité des invertébrés terrestres) ne font l'objet d'aucun suivi. Les macro-invertébrés aquatiques font l'objet de suivis depuis peu. De plus, les suivis sont tous concentrés dans le sud de la province où se trouve la majorité de la population et des activités économiques.

Tel que mentionné, les principaux problèmes liés à l'utilisation des données existantes sont que leurs existences demeurent souvent inconnues et, encore plus problématiques, celles-ci se trouvent sous la supervision de différents organismes et individus plus ou moins ouverts à l'idée de les partager. Cependant, la collecte de la plupart de ces données, surtout ceux se retrouvant à l'intérieure des différents ministères provinciaux, a été financée par le gouvernement du Québec et il nous apparaît logique que le gouvernement puisse les utiliser pour déterminer l'état de la biodiversité dans la province. Ici nous ne suggérons pas que ces données deviennent publiques, mais qu'une politique décrivant comment un employé d'un ministère peut accéder aux données récoltées par ce même ministère soit établie. Cet élément est souvent problématique qu'il y parait. De plus, nous croyons et suggérons qu'un effort important devrait être fait pour répertorier l'entièreté de ces suivis et de les décrire. Cela nécessiterait probablement l'embauche d'une personne responsable de contacter les chercheurs et les aménagistes afin de créer la base de méta-données (les données sur les données, qu'est-ce qui est mesurée où). Au final, cette base

de métas-données permettrait d'économiser en diminuant le dédoublement de prise de données déjà existantes. À cet effet, lorsque cette base de méta-données sera faite, un chercheur du gouvernement ou d'ailleurs pourrait être mandaté pour déterminer quels indicateurs de l'effet des CC sur la biodiversité pourraient être calculés à partir des suivis existants. Il fait peu de doute que de nombreux indicateurs pourraient être mesurés à partir de ceux-ci. Sommes toutes, ces indicateurs seraient probablement les moins dispendieux à calculer, car il ne nécessiterait qu'effectuer de nouvelles analyses sur des données existantes.

4.9 Suivi avec sites extensifs et sites intensifs

La mise en place d'un programme de suivi de la biodiversité est une entreprise coûteuse. Ceci est d'autant plus vrai lorsque l'on désire suivre des organismes pour lesquels le traitement et la prise des échantillons demandent de l'équipement ou de la main-d'œuvre spécialisée ou lorsque le temps de traitement est élevé (p. ex., identifier des insectes ou des araignées à l'espèce). Ces coûts élevés font que plusieurs organismes ne sont tout simplement pas suivis. Une possibilité pouvant servir à diminuer les coûts est de mettre en place un programme de suivi où l'on retrouve deux types de sites, des sites extensifs où des mesures de base sont prises (possiblement des mesures moins onéreuses) et des sites intensifs où, en plus des mesures de base, des mesures additionnelles sont effectuées (di Castri et al. 1992). Ces mesures additionnelles peuvent servir à approfondir les mesures sur des taxons donnés (p. ex., abondance des insectes sur les sites intensifs et présence/absence sur les sites extensifs) ou s'étendre à d'autres. Ces mesures additionnelles peuvent ainsi servir à vérifier la précision et le biais des mesures utilisées aux sites extensifs. Elles peuvent également permettre de vérifier si les taxons mesurés aux sites extensifs peuvent servir de substitut (*surrogate*) pour extrapoler la diversité des taxons uniquement mesurés dans les sites intensifs (di Castri et al. 1992). di Castri et al. (1992) conseillent à ce propos de situer des sites extensifs à proximité de sites intensifs afin de pouvoir évaluer l'effet de la variation régionale et ainsi s'assurer que les sites intensifs ne varient pas des sites extensifs seulement dus à la variation dans leur localisation respective.

4.10 Des indicateurs pour un suivi de la biodiversité lié aux CC

4.10.1 La multitude d'indicateurs, les défis liés à leur choix

Tel que mentionné précédemment, tous les organismes seront d'une manière ou d'une autre affectés par les CC et, conséquemment, dépendant des questions auxquelles le programme de suivi doit répondre, tous les organismes ont le potentiel de servir d'indicateurs afin de détecter les effets des CC. Or, identifier ces questions n'est pas une tâche facile. Lors d'un appel fait à de multiples professionnels de la biodiversité au Québec, plus de 140 questions d'intérêts ont été reçues (Annexe A). Répondre à chacune de ces questions dans le cadre d'un suivi de la biodiversité serait irréaliste et il est donc nécessaire de prioriser les questions les plus importantes. Cependant, prioriser ces questions s'est également avéré difficile, car les opinions à ce sujet diffèrent grandement en fonction des intérêts de chacun. Conséquemment, malgré un large sondage, peu de tendances ne se sont dégagées pour la majorité des questions posées (voir Chapitre 3). Les quelques points sur lesquels la majorité des répondants se sont entendus se limitant à un désir de couvrir le Québec entier, se concentrer sur les écosystèmes naturels, sur les

espèces en lien avec les services écologiques, les espèces menacées et les espèces envahissantes et se centrer sur un programme axé sur le développement des connaissances scientifiques.

En plus de ces éléments de réponse, il est clair suite aux revues de littérature effectuées et en consultant la liste des suivis existants au Québec qu'ils existent de grandes lacunes au niveau des connaissances de la biodiversité dans la province. Plusieurs de ces lacunes ont été identifiées dans un rapport sur l'état de la biodiversité au Canada (Federal, Provincial and Territorial Governments of Canada 2010) où il est ressorti que peu ou pas d'information sont disponible à propos :

- des réseaux trophiques,
- d'éléments démographiques (p. ex., abondance et reproduction),
- des processus et des services écologiques (p. ex., pollinisation et décomposition),
- de la diversité et des processus des écosystèmes aquatiques, des milieux humides, des forêts boréales et des zones côtières,
- des milieux loin des centres de populations (p. ex., arctique)
- du pergélisol,
- de plusieurs groupes d'espèces importants pour le maintien des écosystèmes (p. ex., micro-organismes, la plupart des espèces non commerciales),

De telles lacunes ne sont pas observables qu'au Canada, mais généralisées à l'ensemble de la planète (p. ex., Balmford et al. 2005, Boutin et al. 2009). L'établissement d'un nouveau programme de suivi de la biodiversité apparaît comme une occasion unique de pallier à certaines de ces lacunes. De plus, la majorité des participants au sondage ont démontré de l'intérêt dans la même direction (intérêts envers les espèces en lien avec les services écosystémiques, pour une couverture complète de la province et pour améliorer les connaissances scientifiques).

Cependant, la majorité de ces lacunes ont une cause commune, c'est-à-dire qu'étudier ces éléments implique des coûts plus élevés que les mesures plus communes des systèmes de suivi (p. ex., présence/absence au lieu d'abondance, mesures centrées sur des groupes faciles à identifier comme les vertébrés). Or, le budget qui sera alloué au programme de suivi est inconnu ce qui limite notre capacité à établir des questions et des indicateurs réalistes, car ce qui est réalisable dépend ultimement de l'investissement qu'est près à allouer le gouvernement au suivi. Par exemple, un des éléments qui apparaît primordial à suivre est l'évolution de la diversité des micro-organismes (p. ex., champignons, bactéries) et de leurs activités (p. ex., décomposition, production de méthane). Le suivi de ces groupes, qui était jusqu'à présent extrêmement difficile, est de plus en plus réalisable avec les avancées faites au niveau de l'utilisation de l'ADN environnementale (voir section 4.4.4). Cependant, à notre connaissance, il n'y a pas d'expertise sur l'utilisation de l'ADN environnementale dans les ministères devant mettre en place le suivi de la biodiversité. Ceci implique que du nouveau personnel devrait être engagé où qu'une association soit faite avec un groupe de recherche externe. De plus, l'utilisation de cette technique demande l'achat de matériel spécialisé coûteux ce qui augmente l'investissement initial. Cependant, une fois la technique établie, celle-ci a le potentiel de devenir peu dispendieuse avec la chute rapide des prix d'analyses des échantillons (diminution du coût par 10 entre octobre 2009 et octobre 2012²⁰). Ainsi, la mise en place d'une telle technique entraînerait

²⁰ <http://www.genome.gov/sequencingcosts/>

un haut coût initial, mais possiblement un plus faible coût à long terme. Évaluer la faisabilité de mettre en place un tel suivi sans connaître les budgets est difficile.

Également, il est souvent suggéré que les indicateurs et questions en lien avec les suivis de la biodiversité devraient avoir un lien avec la gestion et l'aménagement. Cependant, pour que des liens clairs existent entre le suivi et la gestion, la façon la plus directe serait de centrer le suivi sur des organismes exploités du sud de la province sur lesquels se concentrent les activités de gestion. Or, les organismes exploités et le sud de la province sont déjà la cible de la majorité des suivis. Par exemple, un grand nombre de scientifiques croit que les insectes qui sont le groupe taxonomique le plus diversifié devraient faire partie de plus de suivis (p. ex., Balmford et al, 2005, Boutin et al, 2009), mais trouver des liens entre la gestion et la diversité des insectes, hormis pour les insectes ravageurs, est un défi. En effet, imaginons que l'on trouve que la diversité des insectes des sols change dans la forêt boréale, que ces changements de diversité entraînent une décomposition plus rapide de la litière et un relâchement de gaz à effet de serre. Cette information serait utile pour la modélisation des CC, mais étant donné que la forêt boréale est immense, il serait probablement impossible de modifier quoi que ce soit au niveau de la gestion pour remédier à la situation. La même situation s'applique dans l'immense territoire du nord où des interventions (hormis la création de parc) seraient dispendieuses et difficiles à réaliser.

Ainsi, malgré le sondage, les questions des participants, les rencontres sur les indicateurs et les revues de littérature, le choix des questions et des indicateurs s'est avéré plus complexe que prévu. Nous sommes toutefois parvenus à établir différents scénarios d'échantillonnage pour les principaux écosystèmes de la province (ces scénarios sont présentés dans les sections suivantes). Ces scénarios présentent différents compromis que nous jugeons pertinents. Dû à l'immensité de la biodiversité, il ne fait cependant aucun doute que ces scénarios ne représentent pas les seules options défendables. En effet, même en tenant compte de tout le travail qui a été fait sur ce sujet par CC-Suivi, le choix des questions et des indicateurs est (et sera, peu importe la quantité de travail supplémentaire) le point le plus sujet à argumentation. Parvenir à ces scénarios a été plus long que prévu et nous n'avons pas eu le temps de faire valider ceux-ci par tous nos partenaires à qui, ultimement, le choix final revient. Pour ce faire, et tel qu'il est expliqué dans l'introduction de ce rapport (Chapitre 1), nous continuerons à travailler avec nos partenaires gouvernementaux et scientifiques afin de déterminer les meilleurs choix de questions et d'indicateurs. Également, nous entendons consulter de nouveau des experts sur une base individuelle afin de valider ces choix.

4.10.2 Quel écosystème prioriser

Tel que mentionné précédemment, il existe quatre principaux types d'écosystèmes naturels au Québec, soit les milieux forestiers, humides, aquatiques d'eau douce et arctiques. De ces écosystèmes, les milieux aquatiques, humides et arctiques sont tous considérés parmi les types d'écosystème les plus à risque (IPCC 2007b) en plus d'être les types d'écosystèmes pour lesquels nous détenons le moins d'information (Federal, Provincial and Territorial Governments of Canada 2010). Cependant, les milieux arctiques, étant donné leur éloignement, représentent un défi financier très important. Pour cette raison, à moins que des budgets spéciaux ne soient débloqués pour cette région, nous ne croyons pas que cet écosystème devrait être priorisé pour

l'instant. Nous présentons tout de même trois scénarios d'échantillonnage pour cet écosystème (section 4.10.4), dont un pourrait être fait à partir d'outils de télédétection et l'autre à partir de la science citoyenne. Des trois écosystèmes se trouvant plus au sud de la province, les milieux humides et aquatiques devraient également être priorités face aux écosystèmes forestiers parce qu'ils risquent de changer plus rapidement et intensément que les milieux forestiers. De plus, les milieux forestiers sont déjà les plus suivis des trois écosystèmes et plusieurs indicateurs peuvent déjà être calculés à partir de données existantes. Nous présentons tout de même différents scénarios en milieu forestier dont le premier se base exclusivement sur des données existantes. Des scénarios de nouveaux éléments à suivre en forêt sont également présentés dans le cas où les budgets sont suffisants. Finalement, nous présentons quelques scénarios plus ou moins intenses d'échantillonnage pour les milieux aquatiques et humides qui devraient, selon nous, être les points focaux du nouveau système de suivi. Il y a indéniablement d'autres arguments pour favoriser l'un ou l'autre des écosystèmes, mais à notre avis, dans un contexte où l'on ne peut tout mesurer, ces deux écosystèmes devraient être priorités pour l'échantillonnage terrain.

Chacun des indicateurs présentés dans la partie suivante est également détaillé de plusieurs façons dans un fichier Excel (Section C – Indicateurs.xlsx). L'onglet IndicateursCoûts présente les différents coûts liés au terrain, laboratoires et analyses des indicateurs. L'onglet IndicateursCaractéristiques lie les indicateurs aux caractéristiques énoncés lors des sections 4.2 à 4.4 : le niveau auquel il s'applique (p.ex., individu, communauté), le groupe taxonomique ou fonctionnel qu'il vise ainsi que son coût financier et en temps et le niveau d'expertise requis pour l'utiliser.

Le fichier contient deux autres onglets en lien avec les scénarios d'échantillonnage présentés pour chaque écosystème. L'onglet IndicateursParScénarios liste tous les indicateurs en lien avec un scénario donné. L'onglet ScénariosCaractéristiques présente dans un tableau synthèse tous les éléments couverts par les indicateurs, le coût total et le nombre de site pour chacun des scénarios.

Pour les différents scénarios, l'estimation des coûts est effectuée en assumant un salaire horaire de 30\$ pour les analyses en laboratoire et un coût de 2000\$ de frais journalier pour une équipe de deux personnes sur le terrain (2 jours-personne; incluant transports, accommodation, salaires, nourriture et entretien de l'équipement). Ce prix est basé sur les estimations de coûts utilisés pour les suivis ichtyologiques en cours au MDDEFP.

4.10.3 Une analyse des paysages (P)

Les CC auront des effets à de multiples niveaux pouvant se répercuter à l'échelle du paysage. De ce fait, un des éléments de base du suivi de la biodiversité devrait être d'étudier les changements au niveau du paysage dans chacune des cellules de 15 km x 15 km. Ce suivi peut être fait de façon ponctuelle à l'aide de photos aériennes ou d'images satellites archivées.

Question: Quels sont les effets des CC sur les proportions et les conditions des différents écosystèmes dans le paysage.

P1. Indicateur: Proportions et tailles des écosystèmes dans le paysage.

Méthode : Analyse par photo-interprétation de la composition du paysage de chaque cellule de 15 km par 15 km ou sur une fraction de ces cellules. Délimiter chaque écosystème et ensuite comparer les changements d'un pas de temps à l'autre. L'analyse de base est déjà faite par le Ministère des Ressources naturelles dans la zone de la forêt commerciale (au sud 51 degrés nord) pour la création des cartes écoforestières. Les milieux humides sont séparés en 2 catégories depuis le dernier relevé débutant en 2010, soit les milieux humides non forestiers où la végétation n'est pas en mesure de former un couvert arborescent (couvert végétal formé par les tiges de plus de 4 m de hauteur des espèces arborescentes) supérieur ou égal à 10 % de couvert et les milieux humides forestiers. Avant 2010, les milieux humides n'étaient pas différenciés concernant leur taux de boisement. La définition actuelle des terrains humides est la suivante : terrain humide incapable de produire au moins 30 m³ ou plus de matière ligneuse à l'hectare en moins de 120 ans ainsi que les terrains qui ont déjà été productifs, mais qui ne se sont pas encore régénérés 60 ans après avoir subi une perturbation majeure. Comparer les terrains humides d'une carte à l'autre serait hasardeux, car les normes et les façons de les appliquer ont changé dans le temps. De plus, il y a une bonne différence dans la façon de délimiter les écosystèmes d'un photo interprète à l'autre. C'est pourquoi il serait vraisemblablement nécessaire de refaire les analyses sur certains secteurs depuis l'origine de la prise de photos jusqu'à présent par un groupe restreint de photo-interprètes. Ainsi, il serait possible de distinguer les signes d'emboisement en refaisant la cartographie avec les normes actuelles pour les milieux humides. À partir de ces données, ils seraient possibles de déterminer les changements de composition des écosystèmes forestiers dans le temps. Il est également à noter que ces résultats seraient valides en moyenne, mais que les résultats sur chaque polygone en particulier (un écosystème circonscrit) sont généralement moins fiables. Il est également à noter que si l'objectif n'est pas de débiter les analyses en 1974 mais plutôt dans les années 2000, la congruence des analyses entre les 3^{ème} et 4^{ème} décennales est meilleure (débutant en 1997 jusqu'à nos jours). Ceci est dû au fait que les analyses de la 4^{ème} décennale sont faites en superposant les résultats de la 3^{ème} décennale aux nouvelles photos, servant de base à la nouvelle photo-interprétation. Il est à noter que pour certaines régions, de plus vieilles photos aériennes existent.

Fréquence : 10 à 15 ans (le temps entre les prises de photos aériennes par le MRN)

Temps : 1 heure pour délimiter de 15 à 25 polygones. Le nombre de polygones par superficie dépend du territoire (p.ex., moins de polygones pour une superficie donnée dans la pessière où les peuplements sont plus homogènes que dans les érablières).

Coût : 50 à 75\$/hre pour le photo-interprète, les photos sont gratuites pour le MDDEFP (Alain Demers [direction du patrimoine écologique et des parcs] est en charge d'obtenir les photos pour

le MDDEFP). Un photo-interprète peut délimiter de 15 à 25 polygones (écosystèmes) à l'heure, il faut consulter les cartes du 3ème décennal pour déterminer approximativement le nombre de polygones dans les régions à faire photo-interprétés.

Expertise : Élevé.

Contact : Pierre Morin (Pierre.Morin5@mrn.gouv.qc.ca) au MRN pour obtenir des informations en lien avec les photos aériennes et les inventaires forestiers.

4.10.4 Des indicateurs pour les milieux arctiques (N; milieux nordiques)

Il est difficile et dispendieux d'aller échantillonner en arctique. Pour cette raison, les milieux arctiques ne feront pas initialement partie du suivi. C'est pourquoi nous limitons les indicateurs à la télédétection et la participation citoyenne. Même si un jour des budgets sont alloués à ce suivi, il demeurera peu réaliste financièrement qu'un suivi de ces écosystèmes se base sur des indicateurs nécessitant de demeurer à proximité des sites pendant un certain temps (p. ex., technique de marquage-recapture) ou nécessitant de visiter les sites plusieurs fois par année. Ainsi, la dynamique des micro-mammifères et de leurs prédateurs, souvent citée comme un des maillons importants de ces écosystèmes, n'a pas été retenue car le caractère cyclique de ces dynamiques exige de longues séries temporelles. Une série d'indicateurs qui peuvent être rapidement évalués sur le terrain sont proposés advenant que le suivi terrain voie le jour. De plus, il est suggéré que cette série d'indicateurs pourrait servir à échantillonner les quelques écosystèmes alpins de type tundra se trouvant au sud du Québec. Ce suivi alpin permettrait de comparer les effets des CC sur les écosystèmes alpins et nordiques de la province et, selon les résultats, le suivi alpin pourrait représenter une alternative à moindre coût afin d'estimer l'effet des CC en milieu nordique.

Étant donné que le suivi de la biodiversité des milieux arctiques n'est pas prévu initialement en raison des coûts élevés, les indicateurs ne sont que peu détaillés.

Nordique: télédétection.

Il est possible de suivre les CC en milieux nordiques à l'aide d'outils satellitaires. Les régions suivies de cette façon gagneraient à être situées à proximité de stations météorologiques afin de pouvoir corrélérer les changements aux variations environnementales.

Question: Quels sont les effets des CC sur la végétation des écosystèmes arctiques?

- Des changements de végétations sont déjà observés dans plusieurs régions arctiques et ceux-ci devraient se poursuivre.

N1. Indicateur: Phénologie, date de verdissement et de sénescence de la végétation arctique.

-
- Le suivi phénologique des plantes peut être effectué à l'aide de données satellitaires. Les méthodes basées sur des mesures NDVI sont fréquemment utilisées (voir White et al. 2009 pour une comparaison de 10 méthodes d'analyse, voir également Wu and Liu 2013 pour un exemple d'analyse liant les mesures NDVI à des données météorologiques).

N2. Indicateur: Pourcentage de couverture végétale.

- Même si les plantes ne peuvent pas nécessairement être identifiées à l'espèce, quelques groupes peuvent être différenciés.
- Ces éléments sont importants pour étudier les changements au niveau du paysage, la productivité globale de la région et les changements d'albédo qui sont importants pour la modélisation climatique.
- Les observations satellites peuvent permettre d'étudier le déplacement nordique de la limite des arbres.
- Ce suivi peut également être basé sur les mesures NDVI (voir Stow et al. 2004 pour une revue des méthodes, voir également Laidler et al. 2008 pour une application méthodologique).

Nordique: suivi existant

Question: Quels sont les effets des CC sur la phénologie du caribou.

N3. Indicateur: Phénologie de migration et de reproduction des troupeaux de caribou de la toundra.

- Plusieurs données sont récoltées sur les caribous par le MDDEFP et il semble que la date de migration (départ) et la date d'arrivée sur l'aire de mise bas soient influencées par les CC.
- La phénologie des déplacements de caribou pourrait être extraite pour l'intégrer au suivi global.

Nordique: participation citoyenne.

Plusieurs communautés autochtones habitent les régions nordiques du Québec. Il serait pertinent de créer des partenariats avec ces communautés afin de mettre à profit leurs connaissances écologiques. Ce genre de suivi devrait être fait en partenariat avec des organismes déjà impliqués dans le suivi écologique tel que la société Makivik et l'association des trappeurs Cris (ATC).

Question: Quels sont les effets des CC sur la phénologie arctique?

N4. Indicateur: Date de verdissement, de fleurissement et de sénescence de la végétation.

-
- Contrairement aux mesures phénologiques par satellites, les mesures *in situ* pourraient être faites à l'espèce étant donné que plusieurs des plantes nordiques sont aisément identifiables par les populations nordiques.
 - La méthodologie serait basée sur le programme de science citoyenne suivant: <https://sites.google.com/a/alaska.edu/melibee-project/citizen-science/citizen-science-monitoring-instructions>
 - Les citoyens identifient une plante qu'ils suivent durant tout l'été et remplissent des données sur son développement. Ce programme permet de cibler des plantes indigène ou exotique selon les priorités locales.
 - Un suivi photographique des insectes pollinisateurs peut également être jumelé à cette initiative http://www.spipoll.org/sites/spipoll.org/files/Proto_Spipoll_detaille_26.pdf

N5. Indicateur: Date d'arrivée et de départ des organismes migrants.

- Les utilisateurs du territoire pourraient contribuer au suivi en rapportant leurs observations aux organismes locaux (Makivik et ATC). Les premières et dernières observations des espèces ainsi que les comportements de cours représentent des données très précises compte tenu de l'intensité de l'utilisation du territoire par les autochtones.

N6. Indicateur: Arrivée de nouvelles plantes et animaux.

- Les communautés autochtones pourraient être également invitées à signaler l'arrivée de nouvelles espèces de plantes et d'animaux.
- L'arrivée de nouvelles espèces dans le Nord est déjà observée et il serait facile de combiner la mention d'espèces rarement observées avec le suivi des dates de départ et d'arrivée (N5). Un programme similaire est fait au Nunavut (http://env.gov.nu.ca/sites/default/files/brochure_english_jan31-4_1.pdf).

Nordique: échantillonnage terrain de la toundra et de la taïga.

Dans le cas où des budgets seraient débloqués pour échantillonner les écosystèmes nordiques, il demeure peu réaliste d'effectuer des mesures complexes nécessitant de visiter les mêmes sites à plusieurs reprises au cours d'une année ou de devoir demeurer sur le site pour une longue période. Pour ce faire, bien que les indicateurs présentés puissent demander un certain travail en laboratoire, ils sont tous rapidement faits sur le terrain. De par la nature de la dynamique de la végétation nordique, les sites ne nécessiteraient pas d'être visités annuellement.

Question: Quels sont les effets des CC sur les sols arctiques et la végétation?

- Les sols arctiques sont en partie gelés et/ou minces et supportent une végétation clairsemée et de faible biomasse.
- Les espèces provenant du sud pourraient être bloquées dans leur migration par l'inaptitude des sols à leur fournir un terreau de croissance approprié.
- Les sols arctiques contiennent une grande quantité de carbone qui pourrait être relâché dans l'atmosphère s'ils se réchauffent suffisamment.

-
- La réponse à cette question est importante pour la modélisation du climat mondial. Les indicateurs répondant à cette question sont simples à mesurer et ne nécessitent pas de visites annuelles.

N7. Indicateur: Composition en végétaux et lichens.

- Ces changements auront des répercussions sur le cycle du carbone et sur l'abondance et la diversité d'organismes exploitant ces espèces.
- Mesurer le recouvrement par espèce (ou au genre) pour les bryophytes, les plantes vasculaires et les lichens. La diversité nordique étant faible, il est souvent facile de se rendre à l'espèce hormis pour les groupes tels que les graminées et les carex.

N8. Indicateur: Productivité végétale.

- La croissance en diamètre ou en longueur pour les espèces ligneuses ainsi que la biomasse à la fin de la saison de croissance pour les herbacées permettent de prédire les changements de composition à venir.
- Cet élément, combiné à la connaissance des changements de composition végétale, de décomposition et d'accumulation de l'humus va permettre de modéliser l'effet des CC sur les réserves de carbone des sols nordiques.
- Les changements de forme des épinettes qui passeront de krummholz (profil bas à tronc multiples) à une forme érigée peuvent être utilisés comme indicateur de changement de productivité et de dynamique végétale. Ces changements de forme indiquent un changement de l'écosystème de type toundra vers un écosystème de type taïga.

N9. Indicateur: Profondeur du dégel estival des sols.

- La profondeur du dégel est une indication de la profondeur de sol où l'activité biologique a lieu.
- La profondeur de dégel détermine l'épaisseur de matière organique où des activités de décomposition peuvent se produire.

N10. Indicateur: Composition en nutriment des sols et pH.

- Les changements d'activité microbienne, de végétation et les dépôts atmosphériques modifient la teneur et la disponibilité des nutriments des sols ainsi que le pH. Ces changements agissent rétroactivement sur la composition végétale.

N11. Indicateur: Vitesse de décomposition de la matière organique.

- La vitesse de décomposition dépend de l'activité microbienne, de la température, de l'humidité et de la nature de la matière organique dans les sols. Dans l'arctique, la décomposition est surtout faite par de micro-détritivores et des micro-organismes (Makkonen et al. 2011)

-
- Une méthode pour utiliser les sacs de litières en milieu arctique est disponible dans (Aerts et al. 2012). Les sacs de litières n'ont pas à être récupérés chaque année.
 - La préparation des sacs peut-être plutôt longue. Préparer 800 sacs prend environ 2 semaines (personne contacte : Vicky Bérubé, doctorante à l'Université Laval). Le choix des espèces à mettre dans les sacs influence le temps de préparation. Si on enterre les sacs il faudrait mettre des racines tandis qu'on doit simplement mettre des feuilles si on laisse les sacs au dessus du sol.
 - Il faut un minimum de 5 sacs par emplacement, mais 10 sacs sont optimaux afin de tenir en compte des imprévus tels que des animaux trop curieux ou bien des sacs disparus.
 - La maille des sacs peut influencer la vitesse de décomposition. Le coût des sacs est d'environ 1\$ mais ça exclu le tissus choisi.

N12. Indicateur: Épaisseur de l'humus.

- Les sols arctiques contiennent une large quantité de matière organique sous forme d'humus.
- Ultimement, l'accumulation ou la diminution de l'épaisseur de l'humus (la balance entre la décomposition et la productivité végétale) jouera un rôle très important dans le cycle global du carbone.

Question: Quels sont les effets des CC sur la diversité faunique arctique?

N13. Indicateur: Diversité des oiseaux et des insectes.

- Effectuer un inventaire partiel des insectes par des pièges fosses et de la capture avec filet afin de suivre la diversité et l'abondance de différents groupes fonctionnels (p. ex., carabidés et papillons, voir la section sur les milieux forestiers).
- Des transects d'observation d'oiseaux pourraient être effectués simultanément.

Nordique: échantillonnage terrain de la toundra alpine au sud de la province.

Se servir des écosystèmes de type toundra alpine du sud de la province pour inférer se qui se passe au nord ou alors comparer la dynamique des deux types d'habitats.

Question: Quels sont les effets des CC sur la végétation de type toundra alpine du sud du Québec (dans les parcs des Grands Jardins, des Hautes-Georges de la Rivière-Malbaie et National de la Gaspésie)?

- Les indicateurs précédents pourraient être utilisés.
- Il suffirait de faire un transect des zones forestières à faible altitude jusqu'aux zones de toundra en haut des montagnes.

4.10.5 Des indicateurs pour les milieux aquatiques d'eau douce (A)

Bien que les CC affecteront les ruisseaux et les rivières possiblement plus que les milieux lacustres, nous croyons que le suivi des milieux aquatiques d'eau douce devrait être concentrés dans les lacs. Notre raisonnement se fonde sur deux concepts écologiques. Premièrement, les communautés de poissons et de benthos sont les composantes principales des ruisseaux tandis que les écosystèmes lacustres ont aussi des communautés de phytoplanctons et de zooplanctons qui sont aussi essentielles pour le fonctionnement de l'écosystème. Il y a donc un plus grand nombre d'indicateurs des fonctions écologiques dans les lacs que dans les ruisseaux. Deuxièmement, les effets anticipés des CC dans les lacs sont reliés principalement aux changements dans la distribution verticale des températures qui vont à leur tour influencer la distribution, la démographie et les interactions entre les espèces dans les communautés lacustres. Il est par contre fort probable que les CC vont radicalement altérer le débit des ruisseaux créant ainsi des inondations et des sécheresses particulièrement sévères pour les petits ruisseaux. Ces larges changements potentiels dans la dynamique des ruisseaux nous font craindre qu'il ne soit pas possible de suivre un nombre suffisant de petits ruisseaux durant les prochaines décennies parce que certains de ces ruisseaux peuvent disparaître. De plus, les communautés de poissons de ruisseaux peuvent facilement se déplacer vers des sites plus favorables si la dynamique des ruisseaux est bouleversée, ce qui en fait de mauvaises espèces indicatrices pour plusieurs aspects écologiques (p.ex. démographie, morphologie, et abondance). Les poissons de lacs représentent de meilleures espèces indicatrices puisqu'ils sont plus ou moins emprisonnés. Conséquemment, la majorité des questions et indicateurs se concentrent sur ces écosystèmes. Des indicateurs pour les ruisseaux et les rivières sont également présentés advenant que les ruisseaux et rivières soient finalement favorisés.

Aquatique : échantillonnage terrain des lacs.

Hormis pour les invertébrés et les herbiers, l'échantillonnage devrait être fait au centre du lac. Idéalement, deux échantillonnages par année devraient être faits afin de couvrir les changements de composition annuels des invertébrés, du zooplancton et du phytoplancton (printemps et automne). Dans le cas où un seul échantillonnage a lieu, celui-ci devrait préférentiellement être fait à l'automne. L'échantillonnage présenté ne décrit qu'un échantillonnage par année, mais si plusieurs échantillonnages sont faits, les nutriments (A2), les poissons (A4) et les herbiers (A6) ne doivent être mesurés qu'une fois. Pour ce qui est de l'échantillonnage des différentes strates thermiques des lacs (l'épilimnion, le métalimnion, et l'hypolimnion), il est possible d'échantillonner soit les trois strates ou seulement deux en omettant le métalimnion.

Question: Quels sont les effets des CC sur la géochimie des lacs et quels en sont les effets sur les organismes, particulièrement les sténothermes?

-
- Cette question englobe l'effet des CC sur la majorité des organismes des lacs. Dépendant de la taille du lac, l'échantillonnage complet d'un lac nécessite de 2 à 3 jours pour 4 personnes. Le temps nécessaire à chacun des indicateurs de façon individuelle n'est pas mentionné, car le suivi des différents éléments se fait simultanément. Les indicateurs nécessitent également du traitement en laboratoire.
 - Les lacs échantillonnés devraient être de petite ou moyenne taille, car ce sont probablement eux qui subiront les changements les plus importants et ce sont eux qui nécessiteront le moins d'effort d'échantillonnage.

A1. Indicateur: Température de l'eau, concentration en oxygène dissout, concentration en matière organique dissoute, pH.

Méthode : À l'aide d'une sonde (par exemple, une multisonde YSI 556), il faut d'abord faire une stratigraphie thermique verticale au centre du lac afin de déterminer la profondeur des différentes couches: l'épilimnion, le métalimnion, et l'hypolimnion. Ensuite, à l'aide de la même sonde, il faut faire de 2 à 3 mesures par couches afin de mesurer la concentration en oxygène et en matière organique dissoute. Ces données n'ont pas être analysée en tant que telle, elles serviront de variables prédictives pour comprendre la dynamique végétale de sous-bois.

Fréquence : Au 2 ou 3 ans. 1 ou 2 fois par année d'échantillonnage.

Temps : 15 minutes à 2 personnes.

Coût : Une sonde coûte environ 6000\$ et peut être utilisée pour tous les lacs.

Expertise : Faible.

A2. Indicateur: Concentration en phosphore, ammonium, nitrate, nitrite et chlorophylle.

Méthode : Ces mesures sont prises dans la colonne d'eau au point le plus profond du lac (Z_{\max}). À l'aide d'une bouteille Van Dorn (ou d'un autre appareil), il faut récolté un échantillon d'eau par couche (2 ou 3 dépendant si le métalimnion est échantillonné ou non). Pour les mesures de phosphores, 3 échantillons sont pris et la moyenne effectuée. Pour certains éléments, les échantillons doivent être conservés au frais (p.ex., glaciaires avec de la glace) afin d'arrêter les processus biologiques. Ces échantillons d'eau peuvent être envoyés dans des laboratoires spécialisés pour analyses. Au gouvernement, ces analyses peuvent être faites au gouvernement par le Centre d'expertise en analyse environnementale. Ces données n'ont pas à être analysée en tant que telle, elles serviront de variables prédictives pour comprendre la dynamique des autres organismes.

Fréquence : Au 2 ou 3 ans. 1 fois par année d'échantillonnage.

Temps : 15 minutes à 2 personnes.

Coût : Environ 300\$ pour la bouteille Van Dorn. Les prix des analyses au CEAEQ :

MA. 303 – P 5.2 : Phosphore total en trace (p-t-trace) (limite de détection 0.6 ug/l) est 36.50\$/éch Québec

MA. 800 – Chlor. 1.0 chlorophylle a (chlor-a) - est de 22,50 \$/éch Québec

MA. 303 – N 1.0 Nutriments (nitrate-nitrite, azote total, azote ammoniacal)- est de 35.50\$/éch Québec

Donc $(36,50 * 3 + 22,5 + 35,5) * 1,13 = 190\$$ par site.

Expertise : Faible au terrain. En laboratoire, l'expertise requise est élevée. Cependant, ces analyses peuvent être faites au gouvernement par le Centre d'expertise en analyse environnementale ou par des sous-contractants.

Contact : Christian Deblois (MDDEFP, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec : christian.deblois@mddefp.gouv.qc.ca).

A3. Indicateur: La composition, l'abondance et la biomasse totale des phytoplanctons et zooplanctons.

Méthode : Pour le zooplancton, l'échantillonnage se fait à l'aide d'un filet avec une ouverture de maille de 53 µm (voir protocole d'échantillonnage de la communauté zooplanctonique en lac du MDDEFP) au centre du lac. Le phytoplancton est collecté séparément en échantillonnant de l'eau à différente profondeur à l'aide d'une bouteille Van Dorn. Il faut ajouter du Lugol et du Formaline dans l'échantillon afin de tuer les organismes et d'arrêter la croissance (exemple de protocole : http://www.epa.gov/greatlakes/monitoring/sop/chapter_4/LG400.pdf). Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : Au 2 ou 3 ans. 1 ou 2 fois par année d'échantillonnage.

Temps : 30 minutes à 2.

Coût : Par échantillon, il coûte 220\$ et 150\$ respectivement pour faire l'identification du phytoplancton et du zooplancton à l'UQÀM.

Expertise : Faible au terrain. Élevé en laboratoire.

Contact : Beatrix Beisner (UQÀM; beisner.beatrix@uqam.ca).

A4. Indicateur: La composition et la taille des poissons en lacs.

Méthode : Voir le « Guide de normalisation des méthodes d'inventaire ichtyologique en eaux intérieures Tome I - Acquisition de données » du MDDEFP. Les poissons sont pêchés à l'aide de filet maillant. Les poissons sont identifiés à l'espèce, mesurés et pesés sur le terrain. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : Au 2 ou 3 ans. 1 fois par année d'échantillonnage.

Temps : Environ 6 jours-personnes du mille hectare de superficie à échantillonner. Ce temps inclus le temps nécessaire pour faire toutes les autres mesures (phyto-zooplancton, physicochimie).

Coût : Le MDDEFP possède déjà l'équipement pour effectuer l'échantillonnage. Les coûts de fonctionnement sont évalués à 500\$ (p.ex., transporter le bateau, filets).

Expertise : Moyenne.

Contact : Pedro Peres-Neto (UQÀM; peres-neto.pedro@uqam.ca). Martin Arvisais (MDDEFP).

A5. Indicateur A: La composition et l'abondance des macro-invertébrés benthiques des littoraux de lacs.

Méthode : Les macroinvertébrés benthiques peuvent être échantillonnés à l'aide de filet troubleau (*D-net*) d'une taille d'ouverture de 600 µm. Des échantillons composites sont obtenus en marchant de différentes sections représentatives du littoral vers le centre du lac de façon perpendiculaire jusqu'à une profondeur d'un mètre. Des coups de filets sont effectués dans l'eau en avançant. Le temps et la distance parcourue doivent être notés. L'échantillonnage doit être effectué aux mêmes endroits d'année en année. À chaque coup de filet (devant couvrir une superficie de 30 par 50 cm), les macroinvertébrés benthiques devraient être délogés manuellement pendant 30 secondes. Les caractéristiques du littoral doivent être notées. Si des herbiers sont présents, effectuer un échantillonnage de macroinvertébrés dans l'herbier et un en eau libre. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : Au 2 ou 3 ans. 1 ou 2 fois par année d'échantillonnage.

Temps : Sur le terrain 2 personnes 30 minutes. En laboratoire il faut compter de 2-3 jours/échantillon pour le tri et l'identification.

Coût : Le coût du filet est d'environ 200 à 300\$. Le coût en laboratoire pour l'identification est de 300 à 1000\$ par échantillon.

Expertise : Faible sur le terrain. Élevé en laboratoire.

Contact : Lyne Pelletier (MDDEFP; Lyne.Pelletier@mddefp.gouv.qc.ca).

A6. Indicateur: La composition et l'abondance des herbiers en lacs.

Méthode : Sur le même transect que celui utilisé pour échantillonner les macroinvertébrés benthiques, déterminer la composition en herbier. Identifier toutes les espèces présentes sur 5 m de large jusqu'à ce que l'eau atteigne 1 m de profondeur. Les espèces doivent être identifiées

jusqu'à la plus grande précision taxonomique possible sur le terrain (à l'espèce ou au genre). Le pourcentage de recouvrement de la végétation dans la zone échantillonnée doit également être estimé. À partir du moment où l'eau dépasse 1 m, la végétation est échantillonnée en faisant glisser à partir du bateau un râteau à jardin double (avec des « dents » de chaque côté) attaché à une corde sur le fond du lac. Deux passages de râteau sont effectués à tous les 0.5 m de profondeur. Ce protocole est inspiré de : <http://www.pca.state.mn.us/index.php/view-document.html?gid=6880>. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : Au 2 ou 3 ans. 1 fois par année d'échantillonnage.

Temps : 1h30 pour 2 personnes.

Coût : Faible.

Expertise : Élevé.

Aquatique : échantillonnage terrain des ruisseaux et des rivières

L'idéal ici serait de viser des ruisseaux ou rivière limitrophes à des lacs afin de comparer leurs dynamiques et déterminer si certains organismes disparaissant de l'un ou l'autre des écosystèmes trouvent refuges dans l'autre. Il faudrait idéalement que le suivi inclue différentes sections du cours d'eau, soit au moins une fosse, une coulée et un rapide.

Question: Quels sont les effets des CC sur la composition des ruisseaux et rivières?

A7. Indicateur: Vitesse de l'eau, température, profondeur, largeur, composition en sédiments et micro-habitats (fosses-coulées-rapides).

Méthode : Le long du 100 m du transect, les caractéristiques des différentes sections devraient être notées, soit : à tous les 10 m ou lorsque les conditions changent mesurer la largeur et la profondeur à l'aide d'un ruban, mesurer la température et la vitesse de l'eau à l'aide d'une sonde, déterminer visuellement la composition en sédiments sur 1 m² au centre de la rivière et noter si le point est une fosse, une coulée et un rapide. Ces données n'ont pas être analysées en tant que telle, elles serviront de variables prédictives pour comprendre la dynamique des autres organismes.

Fréquence : Au 2 ou 3 ans. 1 fois par année d'échantillonnage pour tous sauf pour la température et la vitesse qui devrait être mesurées à chaque visite.

Temps : 1h30 pour 2 personnes.

Coût : 800\$ pour la sonde, faible pour le reste.

Expertise : Faible.

Contact : Lyne Pelletier (MDDEFP; Lyne.Pelletier@mddefp.gouv.qc.ca).

A8. Indicateur: Niveau d'eau et phénologie

Méthode : Installer des caméras sur le bord des rivières prenant des photos à intervalles réguliers. Ces appareils doivent être placés au début de la saison de croissance et récupérer à la fin. Pour les analyses de la végétation riparienne, beaucoup de codes ont déjà été écrits en MATLAB dans le laboratoire de Raphaël Proulx (UQTR). En général, les analyses détectent les changements de couleur dans les images pour déterminer les changements phénologiques. Pour les changements de niveau d'eau, un algorithme capable d'identifier les pixels où se trouve de l'eau doit être utilisé. À partir de celui-ci, il suffit ensuite de déterminer les changements de superficie d'eau au cours de la saison. Le laboratoire de R.Proulx devrait être contacté en premier lieu afin de connaître les dernières avancées dans le domaine et afin de développer des analyses pour les niveaux d'eau.

Fréquence : Au 2 ou 3 ans. 2 visites, une première pour installer les appareils et une deuxième pour les récupérer.

Temps : 30 minutes pour 1 personne. Long pour les analyses dans une phase initiale. Cependant, une fois les méthodologies développées, les analyses deviennent courtes, car tout peut être automatisé.

Coût : 100\$ par caméra par site (PlantCams : <http://www.wingscapes.com/timelapse-cameras/timelapse-plantcam>)

Expertise : Faible sur le terrain. Élevé pour les analyses. Cependant, les analyses sont de plus en plus automatisées et requièrent de moins en moins d'expertise.

Contact : Raphaël Proulx (UQTR : raphael.proulx@uqtr.ca).

A9. Indicateur: La composition et l'abondance des macro-invertébrés benthiques en ruisseaux et rivières.

Méthode : Les méthodologies diffèrent en fonction du substrat de la rivière (grossier ou meuble). Des protocoles détaillés sont disponibles dans :

- pour les substrats grossiers,

http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/macroinvertebre/surveillance/index.htm et
http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/macroinvertebre/indice-integrite/substrat-grossier.htm.

- pour les substrats meubles,

http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/macroinvertebre/protocole/index.htm et
http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/macroinvertebre/indice-integrite/substrat-meuble.htm.

Voici un extrait d'une de ces méthodes présenté ici comme exemple : Chaque station mesure 100 m de longueur. L'échantillonnage a été réalisé dans les seuils et les plats courants de la station à l'aide d'un filet troubleau (*D-net*) d'une maille d'ouverture de 600 µm. Un échantillon composite a été obtenu grâce à l'échantillonnage de 20 quadrats de 30 cm sur 50 cm (coup de filet), couvrant ainsi une surface totale de 3 m². Ces quadrats étaient sélectionnés sur place, au hasard, dans la station, mais ils devaient caractériser des vitesses de courant ou des profondeurs différentes. À chaque coup de filet, les macroinvertébrés benthiques ont été délogés manuellement pendant 30 s. L'échantillon composite a été conservé dans l'alcool éthylique à 70 % de volume (copie de la méthodologie de MDDEFP 2012). Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : Au 2 ou 3 ans. 1 ou 2 fois par année d'échantillonnage.

Temps : Sur le terrain 30 minutes pour 2 personnes, en laboratoire il faut compter de 2-3 jours/échantillon pour le tri et l'identification.

Coût : Le coût du filet est d'environ 200 à 300\$. Le coût en laboratoire pour l'identification est de 300 à 1000\$ par échantillon.

Expertise : Faible sur le terrain. Élevé en laboratoire.

Contact : Lyne Pelletier (MDDEFP; Lyne.Pelletier@mddefp.gouv.qc.ca).

A10. Indicateur: Composition, abondance et taille des poissons en ruisseaux et rivières.

Méthode : L'échantillonnage de poissons en rivière se fait à la pêche électrique (voir « Guide de normalisation des méthodes d'inventaire ichtyologique en eaux intérieures Tome I - Acquisition de données » du MDDEFP). L'échantillonnage doit être fait tout au long du transect de 100 m. Tous les individus sont identifiés à l'espèce et leur longueur mesurée en plaquant les poissons sur une règle. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : Au 2 ou 3 ans. 1 fois par année d'échantillonnage.

Temps : 4 heures à 2 personnes.

Coût : Une pêcheuse électrique coûte environ 6000\$ et peut servir sur tous les sites.

Expertise : Moyenne.

Contact : Pedro Peres-Neto (UQÀM; peres-neto.pedro@uqam.ca). Martin Arvisais (MDDEFP).

4.10.6 Des scénarios d'échantillonnage pour les milieux aquatiques d'eau douce

Scénario 1 : Intégration à l'échantillonnage des suivis ichtyologiques, ajouts mineurs.

Le réseau de suivis ichtyologiques du touladi et celui du doré jaune inclus respectivement 75 et 60 lacs, dont 25 et 40 lacs ont plus de 1000 ha. Les lacs de plus de 1000 ha sont suivis au 5 ou 6 ans alors que ceux de moins de 1000 ha sont suivis au 10 ou 12 ans (suivi du touladi ou doré). Le suivi du doré est fait deux années consécutives à l'automne alors que le suivi du touladi n'est fait qu'une fois par cycle à l'été. Ces suivis incluent la caractérisation physico-chimique des lacs, des communautés de poissons, de la biomasse du zooplancton en plus de mesurer en détail l'évolution des deux espèces cibles dont le touladi, une espèce de salmonidé risquant d'être particulièrement affectée par les CC. Environ 11 et 20 lacs sont échantillonnés par année dans le cadre des suivis du touladi et du doré respectivement. L'intégration de CC-Suivi à ces inventaires semble être l'option la plus intéressante pour effectuer des économies d'échelles.

Les indicateurs suivants sont déjà suivis :

A1. Indicateur: Température de l'eau, concentration en oxygène dissout, concentration en matière organique dissoute.

A3. Indicateur: La composition, l'abondance et la biomasse totale des phytoplanctons et zooplanctons (biomasse du zooplancton).

A4. Indicateur: La composition et la taille des poissons en lacs.

Avec l'addition mineure d'effort d'échantillonnage, ces indicateurs pourraient être ajoutés.

A2. Indicateur: Concentration en phosphore, ammonium, nitrate, nitrite et chlorophylle a.

A3. Indicateur: La composition, l'abondance et la biomasse totale des phytoplanctons et zooplanctons (phytoplanctons).

Temps terrain : Ces éléments ajouteraient au maximum 1 heure de travail étant donné que les équipes vont déjà au point le plus profond du lac pour échantillonner le zooplancton. Au total, ces indicateurs ne devraient donc pas ajouter de jours-personne d'échantillonnage, car ils peuvent probablement être insérés dans l'échantillonnage ayant déjà cours. Il est à noter que pour le suivi du doré, les sites sont suivis deux années de suite, mais le zooplancton n'est échantillonné que lors de la première année. Comme, il serait préférable d'échantillonner le phyto- et le zooplancton le plus régulièrement possible, il faudrait ajouter l'échantillonnage du plancton lors de la deuxième visite ce qui ajouterait environ 1h de travail la 2^{ème} année.

Coûts terrain : 40\$

Expertise terrain : Faible

Coûts en laboratoire : 800\$

Expertise en laboratoire : Élevé

Coûts totaux: Environ 31 sites sont visités par année, le coût annuel s'élèverait à environ 840 * 31 = 26 040\$.

L'analyse de ces données prendrait environ 30 jours.

Avantages

- Économie d'échelle en partageant les frais des suivis.
- Bonne représentation spatiale du sud et du centre de la province.
- Des mesures poussées sur certaines espèces de poissons.
- Effets de la pêche et des CC peuvent être étudiés de concert.
- Une couverture détaillée de 3 niveaux trophiques et des conditions environnementales.

Désavantages

- Échantillonnage au 5 ans ou 6 ans pour les lacs de plus de 1000 ha et au 10 ou 12 ans pour ceux plus petits. Ce temps entre les mesures est probablement suffisant pour les communautés de poissons, mais est long pour les communautés de phyto- et zooplanctons qui peuvent changer très rapidement à l'intérieur d'une année et entre les années. Si communautés sont cycliques, ces cycles ne pourront être détectés que sur plusieurs décennies. Cependant, le suivi du touladi se faisant à l'été et celui du doré à l'été, la diversité temporelle pourra être couverte en partie.
- Le positionnement des lacs ne respecte pas nécessairement la planification spatiale proposée par la méthodologie pour suivre les CC.

Scénario 2 : Intégration à l'échantillonnage des suivis ichtyologiques, ajouts mineurs, mais nombre de visites doublées.

Étant donné que le principal problème des suivis ichtyologiques est le grand intervalle d'échantillonnage, il serait possible de retourner échantillonner certains sites à plus grandes fréquences afin d'y remesurer tous les indicateurs sauf les poissons. En effet, la longue période entre les échantillonnages de poissons a été établie pour limiter l'impact de l'échantillonnage sur les communautés. Ainsi, parmi les sites déjà visités pour les suivis ichtyologiques, 30 lacs pourraient être visités chaque année pour en caractériser plus précisément la physicochimie et les communautés de phyto- et de zooplanctons. Ces 30 lacs pourraient être distribués de façon a

représenter le plus fidèlement possible la distribution des sites basés sur la méthodologie développer par CC-suivi pour déterminer l'effet des CC (voir les chapitres 5 et 6). Il serait également possible d'étendre le suivi à de nouveaux lacs afin de mieux couvrir l'effet possible des CC.

Indicateurs

A1. Indicateur: Température de l'eau, concentration en oxygène dissout, concentration en matière organique dissoute.

A2. Indicateur: Concentration en phosphore, ammonium, nitrate, nitrite et chlorophylle a.

A3. Indicateur: La composition, l'abondance et la biomasse totale des phytoplanctons et zooplanctons

Temps terrain : en tant que tel, l'échantillonnage ne prend qu'environ 1 à 2 heures à 2 personnes. Calculant le transport et la préparation, l'échantillonnage d'un lac par jour semble réaliste.
Total : 2 jours-personne

Coûts terrain : 40

Expertise terrain : Faible

Coûts en laboratoire : 800\$

Expertise en laboratoire : Élevé

Coûts totaux : 2 jours-personne à environ 2000\$. En additionnant le 800\$ des analyses et en multipliant par 30 sites : 86 000\$. En conservant les ajouts fait pour le scénario 1, le coût total est de $86\ 000 + 26\ 040 = 112\ 040$ \$.

Avantages

- Plus grande précision temporelle permettant de mieux comprendre les variations de populations.
- Une meilleure compréhension de la dynamique du phyto- et du zooplancton dans ces lacs permettraient également de mieux comprendre se qui se produit dans les autres lacs qui ne sont pas suivis aussi étroitement.

Désavantages

- Coût élevé.

Scénario 3 : Intégration à l'échantillonnage des suivis ichtyologiques, ajouts majeurs.

Ajouter les 2 indicateurs suivant à ceux du scénario 1 :

A5. Indicateur: La composition et l'abondance des macro-invertébrés benthiques des littoraux de lacs.

A6. Indicateur: La composition et l'abondance des herbiers en lacs.

Temps terrain : En incluant les indicateurs du scénario 1, cet échantillonnage ajouterait environ 3 heures de travail pour 2 personnes. Il est à noter que pour le suivi du doré, les sites sont suivis deux années de suite, mais le zooplancton n'est échantillonné que lors de la première année. Il serait pertinent de ré échantillonner celui-ci à chaque visite. Ce qui ajouterait environ 30 minutes de travail la 2^{ème} année.

Coûts terrain : 60\$

Expertise terrain : Moyen

Temps en laboratoire : 0

Coûts en laboratoire : 1400\$

Expertise en laboratoire : Élevé

Coûts totaux : Étant donné qu'environ 31 sites sont visités par année, le coût annuel s'élèverait à environ $31 * 1460 = 45\ 260\$$.

L'analyse de ces données prendrait environ 30 jours.

Avantages

- Économie d'échelle en partageant les frais des suivis.
- Bonne représentation spatiale du sud et du centre de la province.
- Des mesures poussées sur certaines espèces de poissons.
- Effets de la pêche et des CC peuvent être étudiés de concert.
- Une couverture détaillée de 3 niveaux trophiques et des conditions environnementales.
- Ajout de la dynamique de littoral des lacs. De plus, les macro-invertébrés benthiques incluent les larves d'insectes volants (odonates) qui sont connues pour migrer rapidement en Europe, ce qui pourrait possiblement être détecté via cet échantillonnage.

Désavantages

- Échantillonnage au 5 ans ou 6 ans pour les lacs de plus de 1000 ha et au 10 ou 12 ans pour ceux plus petits. Ce temps entre les mesures est probablement suffisant pour les communautés de poissons, mais est long pour les phyto- et zooplanctons dont les communautés peuvent changer très rapidement à l'intérieur d'une année et entre les années. Si les organismes ont des populations cycliques, ces cycles ne pourront être détectés que sur plusieurs décennies. Cependant, le suivi du touladi se faisant à l'été et celui du doré à l'été, la diversité temporelle pourra être couverte en partie.
- Requiers l'entraînement du personnel pour identifier les plantes d'herbiers.

Scénario 4 : Intégration à l'échantillonnage des suivis ichtyologiques, ajouts majeurs, visites doublées.

Ajouter les 2 indicateurs suivant à ceux du scénario 2 :

A5. Indicateur: La composition et l'abondance des macro-invertébrés benthiques des littoraux de lacs.

A6. Indicateur: La composition et l'abondance des herbiers en lacs.

Coûts totaux : Il suffit d'additionner les coûts des scénarios 2 et 3 : $112\ 040 + 45\ 260 = 157\ 300\$$

Avantages

- Plus grande précision temporelle permettant de mieux comprendre les variations de populations.
- Une meilleure compréhension de la dynamique du phyto- et du zooplancton dans ces lacs permettraient également de mieux comprendre ce qui se produit dans les autres lacs pas suivis aussi étroitement.
- Ajout de la dynamique de littoral des lacs. De plus, les macro-invertébrés benthiques incluent les larves d'insectes volants (odonates) qui sont connues pour migrer rapidement en Europe, ce qui pourrait possiblement être détecté via cet échantillonnage.

Désavantages

- Coût élevé.
- Requiers l'entraînement du personnel pour identifier les plantes d'herbiers.

Scénario 5 : Suivi en rivières.

Un suivi de la biodiversité en petites rivières et intégré au suivi des macroinvertébrés benthiques qui débute pourrait être mis en place. Ce suivi pourrait être annuel ou bisannuel.

Indicateurs

A2. Indicateur: Concentration en phosphore, ammonium, nitrate, nitrite et chlorophylle a.

A7. Indicateur: Vitesse de l'eau, température, profondeur, largeur, composition en sédiments et micro-habitats (fosses-coulées-rapides).

A9. Indicateur: La composition et l'abondance des macro-invertébrés benthiques en ruisseaux et rivières.

A10. Indicateur: Composition, abondance et taille des poissons en ruisseaux et rivières.

Temps terrain : 6 heures à 2 personnes. 2 jours-personne.

Coûts terrain : Environ 7000\$ pour les équipements (pêcheuse électrique, filet pour invertébrés) et un coût récurant par site sur le terrain d'environ 20\$.

Expertise terrain : Moyenne.

Coûts en laboratoire : environ 650\$ pour l'identification et 107\$ pour les analyses.

Expertise en laboratoire : Élevé.

Coûts totaux : Pour 30 sites par années : $(757\$ (\text{laboratoire}) + 2000\$ (2 \text{ jours-personne})) * 30 = 82\ 710\$$ par année.

L'analyse de ces données prendrait environ 30 jours.

Avantages

- Les petits cours d'eau risquent de changer rapidement face aux CC.
- Bonne expertise pour tous les organismes au MDDEFP.
- L'hydrologie des rivières influence un bon nombre d'organismes dans les différents bassins versants.

Désavantages

- Pour un coût similaire, juxtaposé aux suivis existants, le suivi en lacs permettrait de faire l'intégration d'un plus grand nombre d'organismes.
- Les petits cours d'eau sont à risque de disparaître du aux CC.

4.10.7 Des indicateurs les milieux humides (H)

Les indicateurs choisis peuvent s'appliquer aux tourbières et aux marécages. Les marais peuvent aussi être suivis, mais ils sont moins présents dans certains secteurs ou dépendent de perturbations particulières (p.ex. les castors). En fait, le choix de suivre les tourbières ou les marécages variera en fonction de la région. L'avantage des marécages est qu'ils sont plus dynamiques et plus susceptibles de changer rapidement dû à leur lien étroit avec le niveau des nappes phréatiques. Les enjeux des milieux humides sont différents au Nord et au Sud. Au Nord on s'inquiète de l'effet de la fonte du pergélisol sur les grandes étendues de tourbières alors qu'au Sud une augmentation dans la fréquence des sécheresses peut favoriser la réduction des mares ou l'emboisement.

Milieux humides: télédétection.

Question: Quels sont les effets des CC sur la quantité et/ou qualité des milieux humides dans le paysage?

H1. Indicateur: Abondance de milieux humides et leurs caractéristiques générales dans le paysage.

- Ce genre de caractérisation des milieux humides pourrait être fait dans les parcelles 15 x 15 km choisies et pourrait être revalidé au 5 ou 10 ans.
- Cette caractérisation exige de la photo interprétation, mais une certaine caractérisation pourrait être effectuée à l'aide d'imagerie satellitaire comme Landsat (Duro et al. 2007). Différents articles documentent la précision des outils satellitaires servant à mesurer les changements dans les milieux humides.

H2. Indicateur: Taille et caractérisation des mares dans les milieux humides.

- La quantité et la superficie des mares peuvent être estimées par imagerie satellite. Cette mesure devrait se faire à la même date, possiblement deux fois, au printemps (début juin : haut niveau d'eau) et à la fin de l'été (fin août : bas niveau d'eau). Le niveau de précision est fonction du type d'imagerie utilisée.
- Le taux d'humidité des milieux humides peut être estimé par imagerie radar. Monique Bernier (INRS) est spécialiste dans ce domaine et a été contactée pour aider à établir les protocoles.
- Utiliser dans les parcelles 15 x15 km prédéfinies par le projet.

H3. Indicateur: Déplacement de la limite entre les forêts et les milieux humides et taux d'afforestation.

- Le climat plus sec et le feu favorisent l'apparition du pin gris dans le Bas-Saint-Laurent.
- La progression ou le retrait du couvert forestier est un autre indicateur de changements d'hydrologie et de charge nutritive de l'eau des tourbières, des marais ou des marécages (p. ex., des milieux plus ou moins humides auront moins ou plus d'arbres).
- Le déplacement de la limite forêts / tourbières peut être suivi à l'aide d'imagerie satellite ou à l'aide de photos aériennes lorsque disponibles (c.-à-d., essentiellement dans le sud).

Pour la méthode de ces trois indicateurs, voir l'indicateur P1.

Question: Quels sont les effets des CC sur la disponibilité printanière des étangs temporaires?

- Ces étangs sont particulièrement importants pour la reproduction des amphibiens.

H4. Indicateur: Superficie des étangs temporaires

Méthode : En ce moment, il n'y a pas de méthode de télédétection permettant de déterminer la présence et la superficie des étangs temporaires. Cependant, Yohann Dubois du MDDEFP a un projet pilote afin de déterminer quelles seraient les méthodes les plus efficaces pour y parvenir. À vérifier avec lui l'an prochain pour connaître les avancées de son projet.

Milieux humides: échantillonnage terrain

Les milieux humides sont généralement hétérogènes, car la végétation varie en fonction des niveaux d'eau. Canards illimités ont développé une méthode afin d'y échantillonner la végétation et cette méthode peut servir de base à l'échantillonnage de ces milieux. Leur technique est la suivante: 1- superposer une grille avec des cellules de dimension données (ils utilisent un hectare) au milieu humide afin de le subdiviser en unités d'échantillonnage et 2- assigner de façon aléatoire une sous-parcelle d'échantillonnage à l'intérieur de chaque cellule. Une autre option consiste à : 1- diviser le milieu humide en fonction des types de végétations à partir de photos aériennes et 2 assigner de façon aléatoire une ou plusieurs sous-parcelles d'échantillonnage à chaque type de végétations répertoriées. Dans le contexte du suivi de la biodiversité, afin d'éviter les charges d'échantillonnage trop lourdes par site, un maximum de cinq sous-parcelles d'échantillonnage distribué du côté de l'accès au milieu humide devrait être sélectionné. Une autre option est d'établir une sous-parcelle par hectare pour les 5 premiers et une sous-parcelles par 10 ha par la suite. Le centre de chacune de ces sous-parcelles d'échantillonnage devrait être marqué sur le terrain afin d'être ré-échantillonné d'année en année. Protocole basé sur Courchesne (2012).

Question: Quels sont les effets des CC sur les processus physico-chimiques et les communautés végétales des milieux humides?

H5. Indicateur: Composition en nutriment et pH de l'eau des milieux humides.

Méthode : Prendre un échantillon d'eau composite à partir du centre des différentes sous-parcelles d'échantillonnage, c'est-à-dire, mélanger de l'eau de chaque sous-parcelle pour former un seul échantillon. Ces données n'ont pas être analysée en tant que telle, elles serviront de variables prédictives pour comprendre la dynamique végétale. Le pH peut être mesuré à l'aide d'une sonde au centre de chaque sous-parcelle. Ces échantillons d'eau peuvent être envoyés dans des laboratoires spécialisés pour analyses. Au gouvernement, le Centre d'expertise d'analyse environnementale du Québec (CEAEQ) fait ce type d'analyses. Ces données n'ont pas à être analysée en tant que telle, elles serviront de variables prédictives pour comprendre la dynamique des autres organismes.

Fréquence : Au 2 ou 3 ans. 1 fois par année d'échantillonnage.

Temps : 15 minutes à 2 personnes.

Coût : Les prix des analyses au CEAEQ :

MA. 303 – P 5.2 : Phosphore total en trace (p-t-trace) (limite de détection 0.6 ug/l) est 36.50\$/éch Québec

MA. 800 – Chlor. 1.0 chlorophylle a (chlor-a) - est de 22,50 \$/éch Québec

MA. 303 – N 1.0 Nutriments (nitrate-nitrite, azote total, azote ammoniacal)- est de 35.50\$/éch Québec

Donc $(36,50 + 22,5 + 35,5) * 1,13 = 107\$$ pour les rivières.

Fréquence : Une fois au 3 à 5 ans.

Temps : 30 minutes pour une personne.

Expertise : Faible sur le terrain, moyen en laboratoire.

H6. Indicateur: Niveau d'eau des milieux humides.

Méthode : Le niveau d'eau peut être mesuré sur place à des points de références au centre des sous-parcelles servant à mesurer la végétation herbacée. La profondeur y est mesurée à l'aide d'un tube de PVC muni d'un embout coudé l'empêchant de s'enfoncer dans la matière organique au fond des marais. Ces données n'ont pas être analysée en tant que telle, elles serviront de variables prédictives pour comprendre la dynamique des autres organismes.

Fréquence : Une fois au 3 à 5 ans. Si plusieurs visites sont faites dans l'année, le niveau d'eau devrait être noté toutes les fois.

Temps : 15 minutes pour une personne.

Coût : Faible.

Expertise : Faible.

Question: Quels sont les effets des CC sur la composition des communautés de plantes des milieux humides?

H7. Indicateur: Composition en végétaux (plantes vasculaires) et couvert muscinale (bryophytes).

Méthode : Au centre de chaque sous-parcelle, mesurer sur 1 m² (0.56 m de rayon), le nombre de semis pour les espèces au potentiel de plus de 4 m pour 2 classes de tailles, 1- moins de 30 cm, 2- plus de 30 cm, mais moins de 1cm de DHP. Sur les mêmes sous-parcelles, déterminer la composition végétale (herbacées, arbustes, lichens et mousses) en classe de recouvrements. Pour les mousses et certains groupes de plantes vasculaires (p.ex., carex, graminées), il faut arrêter l'identification au genre ou à la famille, car sinon, le risque d'erreur est trop important. Ce niveau taxonomique serait suffisant pour détecter les changements importants survenant dans les milieux humides. De plus, de tels changements de composition sont suffisants pour détecter des changements hydrologiques. Le centre des sous-parcelles devrait être marqué d'une tige de métal afin de remesurer les mêmes endroits d'une fois à l'autre. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : 1 fois au 3 à 5 ans.

Temps : 2 heures à 1 personne (hormis si des espèces inconnues sont rencontrées).

Coût : Nul.

Expertise : Moyen à élevé en fonction des groupes taxonomiques rencontrés. Une formation pour l'identification des plantes de milieux humides est offerte au CSBQ.

H8. Indicateur: Composition en arbres et arbustes.

Méthode : Sur 4 m² centré sur la sous-parcelles, identifier à l'espèce, mesurer le DHP (diamètre à hauteur de poitrine; 1.3m) et numéroter (à l'aide de plaquette de métal ou de peinture) tous les individus d'espèces ayant le potentiel de dépasser 4 m de haut. Noter tous les individus faisant plus d'un centimètre de DHP. Pour les années subséquentes, il suffit de mesurer le DHP des

individus à nouveau et identifier les individus morts et les recrues. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : 1 fois au 3 à 5 ans.

Temps : Une demi-journée à 2 personnes la première année. 2 heures à 2 personnes les années subséquentes.

Coût : Faible.

Expertise : Faible.

Question: Est-ce que les CC ont des effets synergétiques avec les espèces exotiques envahissantes (EEE)?

H9. Indicateur: Proportion d'envahissement par des EEE ou des espèces indigènes du Québec (mais non locale) dans les marais.

Méthode : Noter la présence et la proportion d'EEE et leur espèce dans la sous-parcelle de 4 m² même s'il s'agit d'herbacées.

Fréquence : 1 fois au 3 à 5 ans.

Temps : 30 minute à 1 personne.

Coût : Nul.

Expertise : Moyenne.

Question: Quels sont les effets des CC sur la composition des communautés fauniques des milieux humides?

H91. Indicateur: Macro-invertébrés benthiques, larves d'odonates.

Méthode : Inspiré de la méthodologie de MDDEFP 2012. L'échantillonnage doit être réalisé près des sous-parcelles de végétations à l'aide d'un filet troubleau (*D-net*) d'une maille d'ouverture de 600 µm. Un échantillon composite peut être obtenu en échantillonnant près de chaque sous-parcelle et en les mélangeant. L'échantillonnage de 20 quadrats de 30 cm sur 50 cm (coup de filet), couvrant ainsi une surface totale de 3 m². À chaque coup de filet, les macroinvertébrés benthiques ont été délogés manuellement pendant 30 s. L'échantillon composite a été conservé dans l'alcool éthylique à 70 % de volume. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : Au 3 à 5 ans. 1 ou 2 fois par année d'échantillonnage.

Temps : Sur le terrain 30 minutes pour 2 personnes, en laboratoire il faut compter de 2-3 jours/échantillon pour le tri et l'identification.

Coût : Le coût du filet est d'environ 200 à 300\$. Le coût en laboratoire pour l'identification est de 300 à 1000\$ par échantillon.

Expertise : Faible sur le terrain. Élevé en laboratoire.

H10. Indicateur: Inventaire acoustique de grenouilles (verte, des bois, crapaud, rainette) et oiseaux.

Méthode : Avec des systèmes d'enregistrements acoustiques (système d'enregistrement SM2, Wildlife Acoustic, environ 1000\$), il est possible de suivre les anoues et les oiseaux. Il est aussi possible d'utiliser le protocole des routes d'écoutes des anoues. Les deux méthodes pourront aussi être validés ensemble. De plus, bien que les systèmes acoustiques soient au départ plus dispendieux, ils permettront vraisemblablement des économies à long terme. L'analyse des cris va néanmoins nécessiter une expertise pour l'identification. De plus, bien que les systèmes acoustiques soient au départ plus dispendieux, ils permettront vraisemblablement des économies à long terme. Les anoues ne chantent pas tous à la même date, les inventaires d'anoues sont souvent faits en deux temps pour déceler les espèces d'étang temporaire, mais ce suivi pourrait être fait en laissant les appareils acoustiques en place toute la période d'échantillonnage (environ 1 mois et demi). Le premier (#1) est fait pour détecter la grenouille des bois et possiblement la rainette crucifère et même le crapaud d'Amérique. Le second inventaire (#2) est situé au cœur de la période de reproduction du crapaud d'Amérique. Les dates changent selon les régions (feuillue : #1- 1er au 30 avril / #2-1er au 15 mai; mixte : #1 15 avril au 15 mai / #2 15 mai au 31 mai ; boréale : #1 - 1er au 31 mai et #2 - 1er au 15 juin). Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : Au 3 à 5 ans. 2 visites, une première pour installer les appareils et une deuxième pour les récupérer (voir date ici-haut).

Temps : 30 minutes à 1 personne.

Coût : 1000\$ par site pour l'appareil acoustiques. Ces appareils peuvent également être utilisés en milieux forestiers également.

Expertise : Faible sur le terrain. Élevé en laboratoire, cependant, les méthodes d'analyses sont de plus en plus développées et faciles à utiliser.

H92. Indicateur: Inventaires des vertébrés.

Méthode : Routes d'écoute et d'identification visuelle. Il est également possible de profiter des visites terrains pour identifier les organismes sur places. L'ABMI (2010b) recommande le protocole suivant pour la détection des vertébrés : avant de pénétrer dans le marais, s'installer en périphérie de celui-ci sur un promontoire. À partir de ce promontoire, identifier pendant 10 minutes tous les vertébrés vus, entendus ou détectés via des signes distinctifs. Noter la source d'identification (p.ex., vu, entendu) Utiliser des binoculaires. Pour chaque espèce, si possible, identifier le genre et le nombre d'individus. Après cette recherche, toutes les autres observations de vertébrés devraient être notées durant le reste de l'échantillonnage. Noter le moment de l'entrée et de la sortie du milieu humide afin de pouvoir déterminer l'effort d'échantillonnage, et ce, même si aucun organisme n'est observé. Chaque personne sur le site doit noter ce qu'il voit afin de pouvoir calculer le biais des différents observateurs. De façon optimale, cette méthode devrait être appliquée plusieurs fois par année, tôt au printemps pour les anoues et l'été pour les oiseaux.

Fréquence : Au 3 à 5 ans. Idéalement, plusieurs visite par année.

Temps : 20 minutes à 1 personne.

Coût : 0

Expertise : Élevé sur le terrain.

H11. Indicateur: Abondance des pollinisateurs - papillons.

Méthode : Lors de la deuxième visite terrain servant à récupérer les appareils acoustiques, les papillons peuvent être échantillonnés visuellement. Cependant, deux visites supplémentaires seraient nécessaires pour couvrir les périodes de vols de la majorité des espèces. Il suffit de marcher 200 m et de noter toutes les espèces qui sont vues à 3m de chaque côté du tracé. Il est à noter que le vol des papillons dépend de la température (supérieure à 12 C), des vents (inférieurs à 15 km/hre) et que la journée soit ensoleillée ce qui apporter des problèmes logistiques. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : 3 visites par année (fin mai, fin juin et fin juillet ou les débuts des mois subséquents). Échantillonnage au 3 à 5 ans.

Temps : 30 minutes pour 1 personne

Coût : Nul.

Expertise : Élevé. Développer la capacité de repérer les papillons et de les identifier et long.

Contact : Maxime Larivée (Insectarium de Montréal).

Milieux humides: échantillonnage terrain - puits de carbone.

Question: Quels sont les effets des CC sur les processus des tourbières et leurs bilans de carbone?

H12. Indicateur: Productivité végétale.

Méthode : À la fin de la saison de croissance, récolter la biomasse à la surface du sol sur une parcelle de 1 m². En laboratoire, trier la biomasse par espèces, sécher et peser. Prendre un échantillon à proximité de chaque sous-parcelle.

Fréquence : 1 fois au 3 à 5 ans.

Temps : 1 heure à 2 personnes au terrain et 7 heures au laboratoire.

Coût : Faible.

Expertise : Moyenne (être capable d'identifier les différentes espèces).

H13. Indicateur: Vitesse de décomposition de la matière organique.

Méthode : Des sacs de litières peuvent être utilisés. Le choix des espèces à mettre dans les sacs influence le temps. Il est nécessaire de ramener du matériel à décomposer (feuilles, racines, ou autres) au laboratoire où il sera séché, pesé, mis dans des sacs, traité, séché et pesé à nouveau et étiqueté pour finalement être installé sur le terrain. Après un certain temps, il faut les retrouver, les laver, les sécher et les peser. En milieu humide où les espèces sont plus petites qu'en milieu forestier, cet exercice est long. Cela nécessite au moins deux visites au terrain la première année, une pour aller chercher le matériel et une autre pour l'installer. Une période de deux semaines peut être calculée pour permettre la préparation des échantillons. Pour le nombre de répliqués, il faut un minimum de 5 sacs par emplacement, mais 10 sacs sont optimaux (il y a souvent des perturbations comme des animaux trop curieux, des sacs disparus ou jamais retrouvés). Mettre 2 sacs près de chaque sous-parcelle serait un bon compromis (8 au total). La maille du choix des sacs peut influencer la vitesse de décomposition. Les sacs doivent ensuite être lavés, séchés et pesés de nouveau en laboratoire.

Fréquence : 3 à 5 ans.

Temps : Environ 2 heures sur le terrain par site, mais nécessite du long travail en laboratoire.

Coût : Le coût des sacs est d'environ 1\$, mais ça exclut le tissu choisi (peu dispendieux).

Expertise : Faible.

Contact : (Vicky Bérubé, doctorante à l'Université Laval).

H14. Indicateur : Émission de méthane et de gaz carbonique.

Méthode : *Cette méthode reste à déterminer (septembre 2013).*

Contact : Michelle Garneau (UQÀM : garneau.michelle@uqam.ca).

Milieux humides: ADN environnemental.

À utiliser en conjonction avec les analyses sur les puits de carbone pour mieux comprendre l'impact des CC sur la dynamique de décomposition et de production des CC en milieux humides.

Question: Quels sont les effets des CC sur les processus des tourbières et leur bilan de carbone?

H15. Indicateur: Composition et biomasse en micro-organismes.

- Si les techniques d'ADN environnemental sont disponibles, déterminer la composition en champignons et bactéries serait fortement utile afin de comprendre les changements de dynamique de décomposition et les changements en micro-organismes dus ou causant les changements de végétation.
- En milieux humides, la composition en archéobactéries méthanogènes est d'un intérêt élevé, car ce groupe est responsable de la production de méthane, un puissant gaz à effet de serre.
- L'ADN environnemental peut permettre d'identifier les groupes fonctionnels au lieu d'aller à l'espèce (p. ex., groupe permettant le recyclage des éléments), c'est plus simple et plus significatif en terme de processus écosystémiques (Roxanne Andersen – Chercheur en Écosse qui a fait son doctorat avec Line Rochefort – Roxanne.Andersen@uhi.ac.uk).

Milieux humides: participation citoyenne.

Question: Quels sont les effets des CC sur les interactions entre les espèces d'une communauté (phénologie - plante - pollinisateur)?

H5. Indicateur: Phénologie des plantes de milieux humides et visite de pollinisateurs.

- Faire des observations répétées sur les mêmes plantes durant l'été (choix d'espèces limitées) en établissant un programme de science citoyenne inspirée de : <https://sites.google.com/a/alaska.edu/melibee-project/>
- Les citoyens choisissent un habitat humide et identifient une plante et ils suivent leur plante durant tout l'été et remplissent des données sur son développement en lien avec les

pollinisateurs (choix de plantes selon la région ou l'habitat, elles peuvent être indigènes ou exotiques, p.ex. bleuet, canneberge, trèfle blanc).

- Protocole détaillé : <https://sites.google.com/a/alaska.edu/melibee-project/citizen-science/citizen-science-monitoring-instructions>
- On peut aussi associer ce programme avec un suivi photographique des insectes pollinisateurs (p. ex., groupe école) - détail au http://www.spipoll.org/sites/spipoll.org/files/Proto_Spipoll_detaille_26.pdf

4.10.8 Des scénarios d'échantillonnage pour les milieux humides

Scénario 1 : Analyse au niveau du paysage.

Le suivi au niveau du paysage permettrait d'extraire des informations différentes et complémentaires de celles au niveau taxonomique et permettrait d'appréhender les changements à larges échelles. Il est à noter qu'il existe une littérature relativement abondante sur les changements à l'échelle du paysage basée sur l'analyse de photographies aériennes et d'images satellites. Une revue de cette littérature pour le territoire du Québec devrait être faite avant de débiter de telles analyses afin d'axer les nouvelles analyses sur les lacunes dans nos connaissances. Ces analyses devraient être concentrées dans des régions choisies à l'aide du protocole des chapitres 5 et 6.

P1. Indicateur : Proportions et tailles des écosystèmes dans le paysage.

H1. Indicateur: Abondance de milieux humides et leurs caractéristiques générales dans le paysage.

H2. Indicateur: Taille et caractérisation des mares dans les milieux humides.

H3. Indicateur: Déplacement de la limite entre les forêts et les milieux humides et taux d'afforestation.

Temps en laboratoire : Dépendant du nombre polygone et de la superficie à étudier.

Coût en laboratoire : 50-75\$/hre pour un photo-interprète. Les photos sont gratuites pour le MDDEFP (Alain Demers [direction du patrimoine écologique et des parcs] est responsable d'obtenir les photos pour le MDDEFP). Un photo-interprète peut délimiter de 15 à 25 polygones à l'heure. Il faut consulter les cartes du 3ème décennal pour déterminer approximativement le nombre de polygones dans les régions à faire photo-interprétées. Noter que si des éléments spéciaux sont demandés (p.ex., délimiter les mares à l'intérieur des tourbières), cela peut diminuer la productivité du photo-interprète.

Expertise en laboratoire : Élevé.

Avantages

- Données historiques à long terme disponibles
- Données gratuites.
- Échelle différente des autres suivis proposés.

Désavantages

- Coût en laboratoire possiblement élevé en fonction des superficies à analyser.
- La qualité des photos change dans le temps ce qui peut limiter les comparaisons entre les photos passées et présentes.

Scénario 2 : Nouveau suivi, mineur.

L'établissement d'un nouveau suivi en milieu humide sera nécessaire, car aucun suivi dans ces milieux n'existe en ce moment. Dans le cadre d'un suivi de base, les sites pourraient être visités aux 5 ans et se concentrer sur des prises de données pouvant être effectuées en une visite. Le suivi présenté contiendrait 50 sites, soit 10 sites visités par année. Ces sites devraient être situés dans des régions choisies à l'aide du protocole des chapitres 5 et 6.

H5. Indicateur: Composition en nutriment et pH de l'eau des milieux humides.

H6. Indicateur: Niveau d'eau des milieux humides.

H7. Indicateur: Composition en végétaux (plantes vasculaires) et couvert muscinale (bryophytes).

H8. Indicateur: Composition en arbres et arbustes.

H9. Indicateur: Proportion d'envahissement par des EEE ou des espèces indigènes du Québec (mais non locale) dans les marais.

H91. Indicateur: Macro-invertébrés benthiques (MIB), larves d'odonates.

H92. Indicateur: Inventaires des vertébrés.

Temps terrain : 2 jours-personne (une journée à deux personnes).

Coûts terrain : Environ 30\$ à l'établissement des sites, plus environ 40\$ de façon récurrente.

Expertise terrain : Élevé principalement pour l'identification des vertébrés et des plantes.

Coûts en laboratoire : Environ 650\$ pour l'identification et 107 \$ pour les analyses d'eau.

Expertise en laboratoire : Élevé pour les MIB.

Coûts totaux : Par site, 2 jours-personne (environ 2000\$) et 757\$ pour les analyses. $(2000 + 757) * 10 = 27\,570\$$ par année.

L'analyse de ces données prendrait environ 45 jours.

Avantages

- Faible coût.
- Couverture de plusieurs groupes taxonomiques.

Désavantages

- Longue période entre les visites ce qui peut limiter la capacité de détecter des cycles chez les organismes.
- Nécessite une expertise élevée sur le terrain.
- Une visite par année offre un portrait limité de la diversité des vertébrés et des MIB.
- La détection des vertébrés est dépendante des conditions météorologiques, ce qui peut limiter l'efficacité de leur suivi si le moment disponible pour l'échantillonnage n'est pas flexible (p.ex., une journée ne pouvant être déplacée).

Scénario 3 : Nouveau suivi moyen, plusieurs visites par année.

Ces indicateurs devraient être mesurés une fois :

H5. Indicateur: Composition en nutriment et pH de l'eau des milieux humides.

H6. Indicateur: Niveau d'eau des milieux humides.

H7. Indicateur: Composition en végétaux (plantes vasculaires) et couvert muscinale (bryophytes).

H8. Indicateur: Composition en arbres et arbustes.

H9. Indicateur: Proportion d'envahissement par des EEE ou des espèces indigènes du Québec (mais non locale) dans les marais.

H91. Indicateur: Macro-invertébrés benthiques, larves d'odonates.

Ces indicateurs devraient être mesurés trois fois dans l'année :

H10. Indicateur: Inventaire acoustique de grenouilles (verte, des bois, crapaud, rainette) et d'oiseaux.

H92. Indicateur: Inventaires des vertébrés.

H11. Indicateur: Abondance des pollinisateurs - papillons.

Temps terrain : La première visite prendrait 2 jours-personnes. Les 2 visites subséquentes 1 jour-personne (une demi-journée à deux personnes). Si les sites sont à proximité l'un de l'autre, il serait possible d'échantillonner 2 sites en une journée lors des visites 2 et 3.

Coûts terrain : Environ 230\$ à l'établissement des sites (200\$ par site pour les appareils acoustiques), plus environ 40\$ de façon récurrente.

Expertise terrain : Élevé. Principalement pour l'identification des vertébrés, des plantes et des papillons.

Temps en laboratoire : 2 jours-personne par site pour les données acoustiques (420\$ assumant un coût de 210\$ par jour).

Coûts en laboratoire : Environ 650\$ pour l'identification et 107 \$ pour les analyses d'eau.

Expertise en laboratoire : Élevé pour les MIB et les données acoustiques.

Coûts totaux : 2 jours-personne pour le premier échantillonnage et 1 jours-personne pour chacun des échantillonnages subséquents, donc 4 jours-personne par site/année (4000\$). 1197\$ de laboratoire par site/année. Pour 10 sites : $(4000 + 1197) * 10 = 51\ 970\$$.

L'analyse de ces données prendrait environ 60 jours.

Avantages

- Couverture taxonomique extensive.
- Couverture temporelle intra-annuelle importante.
- Possibilité de comparer l'efficacité des méthodes basées sur les mesures acoustiques et terrains. Une des deux pourrait éventuellement être abandonnée.

Désavantages

-
- Expertise élevée en laboratoire et sur le terrain.
 - Longue période entre les années de visites ce qui peut limiter la capacité de détecter des cycles chez les organismes.

Scénario 4 : Nouveau suivi, majeur plusieurs visites par année.

Un élément particulièrement important en ce qui a trait aux CC et aux milieux humides est la possibilité que ces derniers, actuellement des puits de carbone, deviennent des émetteurs de carbone. Un suivi majeur de ces milieux devrait inclure une section couvrant les échanges gazeux ayant cours dans ces écosystèmes ainsi que la dynamique d'accumulation de la matière organique. Pour ce faire, une quatrième visite devrait être ajoutée à l'automne afin que déterminer la productivité et les taux de décomposition dans ces milieux.

Ces indicateurs devraient être mesurés une fois :

H5. Indicateur: Composition en nutriment et pH de l'eau des milieux humides.

H6. Indicateur: Niveau d'eau des milieux humides.

H7. Indicateur: Composition en végétaux (plantes vasculaires) et couvert muscinale (bryophytes).

H8. Indicateur: Composition en arbres et arbustes.

H9. Indicateur: Proportion d'envahissement par des EEE ou des espèces indigènes du Québec (mais non locale) dans les marais.

H91. Indicateur: Macro-invertébrés benthiques, larves d'odonates.

H12. Indicateur: Productivité végétale.

H13. Indicateur: Vitesse de décomposition de la matière organique.

H14. Indicateur : Émission de méthane et de gaz carbonique. – *L'information est manquante pour cet indicateur et n'est donc pas incluse.*

Ces indicateurs devraient être mesurés trois fois dans l'année :

H10. Indicateur: Inventaire acoustique de grenouilles (verte, des bois, crapaud, rainette) et d'oiseau.

H92. Indicateur: Inventaires des vertébrés (cet indicateur pourrait également être mesuré lors de la visite automnale).

H11. Indicateur: Abondance des pollinisateurs - papillons.

Temps terrain : La première visite prendrait 2 jours-personnes. Les 3 visites subséquentes 1 jour-personne (une demi-journée à deux personnes). Si les sites sont à proximité l'un de l'autre, il serait possible d'échantillonner 2 sites en une journée lors des visites 2, 3 et 4.

Coûts terrain : Environ 230\$ à l'établissement des sites (200\$ par site pour les appareils acoustiques), plus environ 40\$ de façon récurrente.

Expertise terrain : Élevé, principalement pour l'identification des vertébrés et des plantes.

Temps en laboratoire : 5 jours-personne par site pour les données acoustiques, décomposition et productivité (1050\$ assumant un coût de 210\$ par jour).

Coûts en laboratoire : Environ 650\$ pour l'identification et 107 \$ pour les analyses d'eau.

Expertise en laboratoire : Élevé pour les MIB et les données acoustiques.

Coûts totaux : 2 jours-personne pour le premier échantillonnage et 1 jours-personne pour chacun des échantillonnages subséquents, donc 5 jours-personne par site/année (5000\$). 1807\$ de laboratoire par site/année. Pour 10 sites : $(5000 + 1807) * 10 = 68\ 070\$$.

L'analyse de ces données prendrait environ 70 jours.

Avantages

- Couverture taxonomique extensive.
- Couverture temporelle intra-annuelle importante.
- Possibilité de comparer l'efficacité des méthodes basées sur les mesures acoustiques et terrains. Une des deux pourrait éventuellement être abandonnée.
- Inclusion de processus important liés à la dynamique du carbone.

Désavantages

- Expertise élevée en laboratoire et sur le terrain.
- Longue période entre les années de visites ce qui peut limiter la capacité de détecter des cycles chez les organismes.
- Travail de laboratoire extensif.

4.10.9 Des indicateurs pour les milieux forestiers (F)

Plusieurs programmes de suivi forestier existent au Québec. De ce fait, sans prendre de mesures additionnelles, plusieurs questions peuvent être répondues à l'aide de ces suivis existants, c'est pourquoi plus de questions et d'indicateurs sont présentés pour les milieux forestiers. De plus, il est possible de bonifier les suivis existants à l'aide de nouvelles mesures afin d'obtenir un portrait plus exhaustif de la biodiversité des milieux forestiers.

Forestier: Télédétection et suivis existants - Arbres.

De nombreux indicateurs des effets des CC sur les forêts peuvent être mesurés à partir des suivis existants dans la province. La plupart de ces données se limitent cependant aux arbres et aux aspects économiques de la forêt.

Question: Quels sont les effets des CC sur les régimes de perturbations forestières du Québec?

- Une des façons majeures par lesquelles les CC devraient influencer les forêts est par l'entremise de changements dans les patrons de perturbations.

F1. Indicateur: La fréquence, la superficie et le moment de l'année où surviennent les feux de forêts.

Méthode : Les feux de forêts sont très variables dans le temps en plus d'être affectés par leur contrôle à large échelle par la SOPFEU. Leurs cycles ont déjà été étudiés pour plusieurs régions du Québec (voir, entre autres, les travaux de Y. Bergeron, UQÀT) et une analyse à ce sujet a même été publiée cette année par Girardin et al. (2013). Comme les feux sont très variables, refaire ces analyses à courte échelle (au 5 ans), n'est pas approprié pour détecter des tendances. C'est pourquoi l'analyse des feux ne devrait être faite qu'à longs intervalles (par exemple, dans 10 ans). Pour ce faire, des méthodes peuvent être consultées dans Girardin et al. (2013) et dans les références qui y sont citées (entre autres, des revues de littérature sur l'histoire de feux des 200 dernières années [Bergeron et al. 2004 et Gauthier et al. 2009] et une base de données sur les feux de plus de 200 ha au Canada [Stocks et al. 2003]). Comme ces patrons sont complexes et que l'expertise est déjà présente au Québec, il faudrait contacter l'équipe de Y. Bergeron pour connaître les derniers développements et collaborer au besoin avec eux plutôt que de reproduire des analyses dont ils ont l'expertise.

Fréquence : 1 fois au 10 ans.

Temps : Minimale 1 mois.

Coût : Les données devraient être accessibles gratuitement pour les membres du gouvernement.

Expertise : Élevé

F2. Indicateur: La fréquence, la superficie, la répartition et l'intensité des attaques par la tordeuse des bourgeons d'épinette.

Méthode : La direction de la protection des forêts (DPF - MRN) possède un système de suivi comprenant environ 500 sites permanents où les ravageurs forestiers (insectes et maladies) sont échantillonnés. Des sites temporaires sont ajoutés pour circonscrire plus précisément les infestations lorsque celles-ci sont détectées : <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/fimaq/insectes/fimaq-insectes-portrait.jsp>. Les données systématiques concernent principalement la tordeuse des bourgeons d'épinette. Jusqu'à présent, aucun changement d'aire de répartition n'a été observé chez la tordeuse (Louis Morneau, Louis.Morneau@mrn.gouv.qc.ca, communication personnelle). Cependant, cela pourrait changer et la tordeuse pourrait se déplacer vers le nord et causer des épidémies dans les pessières dues à des changements phénologiques (travaux laboratoire Dan Kneeshaw, UQÀM). En fait, comme le cycle de la tordeuse des bourgeons d'épinettes est historiquement d'environ 30 à 50 ans (Boulanger et al. 2012), il est peut probable que d'autres changements que des changements de répartition puissent être attribuer aux CC à court ou même moyen terme. À cet effet, nous suggérons d'analyser les changements de répartition au 10 ans. Cet élément peut facilement être déterminé à partir des données de la DPF en comparant la répartition de l'espèce d'année en année.

Quant à l'intensité, la fréquence et la superficie des épidémies, faire le lien entre ces éléments et les CC demanderait de plus longues analyses, car plusieurs autres éléments peuvent les influencer (p.ex., composition forestière du paysage, intervention humaine) et parce que ces liens ne pourront probablement pas être fait avant plusieurs décennies. Comme plusieurs groupes travaillent sur cet organisme dû à son impact sur les forêts commerciales, nous recommander de survoler la littérature sur le sujet lors de l'écriture de rapport sur l'état de la biodiversité et de contacter le personnel de la DPF pour déterminer s'ils croient que des changements sont survenus avant d'entreprendre des analyses.

Fréquence : 1 fois au 10 ans.

Temps : De 2 semaines

Coût : Nul, les données de ravageurs forestiers sont disponibles.

Expertise : Moyenne.

F3. Indicateur: Distribution des ravageurs forestiers

Méthode : De la même façon que pour la tordeuse des bourgeons d'épinettes, il serait possible de détecter l'expansion des autres ravageurs forestiers à partir des données de la DPF. Il est à noter que les ravageurs sont étudiés une fois découvert et qu'il n'y a pas de recherche systématique afin

de détecter les différents types de ravageurs avant que leurs effets soient visibles. Pour se faire, il suffit de comparer l'aire de répartition des espèces détectées à leur répartition historique et à noter les espèces pour lesquelles des nouvelles infestations sont observées.

Fréquence : 1 fois au 10 ans.

Temps : De 1 à 2 semaines

Coût : Nul, les données de ravageurs forestiers sont disponibles.

Expertise : Moyenne.

Question: Quels sont les effets des CC sur la phénologie forestière.

- La phénologie des organismes est très importante pour déterminer le synchronisme des interactions interspécifiques (p. ex., prédateurs-proies, plantes-pollinisateurs).
- Des données phénologiques sont disponibles de plusieurs sources et sont généralement aisées à analyser.
- Les réponses phénologiques sont parmi les réponses les plus attendues et observées des CC.

F4. Indicateur: Date de verdissement et de sénescence de la végétation

Méthode a : Suivi sur individu. Un suivi phénologique de plusieurs plantes forestières faisant appel à la participation citoyenne existe sous le nom de "Plantwatch". Les plantes suivies incluent au Québec le bouleau blanc, le peuplier faux-tremble, le mélèze laricin, l'érable rouge et le thé du Labrador. Les données sont disponibles sur ce site: <http://www.naturewatch.ca/english/download.html>. Peu de données sont récoltées au Québec actuellement. Un effort de sensibilisation (p. ex., des employés du MRN et du MDDEFP dans les régions du Québec ou autres organismes partenaires) permettrait de grandement bonifier ces données. L'analyse temporelle des données phénologiques directes est simple et peut être basée sur les nombreuses publications déjà faites sur le sujet (p. ex., Menzel et al. 2006, Inouye 2008).

Fréquence : 1 fois au 5 ans

Temps : de 1 à 2 semaines.

Coût : Nul.

Expertise : Faible

Méthode b : Suivi sur le paysage. Le suivi phénologique des plantes peut être effectué à l'aide de données satellitaires. Les méthodes basées sur des mesures NDVI sont fréquemment utilisées

(voir White et al. 2009 pour une comparaison de 10 méthodes d'analyse, voir également Wu and Liu 2013 pour un exemple d'analyse liant des mesures NDVI à des données météorologiques). Ces analyses demandent une grande expertise. Cependant, celles-ci, une fois programmées, peuvent être reproduites assez aisément. Également, une revue de littérature devrait permettre de trouver de nombreuses informations à ce sujet pour le Québec.

Fréquence : 1 fois au 10 ans.

Temps : 2 à 3 mois.

Coût : Les images satellites MODIS pour faire les mesures de NDVI sont gratuites.

Expertise : Élevé.

F5. Indicateur: Production de sirop d'érable, date de début et de fin.

Méthode : La fédération des producteurs acériculteurs du Québec récolte les données de début, de fin et de quantité de sirop produit par région administrative depuis 1999. Jean-Pierre Bellegarde est responsable de cette base de données et est prêt à partager les données avec le MDDEFP (contacte : jpbellegarde@upa.qc.ca). Il est connu que la durée et le moment de l'écoulement de la sève dépendent de la température, des précipitations et de la quantité de neige. Les variables climatiques importantes pour comprendre la production de sirop d'érable ainsi que les méthodes d'analyses sont disponibles dans Duchesne et al. (Duchesne et al. 2009). Duchesne et al. (Duchesne et al. 2009) ont d'ailleurs observé une diminution de la production de sirop de 1985 à 2006. Cette méthodologie pourrait être répétée en 2017 afin de déterminer si la tendance se poursuit dans la décennie subséquente. Les dates de début et de fin de récolte peuvent être analysées de la même manière que pour l'indicateur F4a.

Fréquence : 1 fois au 10 ans.

Temps : 2 à 3 semaines.

Coût : Nul.

Expertise : Faible.

Question: Quels sont les effets des CC sur la composition et la croissance forestière du Québec.

- Les écosystèmes forestiers ont une importance écologique et économique majeure au Québec ce qui explique la grande quantité de suivis axés sur les arbres. De ce fait, plusieurs indicateurs de l'effet des CC sur les arbres peuvent être mesurés à partir de ces données.
- Différents outils satellitaires pour le suivi des forêts à grande échelle sont suggérés dans (Barrett 2011)

F6. Indicateurs: La répartition des espèces arborescentes.

Méthode : Le réseau de placettes-échantillons permanent (PEP, MRN) contient 12 000 sites au sud du Québec où tous les individus des espèces ayant la capacité de dépasser 4m sont mesurés. La contraction et l'expansion de l'aire de distribution peuvent ensuite être calculées en reproduisant la méthode de Zhu et al. 2012, cependant, comme la composition en semis n'est pas incluse dans les PEP, ces analyses devraient être faites en comparant la composition des arbres de faible taille avec celle des arbres de grande taille. Comme les arbres ont une longue durée de vie et que leur migration devrait être lente, ces analyses ne devraient être effectuées qu'à très long terme. Cependant, comme la composition forestière est très importante pour le Québec, il est très probable que de telles analyses soient faites par d'autres chercheurs et qu'une revue de littérature permet de trouver ces résultats. Contacter le personnel de la DRF ou des chercheurs au CEF serait une bonne méthode de connaître les groupes de recherche travaillant sur le sujet.

Fréquence : 1 fois au 20 ans.

Temps : 1 mois.

Coût : Nul.

Expertise : Moyenne.

F7. Indicateurs: La croissance des espèces arborescentes.

Méthode : Le réseau de placettes-échantillons permanent (PEP, MRN) contient 12 000 sites au sud du Québec où tous les individus des espèces ayant la capacité de dépasser 4m sont mesurés. La croissance des espèces arborescentes peut être étudiée au niveau des espèces et des peuplements. Au niveau de l'espèce : Est-ce que la croissance moyenne de l'espèce X a changé en fonction des CC? Au niveau des peuplements : Est-ce que la productivité des peuplements forestiers a changé en fonction des CC? Pour cela, il faut s'assurer de tenir compte de multiples facteurs confondants tels que les conditions édaphiques et la densité des peuplements. Les méthodes pour parvenir à ces fins peuvent être complexes (voir, par exemple, (Paquette and Messier 2011) pour une étude au niveau du peuplement), mais étant donnée l'importance des forêts au Québec il est très probable que de telles analyses soient faites par d'autres chercheurs et qu'une revue de littérature permet de trouver ces résultats. Contacter le personnel de la DRF ou des chercheurs au CEF serait une bonne méthode de connaître les groupes de recherche travaillant sur le sujet.

Fréquence : 1 fois au 10 ans.

Temps : 2 à 4 mois.

Coût : Nul.

Expertise : Élevé

Forestier: suivis existants – Faune.

Plusieurs suivis existent sur les vertébrés terrestres au Québec et ont déjà été utilisés pour l'étude des CC. Certains indicateurs de biodiversité en vertu des CC pourraient être extraits de ces bases de données.

Question: Quels sont les effets des CC sur les communautés fauniques des écosystèmes forestiers?

F8. Indicateur: La distribution des grands ongulés.

Méthode : Les statistiques de chasse du Québec permettent de déterminer la progression des espèces (orignaux et cerfs) vers le nord (<http://www.mddefp.gouv.qc.ca/faune/statistiques/chasse-piegeage.htm>). La progression dans le secteur de la base Côte-Nord et dans le Nord du Québec peut-être particulièrement pertinente. Éventuellement, on pourrait aussi évaluer la progression du cerf de Virginie, mais pour le moment il n'est pas récolté dans les zones marginales de sa distribution nordique (Abitibi, Lac-Saint-Jean et Base Côte-Nord) donc on ne peut suivre sa montée au Nord même s'il est présent. Advenant l'ouverture de la chasse dans ce secteur on pourrait suivre sa récolte. Pour noter la progression vers le nord de certaines espèces d'ongulés, cela pourrait simplement se faire en recensant les prises les plus au nord de chaque espèce par année. Expliquer ces changements demanderait d'inclure les variables climatiques et les changements au niveau des habitats (structure des peuplements forestiers, fragmentation).

Fréquence : 1 fois au 5-10 ans.

Temps : 2 semaines.

Coût : Nul.

Expertise : Faible.

F9. Indicateur: Abondance des petits gibiers et des animaux à fourrure.

Méthode : Les statistiques de piégeage (et de la chasse au dindon) du Québec permettent de déterminer la progression des espèces vers le nord et, possiblement, des indices d'abondance (<http://www.mddefp.gouv.qc.ca/faune/statistiques/chasse-piegeage.htm>). Il suffirait de recenser les prises les plus au nord de chaque espèce d'année en année afin de suivre leur progression. Les

captures inusitées dans le nord de la distribution des espèces sont des cas très intéressants pour voir la progression des espèces. Par exemple, le nombre de cas d'espèces à fourrure trappé au dessus de la limite normale de répartition (p. ex., ours, coyote, renard roux, pécan). Ces données sont simples à analyser dans le cas de la progression de la répartition, mais il faut inclure d'autres facteurs, dont l'habitat, le climat et les autres espèces des réseaux trophiques.

Il existe une grande base de données pour la récolte du lièvre, du tétra et de la gélinotte (sauf au sud et au nord du Québec). Il serait possible d'extraire certains indices d'abondance, mais cette base de données permettrait surtout de suivre les changements dans la distribution de ces espèces puisque le biais d'effort de collecte empêche d'estimer des indices d'abondances stables dans le temps et l'espace.

Il existe une banque de données sur les animaux à fourrure qui pourrait permettre de détecter les changements de distribution. La distribution des canidés peut influencer la distribution des proies et les processus de compétitions. Par exemple, la distribution du loup, du coyote, du renard roux et du renard arctique pourrait être suivie. La distribution du coyote augmente constamment vers le Nord alors qu'il n'est au Québec que depuis 1944. Le pécan est une espèce qui est fortement influencée par la biodiversité régionale et les CC pourrait avoir des effets différents sur cette espèce que sur d'autres carnivores.

Fréquence : 1 fois au 5-10 ans.

Temps : 1 mois.

Coût : Nul.

Expertise : Moyenne.

F10. Indicateur: La phénologie et la répartition des oiseaux.

Méthode : Les oiseaux sont l'objet de trois suivis citoyens soit le Christmas Bird Count, le Breeding Birds Survey (BBS) et l'Étude des Populations d'Oiseaux du Québec (ÉPOQ). Ces données sont déjà utilisées pour observer les changements phénologiques de migration et la répartition des espèces. Le projet CC-bio a développé un cadre méthodologique pour étudier la phénologie et la répartition des oiseaux. Les analyses de phénologie ont été soumises pour publication scientifique par Xavier W. Francoeur et collègues (UQAR). Son mémoire de maîtrise est intitulé « Effets des changements climatiques sur la phénologie printanière de l'avifaune du Québec ». Les scripts utilisés par Mr Francoeur seront partagés avec le MDDEFP suite à la publication de ses résultats. La méthodologie développée par le projet CC-Bio pour le suivi de la répartition des oiseaux est décrite dans Berteaux et al. (Sous presse). Comme mentionné pour plusieurs autres organismes, les oiseaux étant charismatiques et les bases de données gratuites, il est fort à parier que ces analyses seront faites fréquemment par divers groupes de recherche. Une revue de littérature devrait être faite avant de faire quelques analyses qu'il soit.

Fréquence : 1 fois au 10 ans.

Temps : 2-3 mois.

Coût : Nul.

Expertise : Moyenne.

F11. Indicateur: Les fluctuations dans l'abondance des chauves-souris.

Méthode : Les chauves-souris font l'objet d'un suivi du MDDEFP en partenariat avec le Biodôme et Envirotel (réseau Chirops). Les chauves-souris, comme les oiseaux insectivores, pourraient être particulièrement affectés par les CC. Cependant, il y a un facteur confondant important dû au syndrome du museau blanc (smb), une infection fongique causant le déclin de plusieurs populations. Néanmoins, les espèces migratrices ne sont pas affectées par le smb, mais pourraient répondre aux variables climatiques. Le réseau Chirops permettrait de détecter les changements de répartition des espèces et la montée au nord de certaines espèces (migratrices). Il est à noter que le réseau Chirops n'est pas spécifiquement forestier. Le réseau est basé sur un réseau routier qui traverse différents habitats. Il serait possible d'ajouter des stations fixes d'écoute acoustique afin de bonifier les données de ce réseau.

Fréquence : 1 fois au 5-10 ans.

Temps : 2 semaines.

Coût : Nul.

Expertise : Moyenne.

Forestier : échantillonnage terrain en forêt

Pour effectuer des économies d'échelle et permettre de profiter de données historiques, l'ajout d'un suivi supplémentaire en milieu forestier devrait être fait en bonifiant l'échantillonnage sur certains sites des 3 principaux suivis existants (PEP, RÉSEF, Effets réels) où, minimalement, en tentant de reproduire certaines mesures de ces réseaux afin que les nouvelles mesures puissent être intégrées à l'un de ces réseaux. Le RÉSEF est particulièrement intéressant parce qu'il inclut déjà des mesures de lumières en sous-bois, de végétation herbacée, de concentration en nutriments des sols et des feuilles d'arbres. Dans le cas où les sites sont établis dans de nouveaux lieux, ceux-ci devraient avoir la taille standard utilisée dans les PEP, soit 11.3 m. La dynamique forestière étant assez lente, le suivi des sites pourrait être fait au 5 ans comme c'est le cas dans de nombreux suivis forestiers de par le monde.

Question: Quels sont les effets des CC sur la fertilité des sols, la composition végétale?

-
- Cette question est évidemment très importante dans le contexte industriel québécois, mais elle l'est également pour la conservation en général, la composition forestière ayant une grande influence sur la composition de tous les autres groupes taxonomiques.

F12. Indicateur: Concentration en nutriments, stœchiométrie (ratio C : N) et pH des sols.

Méthode : Prendre 4 échantillons composites de sol minéral par sites, c'est-à-dire, des échantillons provenant du mélange de sol provenant de 3 trous. C'est échantillons devraient être pris à proximité des sous-parcelles d'échantillonnages des herbacées. Ces échantillons de terre peuvent être envoyés dans des laboratoires spécialisés pour analyses. Au gouvernement, le Centre d'expertise d'analyse environnementale du Québec (CEAEQ) fait ces analyses. Ces données n'ont pas à être analysée en tant que telle, elles serviront de variables prédictives pour comprendre la dynamique des autres organismes.

Fréquence : 3 à 5 ans.

Temps : 1h à 1 personne.

Coût : Les coûts des analyses au CEAEQ :

MA. 405 – C 1.1 carbone organique total (cot) dans le sol est de 124\$/éch Laval ??

MA. 100 – pH 1.1 pH dans le sol est de 18\$/éch Laval

MA. 100 – Gran. 2.0. (une fois à l'établissement du site)

Donc $(36,50 * 3 + 22,5 + 35.5) * 1.13 = \$$ par site.

Il manque quelques prix.

Expertise : Faible au terrain. En laboratoire, l'expertise requise est élevée. Cependant, ces analyses peuvent être faites au gouvernement par le Centre d'expertise en analyse environnementale ou par des sous-traitants.

Contact : Christian Deblois (MDDEFP, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec : christian.deblois@mddefp.gouv.qc.ca).

F13. Indicateur: Composition arborescente.

Méthode : Pour la première année, dans un rayon de 11.3 m, identifier à l'espèce, mesurer le DHP (diamètre à hauteur de poitrine; 1.3m) et numéroter (à l'aide de plaquette de métal ou de peinture) tous les individus d'espèces ayant le potentiel de dépasser 4 m de haut. Noter tous les individus faisant plus d'un centimètre de DHP. Pour les années subséquentes, il suffit de mesurer le DHP des individus à nouveau et identifier les individus morts et les recrues. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : 1 fois au 3 à 5 ans.

Temps : Une demi-journée à 2 personnes.

Coût : Faible.

Expertise : Faible.

F14. Indicateur: Composition de la végétation de sous-bois.

Méthode : Sur 4 ou 8 sous-parcelles de 1 m² (0.56 m de rayon; nombre de sous-parcelles sujet à changement), dénombrer les semis par espèces pour les espèces au potentiel de plus de 4 m pour 2 classes de tailles, 1. moins de 30 cm, 2. plus de 30 cm, mais moins de 1cm de DHP. Sur les mêmes sous-parcelles, déterminer la composition de la végétation de sous-bois (herbacées, arbustes, lichens et mousses) en classe de recouvrements. Si d'autres espèces sont aperçues sur le site à l'extérieure des sous-parcelles, leur présence devrait être notée. En milieu forestier, la majorité des herbacées et arbustes sont faciles à identifier à l'espèce hormis celles de quelques groupes taxonomiques (p.ex., carex, graminées). Pour ces derniers groupes, identifier au genre ou à la famille pourrait être suffisant. Le centre des sous-parcelles devrait être marqué d'une tige de métal afin de remesurer les mêmes endroits d'une fois à l'autre. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : 1 fois au 3 à 5 ans.

Temps : 1 heure à 2 personnes.

Coût : Nul.

Expertise : Faible pour la majorité des herbacées et arbustes.

F90. Indicateur : Quantité de lumière en sous-bois.

Méthode : Au dessus de la tige de métal identifiant le centre de chaque sous-parcelle, mesurer la lumière à différents niveaux (1 m, 2 m). La photo hémisphérique est plus rapide sur le terrain, ne nécessite qu'une seule personne et l'appareille n'est pas très dispendieux (environ 400\$). Cependant, le traitement en laboratoire des photos peut être long, de 2 à 20 minutes par photo dépendant de l'exposition, et demande une certaine expérience. Ces données n'ont pas être analysée en tant que telle, elles serviront de variables prédictives pour comprendre la dynamique végétale de sous-bois.

Fréquence : 1 fois au 3 à 5 ans.

Temps : 1 heure pour une ou 2 personnes sur le terrain. 2 à 20 min par photo en laboratoire.

Coût : Équipement, appareil photo (environ 400\$).

Expertise : Faible sur le terrain et moyen en laboratoire.

F15. Indicateur: Vitesse de décomposition de la matière organique.

Méthode : Des sacs de litières peuvent être utilisés. Le choix des espèces à mettre dans les sacs influence le temps. Cependant, le tout ne peut pas être fait sur le terrain. Il est nécessaire de ramener du matériel à décomposer (feuilles, racines, ou autres) au laboratoire où il sera séché, pesé, mis dans des sacs, traité, séché et pesé à nouveau, étiquette pour finalement être installé sur le terrain. Après un certain temps, il faut les retrouver, les laver, les sécher et peser. Cela nécessite au moins deux visites au terrain la première année, une pour aller chercher le matériel et une autre pour l'installer. Une période de deux semaines peut être calculée pour permettre la préparation des échantillons. Pour le nombre de réplicats, il faut un minimum de 5 sacs par emplacement, mais 10 sacs sont optimaux (il y a souvent des perturbations comme des animaux trop curieux, des sacs disparus ou jamais retrouvés). Mettre 2 sacs près de chaque sous-parcelle serait un bon compromis (8 au total). La maille du choix des sacs peut influencer la vitesse de décomposition. Les sacs doivent ensuite être lavés, séchés et pesés de nouveau en laboratoire

Fréquence : 3 à 5 ans.

Temps : Environ 2 heures sur le terrain par site, mais un long travail en laboratoire est requis.

Coût : Le coût des sacs est d'environ 1\$, mais ça exclut le tissu choisi (peu dispendieux).

Expertise : Faible.

Question: Quels sont les effets des CC sur les communautés fauniques des écosystèmes forestiers et leurs interactions avec les autres composantes de l'écosystème

F16. Indicateur: Insectes des sols carabes.

Méthode : Installer des pièges fosses dans des parcelles. Il faudrait mettre 4 pièges par site (près des sous-parcelles) et les récolter chaque mois, car il existe une grande variété de composition au cours de l'été. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : 2 échantillons par année grâce à 3 visites terrain. Les pièges sont installés à la fin mai et récoltés à la fin juin et à la fin juillet.

Temps : Une heure sur le terrain et 20 minutes par échantillon en laboratoire

Coût : Faible ("prestone" et plat en plastique).

Expertise : Expertise élevée pour l'identification.

F92 : Indicateur : Abondance des mites oribatides adultes.

Méthode : 4 échantillons doivent être pris par sites, près des sous-parcelles de suivi de la végétation de sous-bois. Chaque échantillon est fait de la façon suivante. À l'aide d'une carotteuse, prélever la litière organique et les 5 premiers centimètres de sol minéral (séparé manuellement si plus de sol minéral est ramassé). Prendre au moins 4 carottes. Mélanger le contenu des carottes et sélectionner aléatoirement 500 ml de sol à garder pour la taxonomie. Remettre le sol non utilisé sur le site. L'échantillon est placé dans un sac de plastique dans une glacière avec de la glace. Il faut s'assurer de laisser une ouverture dans le sac de plastique pour permettre la circulation d'oxygène. Le sac doit être séparé de la glace par un carton. L'extraction des mites doit être fait à l'intérieur de 6 jours (voir ABMI 2010a pour un protocole détaillé). Une description des organismes et des sites est également disponible sur le site : http://royalalbertamuseum.ca/include/document/research/lifeSciences/invertebrateZoology/00_PartI_Almanac_AB_Oribatida_V23_13_Jan_2013.pdf.

Fréquence : 3 à 5 ans.

Temps : Environ 30 minutes sur le terrain par site. L'identification des organismes des 4 échantillons d'un site prend environ 4 hres pour un technicien expérimenté. Le technicien les identifie du mieux qu'il peut. Dans l'AMBI, les échantillons sont ensuite contre-vérifiés par un expert taxonomiste qui pousse l'identification plus loin si possible.

Coût : Le coût sur le terrain est d'environ 5\$.

Expertise : Faible au terrain, élevé en laboratoire.

Contact : Chris Buddle (McGill), Lisa Lumley (ABMI).

F91: Indicateur : Insectes volants, papillons.

Méthode : À chaque visite terrain où des pièges fosses sont installés ou récoltés, les papillons peuvent être échantillonnés visuellement. Il suffit de marcher 200 m et de noter toutes les espèces qui sont vues à 3 m de chaque côté du tracé. Il est à noter que le vol des papillons dépend de la température (supérieure à 12 C), des vents (inférieurs à 15 km/hre) et que la journée soit ensoleillée ce qui apporter des problèmes logistiques. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : 3 visites par année (fin mai, fin juin et fin juillet ou les débuts des mois subséquents). Échantillonnage au 3 à 5 ans?

Temps : 30 minutes pour 1 personne

Coût : Nul.

Expertise : Élevée. Développer la capacité de repérer les papillons et de les identifier et long.

F17. Indicateur: Inventaires acoustiques des oiseaux et des chauves-souris.

Méthode : Des microphones Wildlife acoustic (1000\$ pièces) peuvent être installés dans les sites lors des visites en juin et les données récupérées en juillet et août afin de déterminer la présence de diverses espèces d'oiseau et de chauve-souris. Quelques anoues pourraient également être détectés si les sites sont situés près d'étangs permanents (grenouille verte, la grenouille léopard et le ouaouaron). Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : 2 échantillons par année grâce à 3 visites terrain. Les pièges sont installés à la fin mai et récoltés à la fin juin et à la fin juillet. Échantillonnage au 3 à 5 ans?

Temps : 1 heure pour une personne.

Coût : 1000\$ par site, peut être également utilisé dans les milieux humides. Si les sites sont visités au 3 ans avec une rotation entre les sites, il faudrait donc 1 appareil par 3 sites.

Expertise : L'analyse demande un niveau d'expertise élevé. Cependant, la technologie à cet effet est en plein développement et devrait être de plus en plus aisée à utiliser. De plus, les données peuvent facilement être conservées et les données analysées de façon ponctuelle par des experts.

F18. Indicateur: Abondance ou reproduction des salamandres.

Méthode : Les salamandres peuvent être identifiées à partir des pièges fosses. La meilleure façon est cependant de placer des planchettes de façon permanente sur les sites d'échantillonnage. Les salamandres vont alors se cacher sous les planchettes et celles-ci n'ont qu'à être soulevées à chaque visite afin de déterminer la présence de ces organismes. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : 1 fois au 3 à 5 ans.

Temps : 1 heure pour 1 personne.

Coût : Faible.

Expertise : Moyenne.

F19. Indicateur: Présence des petits mammifères

Méthode : Identifier les petits mammifères captés par les pièges fosses.

Fréquence : 2 échantillons par année grâce à 3 visites terrain. Les pièges sont installés à la fin mai et récoltés à la fin juin et à la fin juillet. Échantillonnage au 3 à 5 ans?

Temps : Nul (compris dans le temps de F16).

Coût : Faible ("prestone" et plat en plastique).

Expertise : Faible.

F20. Indicateur: Présence des champignons mycorhiziens.

Méthode : En érablières, 4 ou 5 échantillons composites de sol par site (possiblement les mêmes que pour les analyses de nutriments). En laboratoire, les espèces de glomales (les principaux champignons mycorhiziens) sont identifiées par la morphologie et l'anatomie des spores avec confirmation par ADN (uniquement nécessaire le cas où de nouvelles espèces se manifesteraient au fil des ans). Les spores sont extraites du sol par tamisage, flottage sur rénographine. En forêts de conifères et forêts mixtes, les champignons mycorhiziens sont surtout des ectomycorhizes faisant des fructifications hors du sol. La technique pour les détecter est de visiter les sites et de noter la présence des fructifications, ce qui est beaucoup plus intensif comme méthodologie. Des mycologistes amateurs pourraient être mis à contribution pour cette partie. Contacter à cet effet la fédération des groupements de mycologie du Québec dirigée par Raymond McNeal. Ce regroupement contient environ 2000 mycologues amateurs dans toutes les régions du Québec. Pour l'analyse des données, la méthode développée par CC-Suivi peut être utilisée.

Fréquence : 1 fois au 3 à 5 ans?

Temps : Pas de temps supplémentaire. En laboratoire, le tri et l'identification de 5 échantillons composites par sites prennent environ 2 jours.

Coût : À déterminer.

Expertise : Élevée.

Contact : A.-Marie Fortin et Yves Piché de l'Université Laval sont intéressés à collaborer sur le projet afin de s'occuper du traitement des échantillons et de l'identification des individus si les sites sont en érablières (ils travaillent sur les endomycorhizes). Ils ont déjà un projet, avec le centre ACER et 20 sites dans des érablières intactes ou en dépérissement du sud du Québec.

Forestier: ADN environnemental

F21. Indicateur: Composition et biomasse en micro-organismes.

Si les techniques d'ADN environnementales sont disponibles, déterminer la composition en champignons et bactéries serait fortement utile afin de comprendre les changements de dynamique de décomposition et les changements en micro-organismes dus ou causant les changements de végétation.

4.10.10 Des scénarios d'échantillonnage pour les milieux forestiers

Scénario 1 : Revue de littérature et analyses des données existantes.

Les milieux forestiers devraient être les milieux affectés les moins rapidement par les CC. Au Québec, ces milieux sont également très étudiés et font déjà l'objet de nombreux suivis principalement axés sur les organismes d'intérêts commerciaux (arbres, cervidés et animaux à fourrure). De plus, plusieurs indicateurs de l'état des forêts peuvent être estimés à partir d'images satellites ou de photographies aériennes (p. ex., phénologie, productivité, composition). Conséquemment, parmi la littérature sur les effets des CC sur les différents écosystèmes québécois, celle sur les forêts est et continuera vraisemblablement d'être la plus étoffée. Ainsi, sans même faire quelques analyses que ce soit, il serait possible de dresser un portrait de la situation et de quantifier certains indicateurs en effectuant une revue de littérature à intervalle régulier. Pour les indicateurs qui ne peuvent être répondus par la revue de littérature, il serait par la suite possible, en fonction des budgets, de donner à contrat ou d'effectuer les analyses désirées qui n'ont pas été faites par d'autres groupes de recherche.

Indicateurs

F1. Indicateur: La fréquence, la superficie et le moment de l'année où surviennent les feux de forêts.

F2. Indicateur: La fréquence, la superficie, la répartition et l'intensité des attaques par la tordeuse des bourgeons d'épinette.

F3. Indicateur: Distribution des ravageurs forestiers

F4. Indicateur: Date de verdissement et de sénescence de la végétation.

F5. Indicateur: Production de sirop d'érable, date de début et de fin.

F6. Indicateur: La répartition des espèces arborescentes.

F7. Indicateur: La croissance des espèces arborescentes.

F8. Indicateur: La distribution des grands ongulés.

F9. Indicateur: Distribution des petits gibiers et des animaux à fourrure.

F10. Indicateur: La phénologie et la répartition des oiseaux.

F11. Indicateur: Les fluctuations dans l'abondance des chauves-souris

Temps analyse : 40 à 60 jours/personne pour la revue de littérature. Pour les analyses supplémentaires, cela dépendra de ce qui est trouvé dans la littérature.

Coûts : 0

Avantages

- Ce scénario est de loin le moins dispendieux.
- Il permet de profiter du travail et de l'expertise de nombreux groupes de recherche.
- Les organismes ciblés ont une grande importance commerciale, écologique et culturelle.

Inconvénients

- L'accent est mis sur des organismes déjà fortement étudiés.
- L'apport scientifique et les nouvelles connaissances sont restreints.

Scénario 2 : Intégration à l'échantillonnage du RÉSEF, ajout mineur.

Le RÉSEF est le réseau de suivi le plus petit (34 sites), mais le plus intensif : <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Perie-Catherine/Memoire149.pdf>. La localisation des sites est répartie un peu partout dans la province, mais se situe principalement dans les forêts feuillues et résineuses (une seule est un peuplement mixte). Plusieurs indicateurs d'intérêts y sont déjà mesurés, soit :

F13. Indicateur: Composition arborescente.

F12. Indicateur: Concentration en nutriments, stœchiométrie (ratio C : N) et pH des sols.

F14. Indicateur: Composition de la végétation de sous-bois (semis).

F90. Indicateur : Quantité de lumière en sous-bois. (ces données ont été prises de 1999 à 2008).

La composition de végétation de sous-bois (herbacées, arbustes, lichens et mousses) a été mesurée dans les sites seulement lors du premier échantillonnage, mais pourrait être remise à faible coût.

F14. Indicateur: Composition de la végétation de sous-bois. (arbustes et herbacées).

Trois autres indicateurs pourraient être ajoutés et n'augmenteraient que peu le travail requis sur le terrain.

F20. Indicateur: Abondance des champignons mycorhiziens (dans les érablières).

F18. Indicateur: Abondance ou reproduction des salamandres.

F92 : Indicateur : Abondance des mites oribatides.

Temps terrain : Ces 4 indicateurs ajouteraient environ 1 à 2 heures d'échantillonnage à 2 personnes. Probablement que les équipes de terrain n'auraient donc pas besoin de demeurer une journée de plus sur le terrain.

Coûts terrain : Quelques dizaines de dollars pour des planches (F18) et les sacs pour les échantillons de sols.

Expertise terrain : Les salamandres sont peu diversifiées, la formation pour leur identification peut être faite rapidement et des photos peuvent être prises pour celles dont l'identification sur le terrain est incertaine. Les herbacées sont généralement faciles à identifier en milieu forestier, une courte formation suffirait.

Temps et coûts en laboratoire : Les champignons mycorhiziens pourraient possiblement être étudiés en collaboration avec Y.Piché de l'université Laval. L'identification des champignons prend environ 2 jours-personne au laboratoire (420\$). Il pourrait y avoir des coûts ponctuels de quelques centaines de dollars au laboratoire pour l'identification par ADN de champignons inconnus. Les mites prennent 4 heures à identifier par site (120\$).

Expertise en laboratoire : élevé pour les mites et les mycorhizes.

Coûts totaux : Environ 7 sites sont échantillonnés par le RÉSEF. L'ajout de ces indicateurs de laboratoire 540\$ par site : $7 * 540 = 3780\$$ par année.

L'analyse de ces données prendrait environ 60-80 jours.

Avantages

- Ce suivi est déjà établi et se poursuit, donc les coûts de transports peuvent être partagés.
- Données historiques sur 5 à 15 ans pour les arbres.
- Grandes précisions au niveau des arbres (cartographies).
- Expertise requise sur le terrain est faible.
- Trois types d'organismes moins étudiés, mais importants pour la dynamique forestière pourraient être inclus (champignons mycorhiziens, salamandres et mites oribatides), donc intérêt scientifique élevé.

-
- Il serait possible de mettre en lien la structure des peuplements (distance, espèce et taille des arbres; végétation de sous-bois) avec la composition d'organismes dans les sols.

Désavantages

- La localisation des sites a déjà été effectuée et peu sont présent dans la zone de la forêt mixte qui risque de réagir le plus rapidement aux CC. Il y aurait peut-être moyen de contribuer à l'établissement de nouveaux sites dans cette zone. Cela pourrait augmenter les coûts considérablement. Si des sites sont ajoutés, leurs localisations devraient être choisies à l'aide des méthodes des chapitres 5 et 6.
- L'échantillonnage se fait au 5 ans une fois par année, ce qui est peut-être inférieur à ce qui est désiré pour déterminer la dynamique des champignons et des mites. Si un échantillonnage plus régulier est requis pour ces organismes, cela augmenterait considérablement le coût.

Scénario 3 : Intégration à l'échantillonnage du RÉSEF, ajout majeur.

Ajouter au scénario précédent plusieurs visites par années pour suivre des organismes dont la composition change en fonction des saisons.

F16 : Insectes des sols carabes.

F17 : Inventaires acoustiques des oiseaux et des chauves-souris.

F19 : Présence de petits mammifères.

F91 : Insectes volants, papillons.

Temps terrain : Pour couvrir la diversité de ces organismes, 3 visites seraient nécessaires. Chaque visite nécessiterait environ 1h30 d'échantillonnage à 2 personnes. Si les sites sont situés à proximité, il serait possible d'échantillonner 2 sites par jours lors des deux visites où les plantes ne sont pas mesurées.

Coûts terrain : Investissement initial d'environ 300\$ par site (assumant des visites au 5 ans; filets et appareils acoustiques). Investissement récurant d'environ 20\$ par site.

Expertise terrain : Identifier les papillons demandes une grande expertise sur le terrain. Les deux autres indicateurs en demandent peu.

Temps et coûts en laboratoire : 4 heures par sites pour les carabes (120\$). 2 jours-personne d'analyse par site pour les données acoustiques (420\$). Additionner 540\$ pour les analyses sur les mites et les champignons mycorrhiziens. Total : 1080\$.

Expertise en laboratoire : élevé pour les carabes et pour les inventaires acoustiques.

Coûts totaux : 2 jours-personne par site (2000\$). En additionnant le 1080\$ pour les analyses par site et en multipliant par 7 sites : $(2000 + 1080) * 7 = 21\ 560\$$.

L'analyse de ces données prendrait environ 60 jours.

Avantages

- Ce suivi est déjà établi et se poursuit, donc les coûts de transports peuvent être partagés.
- Données historiques sur 5 à 15 ans pour les arbres.
- Grandes précisions au niveau des arbres (cartographies).
- Trois types d'organismes moins étudiés, mais importants pour la dynamique forestière pourraient être inclus (champignons mycorhiziens, salamandres et mites oribatides), donc intérêt scientifique élevé.
- Étude d'organismes charismatiques (papillons et oiseaux)
- Il serait possible de mettre en lien la structure des peuplements (distance, espèce et taille des arbres; végétation de sous-bois) avec la composition d'organismes dans les sols.

Désavantages

- La localisation des sites a déjà été effectuée et peu sont présent dans la zone de la forêt mixte qui risque de réagir le plus rapidement aux CC. Il y aurait peut-être moyen de contribuer à l'établissement de nouveaux sites dans cette zone. Cela pourrait augmenter les coûts considérablement.
- L'échantillonnage se fait au 5 ans une fois par année, ce qui est peut-être inférieur à ce qui est désiré pour déterminer la dynamique des champignons et des mites. Si un échantillonnage plus régulé est requis pour ces organismes, cela augmenterait considérablement le coût.
- Expertise requise pour les papillons est élevée.
- L'expertise en laboratoire pour les données acoustiques est élevée.

Scénario 4 : Intégration à l'échantillonnage des placettes échantillons permanentes ou nouveau suivi, ajout mineur ou suivi de base.

Dans le cas où un partenariat ne pourrait être établi où que de nouveaux sites soient à ajouter, un nouveau suivi devrait être établi. Un minimum de 30 sites devrait être inclus dans le suivi. Leurs localisations devraient être choisies à l'aide de la méthode présentée dans les chapitres 5 et 6. Les sites pourraient être échantillonnés au 5 ans (6 sites par année).

Indicateurs :

F12. Indicateur: Concentration en nutriments, stœchiométrie (ratio C : N) et pH des sols.

F13. Composition arborescente.

F14. Composition de la végétation de sous-bois.

F18. Indicateur: Abondance ou reproduction des salamandres.

F20. Abondance des champignons mycorhiziens.

F16. Insectes des sols carabes (mites)

Temps terrain : 2 jours-personne. Possiblement 4 jours-personnes lors de l'établissement des sites, car les arbres doivent être étiquetés ou marqués à la peinture.

Coûts terrain : 60\$

Expertise terrain : Faible, hormis pour les herbacées où elle est moyenne.

Temps et coûts en laboratoire : Les champignons mycorhiziens pourraient possiblement être étudiés en collaboration avec Y.Piché de l'université Laval. L'identification des champignons prend environ 2 jours-personne au laboratoire (420\$). Il pourrait y avoir des coûts ponctuels de quelques centaines de dollars au laboratoire pour l'identification par ADN de champignons inconnus. Les mites prennent 4 heures à identifier par site (120\$).

Expertise en laboratoire : élevé pour les mites et les champignons.

Coûts totaux : 2 jours-personne par site (2000\$). En additionnant le 1080\$ pour les analyses par site et en multipliant par 6 sites : $(2000 + 540) * 6 = 15\ 240\$$.

L'analyse de ces données prendrait environ 60-80 jours.

Avantages

- Expertise requise sur le terrain est faible.
- Trois types d'organismes moins étudiés, mais importants pour la dynamique forestière pourraient être inclus (champignons mycorhiziens, salamandres et mites oribatides), donc intérêt scientifique élevé.

Désavantages

-
- L'échantillonnage se fait au 5 ans une fois par année, ce qui est peut-être inférieur à ce qui est désiré pour déterminer la dynamique des champignons et des mites. Si un échantillonnage plus régulier est requis pour ces organismes, cela augmenterait considérablement le coût.

Scénario 5 : Intégration à l'échantillonnage des placettes échantillons permanentes ou nouveau suivi, ajout majeur ou suivi avancé.

Ajouter au scénario 4 plusieurs visites par années et les quatre indicateurs suivants :

F16. Insectes des sols carabes.

F17.: Inventaires acoustiques des oiseaux et des chauves-souris.

F19 : Présence de petits mammifères.

F91: Indicateur : Insectes volants, papillons.

Temps terrain : Pour couvrir la diversité de ces organismes, 3 visites seraient nécessaires. Chaque visite nécessiterait environ 1h30 d'échantillonnage à 2 personnes. Si les sites sont situés à proximité, il serait possible d'échantillonner 2 sites par jours lors des deux visites où les plantes ne sont pas mesurées.

Coûts terrain : Investissement initial d'environ 300\$ par site (assumant des visites au 5 ans; filets et appareils acoustiques). Investissement récurant d'environ 20\$ par site.

Expertise terrain : Identifier les papillons demandes une grande expertise sur le terrain. Les autres indicateurs en demandent peu.

Temps et coûts en laboratoire : 4 heures par sites pour les carabes (120\$). 2 jours-personne d'analyse par site pour les données acoustiques (420\$). Additionner 540\$ pour les analyses sur les mites et les champignons mycorrhiziens. Total : 1080\$.

Expertise en laboratoire : élevé pour les carabes et pour les inventaires acoustiques.

Coûts totaux : 4 jours-personne par site (4000\$). En additionnant le 1080\$ pour les analyses par site et en multipliant par 6 sites : $(4000 + 1080) * 6 = 30\ 480\$$.

Avantages

- Trois types d'organismes moins étudiés, mais importants pour la dynamique forestière pourraient être inclus (champignons mycorhiziens, salamandres et mites oribatides), donc intérêt scientifique élevé.
- Échantillonnage de vertébrés et d'invertébrés charismatiques.
- Possibilités de lier la dynamique de nombreux types d'organismes.

Désavantages

- L'échantillonnage se fait au 5 ans une fois par année, ce qui est peut-être inférieur à ce qui est désiré pour déterminer la dynamique des champignons et des mites. Si un échantillonnage plus régulé est requis pour ces organismes, cela augmenterait considérablement le coût.
- Expertise requise pour les papillons est élevée.
- L'expertise en laboratoire pour les données acoustiques est élevée.

4.11 Références

- ABMI. 2010a. Terrestrial Field Data Collection Protocols. Alberta Biodiversity Monitoring Institute.
- ABMI. 2010b. Wetland Field Data Collection Protocols. Alberta Biodiversity Monitoring Institute.
- Acevedo, P., F. Ruiz-Fons, J. Vicente, A. R. Reyes-Garcia, V. Alzaga, and C. Gortazar. 2008. Estimating red deer abundance in a wide range of management situations in Mediterranean habitats *J. Zool.* **276**:37-47.
- Aerts, R., T. V. Callaghan, E. Dorrepaal, R. S. P. van Logtestijn, and J. H. C. Cornelissen. 2009. Seasonal climate manipulations result in species-specific changes in leaf nutrient levels and isotopic composition in a sub-arctic bog. *Functional Ecology* **23**:680-688.
- Aerts, R., T. V. Callaghan, E. Dorrepaal, R. S. P. Logtestijn, and J. H. C. Cornelissen. 2012. Seasonal climate manipulations have only minor effects on litter decomposition rates and N dynamics but strong effects on litter P dynamics of sub-arctic bog species. *Oecologia* **170**:809-819.
- Amano, T., T. Székely, K. Koyama, H. Amano, and W. J. Sutherland. 2010. A framework for monitoring the status of populations: An example from wader populations in the East Asian–Australasian flyway. *Biological Conservation* **143**:2238-2247.
- Andersen, R., S. J. Chapman, and R. R. E. Artz. 2013. Microbial communities in natural and disturbed peatlands: A review. *Soil Biology and Biochemistry* **57**:979-994.
- Anderson, S. E., A. S. Dave, and D. Margoliash. 1996. Template-based automatic recognition of birdsong syllables from continuous recordings. *Journal of the Acoustical Society of America* **100**:1209-1219.
- Araujo, M. B. and M. New. 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution* **22**:42-47.
- Araújo, M. B., A. Rozenfeld, C. Rahbek, and P. A. Marquet. 2011. Using species co-occurrence networks to assess the impacts of climate change. *Ecography* **34**:897-908.
- Atkinson, A. J., P. C. Trenham, R. N. Fisher, S. A. Hathaway, B. S. Johnson, S. G. Torres, and Y. C. Moore. 2004. Designing monitoring programs in an adaptive management context

-
- for regional multiple species conservation plans. U.S. Geological Survey, Sacramento, California.
- Baird, D. J. and M. Hajibabae. 2012. Biomonitoring 2.0: a new paradigm in ecosystem assessment made possible by next-generation DNA sequencing. *Molecular Ecology* **23**:2039-2044.
- Bale, J. S., G. J. Masters, I. D. Hodkinson, C. Awmack, T. M. Bezemer, V. K. Brown, J. Butterfield, A. Buse, J. C. Coulson, J. Farrar, J. E. G. Good, R. Harrington, S. Hartley, T. H. Jones, R. L. Lindroth, M. C. Press, I. Symrnioudis, A. D. Watt, and J. B. Whittaker. 2002. Herbivory in global climate change research: Direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology* **8**:1-16.
- Balmford, A., P. Crane, A. Dobson, R. E. Green, and G. M. Mace. 2005. The 2010 challenge: data availability, information needs and extraterrestrial insights. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **360**:221-228.
- Barrett, T. M. and A. N. Gray. 2011. Potential of a national monitoring program for forests to assess change in high-latitude ecosystems. *Biological Conservation* **144**:1285-1294.
- Behera, M. D. and S. P. S. Kushwaha. 2012. The charms and challenges of climate change biodiversity in a warming world. *Biodiversity and Conservation* **21**:1153-1158.
- Bell, G. and A. Gonzalez. 2009. Evolutionary rescue can prevent extinction following environmental change. *Ecology Letters* **12**:942-948.
- Bellard, C., C. Bertelsmeier, P. Leadley, W. Thuiller, and F. Courchamp. 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters* **15**(4):365-377.
- Bentz, B. J., J. Régnière, C. J. Fettig, E. M. Hansen, J. L. Hayes, J. A. Hicke, R. G. Kelsey, J. F. Negrón, and S. J. Seybold. 2010. Climate Change and Bark Beetles of the Western United States and Canada: Direct and Indirect Effects. *BioScience* **60**:602-613.
- Berteaux, D., D. Réale, A. G. McAdam, and S. Boutin. 2004. Keeping pace with fast climate change: can arctic life count on evolution? *Integrative and Comparative Biology* **44**.
- Berteaux, D., N. Casajus and S. de Blois. Sous presse. Changements climatiques et biodiversité du Québec: vers un nouveau patrimoine naturel? Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada.
- Bigelow, S. W. and C. D. Canham. 2007. Nutrient limitation of juvenile trees in a northern hardwood forest: Calcium and nitrate are preeminent. *Forest Ecology and Management* **243**:310-319.
- Blanck, A. and N. Lamouroux. 2006. Large-scale intraspecific variation in life-history traits of European freshwater fish. *Journal of Biogeography* **34**:862-875.
- Bokhorst, S. F., J. W. Bjerke, H. Tømmervik, T. V. Callaghan, and G. K. Phoenix. 2009. Winter warming events damage sub-Arctic vegetation: consistent evidence from an experimental manipulation and a natural event. *Journal of Ecology* **97**:1408-1415.
- Boonstra, R. and C. Fox. 2013. The ecology of stress: a marriage of disciplines. *Functional Ecology* **27**:7-10.
- Boulanger, Y., D. Arseneault, H. Morin, Y. Jardon, P. Bertrand, and C. Dagneau. 2012. Dendrochronological reconstruction of spruce budworm (*Choristoneura fumiferana*) outbreaks in southern Quebec for the last 400. *Canadian Journal of Forest Research* **42**:1264-1276.
- Boutin, S. 2010. Conservation planning within emerging global climate and economic realities. *Biological Conservation* **143**:1569-1570.

-
- Boutin, S., D. L. Haughland, J. Schieck, J. Herbers, and E. Bayne. 2009. A new approach to forest biodiversity monitoring in Canada. *Forest Ecology and Management* **258**:S168-S175.
- Bowen-Jones, E. and A. Entwistle. 2002. Identifying appropriate flagship species: the importance of culture and local contexts. *Oryx* **36**:189-195.
- Brooker, R. W., J. M. J. Travis, E. J. Clark and C. Dytham. 2007. Modelling species' range shifts in a changing climate: the impacts of biotic interactions, dispersal distance and the rate of climate change. *Journal of Theoretical Biology* **245**:59-65.
- Buckland, S. T., D. R. Anderson, K. P. Burnham, J. L. Laake, D. L. Borchers, and D. C. Thomas. 2001. Introduction to distance sampling. Estimating abundance of biological populations. Oxford University Press, Cornwall.
- Buckland, S. T., S. R. Baillie, J. M. Dick, D. A. Elston, A. E. Magurran, E. M. Scott, R. I. Smith, P. J. Somerfield, A. C. Studeny, and A. Watt. 2012. How should regional biodiversity be monitored? *Environmental and Ecological Statistics* **19**:601-626.
- Burkett, V. and J. Kusler. 2000. Climate change: potential impacts and interactions in wetlands of the United States. *Journal of the American Water Resources Association* **36**:313-320.
- Cardinale, B. J., J. E. Duffy, A. Gonzalez, D. U. Hooper, C. Perrings, P. Venail, A. Narwani, G. M. Mace, D. Tilman, D. A. Wardle, A. P. Kinzig, G. C. Daily, M. Loreau, J. B. Grace, A. Larigauderie, D. S. Srivastava, and S. Naeem. 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* **486**:59-67.
- Carlson, M. and F. Schmiegelow. 2002. Cost-effective sampling design applied to large-scale monitoring of Boreal birds. *Conservation Ecology* **6**:11.
- Caro, T. M. and G. O'Doherty. 1999. On the use of surrogate species in conservation biology. *Conservation Biology* **13**:805-814.
- Carroll, M. J., P. Dennis, J. W. Pearce-Higgins, and C. D. Thomas. 2011. Maintaining northern peatland ecosystems in a changing climate: effects of soil moisture, drainage and drain blocking on craneflies. *Global Change Biology* **17**:2991-3001.
- Caughlan, L. and K. L. Oakley. 2001. Cost considerations for long-term ecological monitoring. *Ecological Indicators* **1**:123-134.
- Caughley, G. 1977. Analysis of vertebrate populations. John Wiley and Sons, London.
- CBD. 2010. Global biodiversity outlook 3. Montréal, Canada.
- Chapin III, F. S., T. V. Callaghan, Y. Bergeron, M. Fukuda, J. F. Johnstone, G. Juday, and S. A. Zimov. 2004. Global change and the boreal forest: thresholds, shifting states or gradual change? *Ambio* **33**:361-365.
- Charmantier, A., R. H. McCleery, L. R. Cole, C. Perrins, L. E. B. Kruuk, and B. C. Sheldon. 2008. Adaptive Phenotypic Plasticity in Response to Climate Change in a Wild Bird Population. *Science* **320**:800-803.
- Chen, Z. and R. C. Maher. 2006. Semi-automatic classification of bird vocalizations using spectral peak tracks. *Journal of the Acoustical Society of America* **120**:2974-2984.
- Chivian, E. and A. Bernsrein. 2008. Sustaining life. How human health depends on biodiversity. Oxford University Press, USA.
- Cihlar, J. and C. Tarnocai. 2000. Wetlands of Canada and climate change: observation strategy and baseline data. Report of a Workshop, Ottawa, Ontario, January 24-25.

-
- Civantos, E., W. Thuiller, L. Maiorano, A. Guisan, and M. B. Araujo. 2012. Potential Impacts of Climate Change on Ecosystem Services in Europe: The Case of Pest Control by Vertebrates. *BioScience* **62**:658-666.
- Clobert, J. and J. D. Lebreton. 1991. Estimation of demographic parameters in bird populations. Pages 75-103 in C. M. Perrins, J. D. Lebreton, and G. J. M. Hiron, editors. *Bird population study: Relevance to conservation and management*. Oxford University Press, New-York.
- Collier, B. A. and M. P. Sissenwine. 1983. Estimating population size from relative abundance data measured with error *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **40**:1871-1879.
- Convey, P., S. Aitken, G. di Prisco, M. J. Gill, S. J. Coulson, T. Barry, I. S. Jónsdóttir, P. T. Dang, D. Hik, T. Kulkarni, and G. Lewis. 2012. The impacts of climate change on circumpolar biodiversity. *Biodiversity* **13**:134-143.
- Cook, B. I., E. M. Wolkovich, T. J. Davies, T. R. Ault, J. L. Betancourt, J. M. Allen, K. Bolmgren, E. E. Cleland, T. M. Crimmins, N. J. B. Kraft, L. T. Lancaster, S. J. Mazer, G. J. McCabe, B. J. McGill, C. Parmesan, S. Pau, J. Regetz, N. Salamin, M. D. Schwartz, and S. E. Travers. 2012. Sensitivity of Spring Phenology to Warming Across Temporal and Spatial Climate Gradients in Two Independent Databases. *Ecosystems* **15**:1283-1294.
- Cornelissen, J. H. C., P. M. van Bodegom, R. Aerts, T. V. Callaghan, R. S. P. van Logtestijn, J. Alatalo, F. Stuart Chapin, R. Gerdol, J. Gudmundsson, D. Gwynn-Jones, A. E. Hartley, D. S. Hik, A. Hofgaard, I. S. Jónsdóttir, S. Karlsson, J. A. Klein, J. Laundre, B. Magnusson, A. Michelsen, U. Molau, V. G. Onipchenko, H. M. Quested, S. M. Sandvik, I. K. Schmidt, G. R. Shaver, B. Solheim, N. A. Soudzilovskaia, A. Stenström, A. Tolvanen, Ø. Totland, N. Wada, J. M. Welker, and X. Zhao. 2007. Global negative vegetation feedback to climate warming responses of leaf litter decomposition rates in cold biomes. *Ecology Letters* **10**:619-627.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, and M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* **387**:253-260.
- Courchesne, G. 2012. Déterminants de la végétation des milieux humides aménagés pour la sauvagine dans le Québec méridional. Université Laval, Québec.
- Crespi, E. J., T. D. Williams, T. S. Jessop, B. Delehanty, and R. Boonstra. 2013. Life history and the ecology of stress: how do glucocorticoid hormones influence life-history variation in animals? *Functional Ecology* **27**:93-106.
- Crozier, L. G. and R. W. Zabel. 2006. Climate impacts at multiple scales: evidence for differential population responses in juvenile Chinook salmon. *Journal of Animal Ecology* **75**:1100-1109.
- Culp, J. M., W. Goedkoop, L. Lento, K. S. Christoffersen, S. Frenzel, G. Guðbergsson, P. Liljaniemi, S. Sandøy, M. Svoboda, J. Brittain, J. Hammar, D. Jacobsen, B. Jones, C. Juillet, M. Kahlert, K. Kidd, E. Luiker, J. Olafsson, M. Power, M. Rautio, A. Ritcey, R. Striegl, M. Svenning, J. Sweetman, and M. Whitman. 2012a. The Arctic Freshwater Biodiversity Monitoring Plan. Akureyri, Iceland.
- Culp, J. M., J. Lento, W. Goedkoop, M. Power, M. Rautio, K. S. Christoffersen, G. Guðbergsson, D. Lau, P. Liljaniemi, S. Sandøy, and M. Svoboda. 2012b. Developing a circumpolar monitoring framework for Arctic freshwater biodiversity. *Biodiversity* **13**:215-227.

-
- Dang, C. K., M. Schindler, E. Chauvet, and M. O. Gessner. 2009. Temperature oscillation coupled with fungal community shifts can modulate warming effects on litter decomposition. *Ecology* **90**:122-131.
- Davis, C. C., C. G. Willis, R. B. Primack, and A. J. Miller-Rushing. 2010. The importance of phylogeny to the study of phenological response to global climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **365**:3201-3213.
- Dawson, T. P., S. T. Jackson, J. I. House, I. C. Prentice, and G. M. Mace. 2011. Beyond Predictions: Biodiversity Conservation in a Changing Climate. *Science* **332**:53-58.
- Dejean, T., A. Valentini, A. Duparc, S. Pellier-Cuit, F. Pompanon, P. Taberlet, and C. Miaud. 2011. Persistence of Environmental DNA in Freshwater Ecosystems. *PLoS one* **6**:e23398.
- Derocher, A. E., J. Aars, S. C. Amstrup, A. Cutting, N. J. Lunn, P. K. Molnár, M. E. Obbard, I. Stirling, G. W. Thiemann, D. Vongraven, Ø. Wiig, and G. York. 2013. Rapid ecosystem change and polar bear conservation. *Conservation Letters*:*in press*.
- Deutsch, C. A., J. J. Tewksbury, R. B. Huey, K. S. Sheldon, C. K. Ghalambor, D. C. Haak, and P. R. Martin. 2008. From the Cover: Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**:6668-6672.
- di Castri, F., J. R. Vernhes, and T. Younès. 1992. Inventorying and monitoring biodiversity: a proposal for an international network. UNESCO. Paris, France.
- di Prisco, G., P. Convey, J. Gutt, D. Cowan, K. Conlan, and C. Verde. 2012. Understanding and protecting the world's biodiversity: The role and legacy of the SCAR programme "Evolution and Biodiversity in the Antarctic". *Marine Genomics* **8**:3-8.
- Diamond, S. E., A. M. Frame, R. A. Martin, and L. B. Buckley. 2011. Species' traits predict phenological responses to climate change in butterflies. *Ecology* **92**:1005-1012.
- Diaz, S., S. Lavorel, S. McIntyre, V. Falczuk, F. Casanoves, D. G. Milchunas, C. Skarpe, R. G., M. Sternberg, I. Noy-Meir, J. Landsberg, W. Zhang, H. Clark, and B. D. Campbell. 2007. Plant trait responses to grazing - a global synthesis. *Global Change & Biology* **13**:313-341.
- Dixon, P. M. and J. H. K. Pechmann. 2005. A statistical test to show negligible trend. *Ecology* **86**:1751-1756.
- Doak, D. F. and W. F. Morris. 2010. Demographic compensation and tipping points in climate-induced range shifts. *Nature* **467**: 959-962.
- Dobson, A. 2005. Monitoring global rates of biodiversity change: challenges that arise in meeting the Convention on Biological Diversity (CBD) 2010 goals. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **360**:229-241.
- Drobyshev, I., S. Gewehr, F. Berninger, and Y. Bergeron. 2012. Species specific growth responses of black spruce and trembling aspen may enhance resilience of boreal forest to climate change. *Journal of Ecology* **101**:231-242.
- Duchesne, L., D. Houle, M.-A. Côté, and T. Logan. 2009. Modelling the effect of climate on maple syrup production in Québec, Canada. *Forest Ecology and Management* **258**:2683-2689.
- Dukes, J. S. and H. A. Mooney. 1999. Modelling the effect of climate on maple syrup production in Québec, Canada. *Forest Ecology and Management* **258**:2683-2689.

-
- Duro, D. C., N. C. Coops, M. A. Wulder, and T. Han. 2007. Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing. *Progress in Physical Geography* **31**:235-260.
- Eberhardt, L. L. 2002. A paradigm for population analysis of long-lived vertebrates. *Ecology* **83**:2841-2854.
- Elith, J., C. H. Graham, R. P. Anderson, M. Dudik, S. Ferrier, A. Guisan, R. J. Hijmans, F. Huettmann, J. R. Leathwick, A. Lehmann, J. Li, L. G. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. McC. Overton, A. T. Peterson, S. J. Phillips, K. Richardson, R. Scachetti-Pereira, R. E. Schapire, J. Soberon, S. Williams, M. S. Wisz, and N. E. Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* **29**: 129-151.
- Emmett, B. A., C. Beier, M. Estiarte, A. Tietema, H. L. Kristensen, D. Williams, J. Pen?uelas, I. Schmidt, and A. Sowerby. 2004. The response of soil processes to climate change: Results from manipulation studies of shrublands across an environmental gradient. *Ecosystems* **7**:625-637.
- Environment Canada. 2004. Threats to Water Availability in Canada. National Water Research Institute, Burlington, Ontario.
- Erwin, K. L. 2009. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and Management* **17**:71-84.
- Feddema, J. J., K. W. Oleson, G. B. Bonan, L. O. Mearns, L. E. Buja, G. A. Meehl, and W. M. Washington. 2005. The importance of land-cover change in simulating future climates. *Science* **310**:1674-1678.
- Federal, Provincial and Territorial Governments of Canada. 2010. Canadian biodiversity: ecosystem status and trends 2010. Canadian Councils of Ressource Ministers. Ottawa, Canada.
- Feuchtmayr, H., R. Moran, K. Hatton, L. Connor, T. Heyes, B. Moss, I. Harvey, and D. Atkinson. 2009. Global warming and eutrophication: effects on water chemistry and autotrophic communities in experimental hypertrophic shallow lake mesocosms. *Journal of Applied Ecology* **46**:713-723.
- Field, S. A., A. J. Tyre, N. Jonzen, J. R. Rhodes, and H. P. Possingham. 2004. Minimizing the cost of environmental management decisions by optimizing statistical thresholds. *Ecology Letters* **7**:669-675.
- Field, S. A., A. J. Tyre, and H. Possingham. 2005. Optimizing allocation of monitoring effort under economic and observational constraints. *Journal of Wildlife management* **69**:473-482.
- Forget, E., R. Drever, and F. Lorenzetti. 2003. Changements climatiques : impacts sur les forêts québécoises. IQAFF.
- Franzén, M. and E. Öckinger. 2011. Climate-driven changes in pollinator assemblages during the last 60 years in an Arctic mountain region in Northern Scandinavia. *Journal of Insect Conservation* **16**:227-238.
- Frechette, E., I. Ensminger, Y. Bergeron, A. Gessler, and F. Berninger. 2011. Will changes in root-zone temperature in boreal spring affect recovery of photosynthesis in *Picea mariana* and *Populus tremuloides* in a future climate? *Tree physiology* **31**:1204-1216.
- Freckleton, R. P., A. R. Watkinson, R. E. Green, and W. J. Sutherland. 2006. Census error and the detection of density dependence. *J. An. Ecol.* **75**:837-851.

-
- Gaillard, J.-M. and N. G. Yoccoz. 2003. Temporal variation in survival of mammals: a case of environmental canalization? *Ecology* **84**:3294-3306.
- Gaillard, J. M., M. Festa-Bianchet, and N. G. Yoccoz. 1998. Population dynamics of large herbivores: variable recruitment with constant adult survival. *Trends Ecol. Evol.* **13**:58-62.
- Gallardo, B., S. Gascón, X. Quintana, and F. A. Comín. 2011. How to choose a biodiversity indicator – Redundancy and complementarity of biodiversity metrics in a freshwater ecosystem. *Ecological Indicators* **11**:1177-1184.
- Geupel, G. R., D. Humple, and L. J. Roberts. 2011. Monitoring decisions: not as simple as they seem? *Trends in Ecology & Evolution* **26**:107.
- Girardin, M. P., A. A. Ali, C. Carcaillet, S. Gauthier, C. Hély, H. Le Goff, A. Terrier, and Y. Bergeron. 2013. Fire in managed forests of eastern Canada: Risks and options. *Forest Ecology and Management* **294**:238-249.
- Gonzalez, A., O. Ronce, R. Ferriere, and M. E. Hochberg. 2013. Evolutionary rescue: an emerging focus at the intersection between ecology and evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*:*in press*.
- Green, R. E., A. Balmford, P. R. Crane, G. M. Mace, J. D. Reynolds, and R. K. Turner. 2005. A framework for improved monitoring of biodiversity: responses to the world summit on sustainable development. *Conservation Biology* **19**:56-65.
- Greenwood, J. 2007. International Ornithological Committee Proceedings. *Journal of Ornithology* **1(suppl.)**:148.
- Grosbois, V., O. Gimenez, J. M. Gaillard, R. Pradel, C. Barbraud, J. Clobert, A. P. Møller, and H. Weimerskirch. 2008. Assessing the impact of climate variation on survival in vertebrate populations. *Biological Reviews* **83**:357-399.
- Hagan, J. M. and A. A. Whitman. 2006. Biodiversity indicators for sustainable forestry: simplifying complexity. *Forest Ecology* **104**:203-210.
- Hájková, P., M. Hájek, K. Rybníček, M. Joroušek, L. Tichý, Š. Králová, and E. Mikulášová. 2011. Long-term vegetation changes in bogs exposed to high atmospheric deposition, aerial liming and climate fluctuation. *Journal of Vegetation Science* **22**:891-904.
- Halme, P., J. Heilmann-Clausen, T. Rämä, T. Kosonen, and P. Kunttu. 2012. Monitoring fungal biodiversity – towards an integrated approach. *Fungal Ecology* **5**:750-758.
- Hamilton, A. T., J. D. Stamp, and B. G. Bierwagen. 2010. Vulnerability of biological metrics and multimetric indices to effects of climate change. *Journal of the North American Benthological Society* **29**:1379-1396.
- Haughland, D. L., J.-M. Hero, J. Schieck, J. G. Castley, S. Boutin, P. Sólymos, B. E. Lawson, G. Holloway, and W. E. Magnusson. 2010. Planning forwards: biodiversity research and monitoring systems for better management. *Trends in Ecology & Evolution* **25**:199-200.
- Hebert, P. D. N., A. Cywinska, S. L. Ball, and J. R. deWaard. 2003. Biological identifications through DNA barcodes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **270**:313-321.
- Hegland, S. J., A. Nielsen, A. Lazaro, A.L. Bjerknes and O. Totland. 2009. How does climate warming affect plant-pollinator interactions? *Ecologie Letter* **12**:184-195.
- Heino, J., R. Virkkala, and H. Toivonen. 2009. Climate change and freshwater biodiversity: detected patterns, future trends and adaptations in northern regions. *Biological Reviews* **84**:39-54.

-
- Heller, N. and E. Zavaleta. 2009. Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation* **142**:14-32.
- Henry, P.-Y., S. Lengyel, P. Nowicki, R. Julliard, J. Clobert, T. Čelik, B. Gruber, D. S. Schmeller, V. Babij, and K. Henle. 2008. Integrating ongoing biodiversity monitoring: potential benefits and methods. *Biodiversity and Conservation* **17**:3357-3382.
- Hering, D., A. Schmidt-Kloiber, J. Murphy, S. Lücke, C. Zamora-Muñoz, M. J. López-Rodríguez, T. Huber, and W. Graf. 2009. Potential impact of climate change on aquatic insects: A sensitivity analysis for European caddisflies (Trichoptera) based on distribution patterns and ecological preferences. *Aquatic Sciences* **71**:3-14.
- Hobbs, R. J., E. Higgs, and J. A. Harris. 2009. Novel ecosystems: implications for conservation and restoration. *Trends in Ecology & Evolution* **24**:599-605.
- Hone, J. 2008. On bias, precision and accuracy in wildlife aerial surveys. *Wild. resear.* **35**:253-257.
- Hooper, D. U., D. E. Bignell, V. K. Brown, L. Brussard, J. M. Dangerfield, D. H. Wall, D. A. Wardle, D. C. Coleman, K. E. Giller, P. Lavelle, W. H. V. D. Putten, P. C. D. Ruiter, J. R. Whendee, L. Silver, J. M. Tiedje, and V. Wolters. 2013. Interactions between Aboveground and Belowground Biodiversity in Terrestrial Ecosystems: Patterns, Mechanisms, and Feedbacks. *BioScience* **50**:1049-1061.
- Inouye, D. W. 2008. Effects of climate change on phenology, frost damage, and floral abundance of montane wildflowers. *Ecology* **89**:353-362.
- Initiative de conservation des oiseaux de l'Amérique du Nord. 2012. État des populations d'oiseaux du Canada. Ottawa, Canada.
- IPCC. 2007a. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2007b. Climate change 2007: Synthesis Report. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ives, A. R. and B. J. Cardinale. 2004. Food-web interactions govern the resistance of communities after non-random extinctions. *Nature* **429**:174-177.
- Jackson, L. J., T. L. Lauridsen, M. SØndergaard, and E. Jeppesen. 2007. A comparison of shallow Danish and Canadian lakes and implications of climate change. *Freshwater Biology* **52**:1782-1792.
- Jakob, E. M., S. D. Marshal, and G. W. Uetz. 1996. Estimating Fitness: A Comparison of Body Condition Indices. *Oiko* **77**:61-67.
- Jassey, V. E. J., D. Gilbert, P. Binet, M.-L. Toussaint, and G. Chiapusio. 2011. Effect of a temperature gradient on *Sphagnum fallax* and its associated living microbial communities: a study under controlled conditions. *Canadian Journal of Microbiology* **57**:226-235.
- Jeppesen, E., M. Meerhoff, K. Holmgren, I. González-Bergonzoni, F. Teixeira-de Mello, S. A. J. Declerck, L. Meester, M. SØndergaard, T. L. Lauridsen, R. Bjerring, J. M. Conde-Porcuna, N. Mazzeo, C. Iglesias, M. Reizenstein, H. J. Malmquist, Z. Liu, D. Balayla, and X. Lazzaro. 2010. Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function. *Hydrobiologia* **646**:73-90.
- Jerde, C. L., A. R. Mahon, W. L. Chadderton, and D. M. Lodge. 2011. "Sight-unseen" detection of rare aquatic species using environmental DNA. *Conservation Letters* **4**:150-157.

-
- Jiguet, F., A.-S. Gadot, R. Julliard, S. E. Newson, and D. Couvet. 2007. Climate envelope, life history traits and the resilience of birds facing global change. *Global Change Biology* **13**:1672-1684.
- Johnson, M. P. and P. L. Tyack. 2003. A digital acoustic recording tag for measuring the response of wild marine mammals to sound. *Ieee Journal of Oceanic Engineering* **28**:3-12.
- Johnson, N. C., J. Wolf, M. A. Reyes, A. Panter, G. W. Koch, and A. Redman. 2005. Species of plants and associated arbuscular mycorrhizal fungi mediate mycorrhizal responses to CO₂ enrichment. *Global Change Biology* **11**:1156-1166.
- Jones, J. I. and C. D. Sayer. 2003. Does the fish-invertebrate-periphyton cascade precipitate plant loss in shallow lakes? *Ecology* **84**:2155-2167.
- Jonsson, M. and B. Malmqvist. 2003. Importance of species identity and number for process rates within different stream invertebrate functional feeding groups. *Journal of Animal Ecology* **72**:453-459.
- Joo, S. and S. Park. 2012. Identification of bird species and their prey using DNA barcode on feces from Korean traditional village groves and forests (maeulsoop). *Animal Cells and Systems* **16**:488-497.
- Junk, W. J., S. An, C. M. Finlayson, B. Gopal, J. Květ, S. A. Mitchell, W. J. Mitsch, and R. D. Roberts. 2013. Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic Sciences* **75**:151-167.
- Kallarackal, J. and T. J. Roby. 2012. Responses of trees to elevated carbon dioxide and climate change. *Biodiversity and Conservation* **21**:1327-1342.
- Kallimanis, A. S., A. D. Mazaris, D. Tsakanikas, P. Dimopoulos, J. D. Pantis, and S. P. Sgardelis. 2012. Efficient biodiversity monitoring: Which taxonomic level to study? *Ecological Indicators* **15**:100-104.
- Kasumovic, M. M., R. C. Brooks, and C. B. Andrade. 2009. Body condition but not dietary restriction prolongs lifespan in a semelparous capital breeder. *Biology Letters* **23**:636-638.
- Keuper, F., E. Dorrepaal, P. M. Van Bodegom, R. Aerts, R. S. P. Van Logtestijn, T. V. Callaghan, and J. H. C. Cornelissen. 2011. A Race for Space? How *Sphagnum fuscum* stabilizes vegetation composition during long-term climate manipulations. *Global Change Biology* **17**:2162-2171.
- Koh, L. P., R. R. Dunn, N. S. Sodhi, R. K. Colwell, H. C. Proctor and V. S. Smith. 2004. Species Coextinctions and the Biodiversity Crisis. *Science* **305**:1632-1634.
- Kozłowski, T. T. 2002. Physiological ecology of natural regeneration of harvested and disturbed forest stands: implications for forest management. *Forest Ecology and Management* **158**:195-221.
- Krebs, C. J. 1991. The experimental paradigm and long term population studies. *IBIS* **133 suppl.** **1**:3-8.
- Kumpula, J. and M. Nieminen. 1991. Pastures, calf production and carcass weights of reindeer calves in the Oraniemi co-operative, Finnish Lapland. *Rangifer* **12**:93-103.
- Laidler, G. J., P. M. Treitz, and D. M. Atkinson. 2008. Remote sensing of arctic vegetation: relations between the NDVI, spatial resolution and vegetation cover on Boothia Peninsula, Nunavut. *Arctic* **61**:1-13.
- Lang, S. I., J. H. C. Cornelissen, T. Klahn, R. S. P. van Logtestijn, R. Broekman, W. Schweikert, and R. Aerts. 2009. An experimental comparison of chemical traits and litter

-
- decomposition rates in a diverse range of subarctic bryophyte, lichen and vascular plant species. *Journal of Ecology* **97**:886-900.
- Lang, S. I., J. H. C. Cornelissen, G. R. Shaver, M. Ahrens, T. V. Callaghan, U. Molau, C. J. F. Ter Braak, A. Hölzer, and R. Aerts. 2012. Arctic warming on two continents has consistent negative effects on lichen diversity and mixed effects on bryophyte diversity. *Global Change Biology* **18**:1096-1107.
- Lappalainen, J. and H. Lehtonen. 1997. Temperature habitats for freshwater fishes in a warming climate. *Boreal Environment Research* **2**:69-84.
- Lavergne, S., N. Mouquet, W. Thuiller and O. Ronce. 2010. Biodiversity and Climate Change: Integrating Evolutionary and Ecological Responses of Species and Communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **41**:321-350.
- Lawrence, J. E., K. B. Lunde, R. D. Mazor, L. A. Bêche, E. P. McElravy, and V. H. Resh. 2010. Long-term macroinvertebrate responses to climate change: implications for biological assessment in mediterranean-climate streams. *Journal of the North American Benthological Society* **29**:1424-1440.
- Legg, C. J. and L. Nagy. 2006. Why most conservation monitoring is, but need not be, a waste of time. *Journal of Environmental Management* **78**:194-199.
- Lepage, M. 2012. Principaux programmes de surveillance écologique d'intérêt pour les réserves nationales de faune. Environnement Canada - Région du Québec.
- Lindenmayer, D. B. and G. E. Likens. 2010. The science and application of ecological monitoring. *Biological Conservation* **143**:1317-1328.
- Lindenmayer, D. B., G. E. Likens, A. Andersen, D. Bowman, C. M. Bull, E. Burns, C. R. Dickman, A. A. Hoffmann, D. A. Keith, M. J. Liddell, A. J. Lowe, D. J. Metcalfe, S. R. Phinn, J. Russell-Smith, N. Thurgate, and G. M. Wardle. 2012. Value of long-term ecological studies. *Austral Ecology* **97**:745-757.
- Long, S. P., E. A. Ainsworth, A. Rogers, and D. R. Ort. 2004. Rising Atmospheric Carbon Dioxide: Plants FACE the future. *Annual Review of Plant Biology* **55**:591-628.
- Lopatin, E. 2007. Long-term trends in height growth of *Picea obovata* and *Pinus sylvestris* during the past 100 years in Komi Republic (north-western Russia). *Scandinavian Journal of Forest Research* **22**:310-323.
- Loreau, M., C. de Mazancourt, and E. Duffy. 2013. Biodiversity and ecosystem stability: a synthesis of underlying mechanisms. *Ecology Letters*:*in press*.
- Lovett, G. M., D. A. Burns, C. T. Driscoll, J. C. Jenkins, M. J. Mitchell, L. Rustad, J. B. Shanley, G. E. Likens, and R. Haeuber. 2007. Who needs environmental monitoring? *Frontiers in Ecology and the Environment* **5**:253-260.
- Lukac, M., C. Calfapietra, and D. L. Godbold. 2003. Production, turnover and mycorrhizal colonization of root systems of three *Populus* species grown under elevated CO₂ (POPFACE). *Global Change Biology* **9**:838-848.
- Lürling, M. and L. N. De Senerpont Domis. 2013. Predictability of plankton communities in an unpredictable world. *Freshwater Biology* **58**:455-462.
- Mace, G. M. and J. E. M. Baillie. 2007. The 2010 Biodiversity Indicators: Challenges for Science and Policy. *Conservation Biology* **21**:1406-1413.
- Mackenzie, D. I. and J. A. Royle. 2005. Designing occupancy studies: general advice and allocating survey effort. *Journal of Applied Ecology* **42**:1105-1114.

-
- Maclver, D. C., M. Karsh, N. Comer, J. Klaassen, H. Auld, and A. Fenech. 2006. Influences atmosphériques sur l'industrie acéricole en Amérique du Nord. Environnement Canada - Division de la recherche sur l'adaptation et les répercussions.
- Maes, D. and H. V. Dyck. 2005. Habitat quality and biodiversity indicator performances of a threatened butterfly versus a multispecies group for wet heathlands in Belgium. *Biological Conservation* **123**:177-187.
- Makkonen, M., M. P. Berg, J. R. van Hal, T. V. Callaghan, M. C. Press, and R. Aerts. 2011. Traits explain the responses of a sub-arctic Collembola community to climate manipulation. *Soil Biology and Biochemistry* **43**:377-384.
- Marcoux, M., M. Auger-Methe, E. G. Chmelnitsky, S. H. Ferguson, and M. M. Humphries. 2011. Local Passive Acoustic Monitoring of Narwhal Presence in the Canadian Arctic: A Pilot Project. *Arctic* **64**:307-316.
- McDonald-Madden, E., P. W. J. Baxter, R. A. Fuller, T. G. Martin, E. T. Game, J. Montambault, and H. P. Possingham. 2010. Monitoring does not always count. *Trends in Ecology & Evolution* **25**:547-550.
- McKown, M. W., M. Lukac, A. Borker, B. Tershy, and D. Croll. 2012. A wireless acoustic sensor network for monitoring wildlife in remote locations. *The Journal of the Acoustical Society of America* **132**:2036-2036.
- McLennan, D. S., T. Bell, D. Berteaux, W. Chen, L. Copland, R. Fraser, D. Gallant, G. Gauthier, D. Hik, C. J. Krebs, I. H. Myers-Smith, I. Olthof, D. Reid, W. Sladen, C. Tarnocai, W. F. Vincent, and Y. Zhang. 2012. Recent climate-related terrestrial biodiversity research in Canada's Arctic national parks: review, summary, and management implications. *Biodiversity* **13**:157-173.
- McMahon, S. M., S. P. Harrison, W. S. Armbruster, P. J. Bartlein, C. M. Beale, M. E. Edwards, J. Kattge, G. Midgley, X. Morin, and I. C. Prentice. 2011. Improving assessment and modelling of climate change impacts on global terrestrial biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution* **26**:249-259.
- McRae, L., M. Böhm, S. Deinet, M. Gill, and B. Collen. 2012. The Arctic Species Trend Index: using vertebrate population trends to monitor the health of a rapidly changing ecosystem. *Biodiversity* **13**:144-156.
- Menzel, A., T. H. Sparks, N. Estrella, E. Koch, A. Aasa, R. Ahas, K. Alm-KÜbler, P. Bissolli, O. G. Braslavská, A. Briede, F. M. Chmielewski, Z. Crepinsek, Y. Curnel, Å. Dahl, C. Defila, A. Donnelly, Y. Filella, K. Jatzcak, F. MÅGe, A. Mestre, Ø. Nordli, J. PeÑUelas, P. Pirinen, V. RemiŠovÁ, H. Scheifinger, M. Striz, A. Susnik, A. J. H. Van Vliet, F.-E. Wielgolaski, S. Zach, and A. N. A. Zust. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* **12**:1969-1976.
- Minamoto, T., H. Yamanaka, T. Takahara, M. N. Honjo, and Z. i. Kawabata. 2012. Surveillance of fish species composition using environmental DNA. *Limnology* **13**:193-197.
- Mitsch, W. J., B. Bernal, A. M. Nahlik, Ü. Mander, L. Zhang, C. J. Anderson, S. E. Jørgensen, and H. Brix. 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology* **28**:583-597.
- Mitsch, W. J. and M. E. Hernandez. 2012. Landscape and climate change threats to wetlands of North and Central America. *Aquatic Sciences* **75**:133-149.
- Moore, P. D. 2002. The future of cool temperate bogs. *Environmental Conservation* **29**:3-20.
- Moran, R., I. A. N. Harvey, B. Moss, H. Feuchtmayr, K. Hatton, T. O. M. Heyes, and D. Atkinson. 2010. Influence of simulated climate change and eutrophication on three-

-
- spined stickleback populations: a large scale mesocosm experiment. *Freshwater Biology* **55**:315-325.
- Mortsch, L., J. Ingram, A. Hebb, and S. E. Doka. 2006. Great Lakes coastal wetland communities: vulnerability to climate change and response to adaptation strategies. Final Report submitted to the Climate Change Impacts and Adaptation Program. Natural Resources Canada, Toronto, Ontario.
- Mowat, G. and C. Strobeck. 2000. Estimating population size of grizzly bears using hair capture, DNA profiling, and mark-recapture analysis. *Journal of Wildlife Management* **64**:183-193.
- Moya-Laraño, J., R. Macías-Ordóñez, W. U. Blanckenhorn, and C. Fernández-Montraveta. 2008. Analysing body condition: mass, volume or density. *Journal of Animal Ecology* **77**:1099-1108.
- Music, B. and D. Caya. 2007. Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi River basin as simulated by the Canadian regional climate model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology* **8**:969-988.
- Myers, P., B. L. Lundrigan, S. M. G. Hoffman, A. P. Haraminac, and S. H. Seto. 2009. Climate-induced changes in the small mammal communities of the Northern Great Lakes Region. *Global Change Biology* **15**:1434-1454.
- Nathan, R., N. Horvitz, Y. He, A. Kuparinen, F. M. Schurr, and G. G. Katul. 2011. Spread of North American wind-dispersed trees in future environments. *Ecology Letters* **14**:211-219.
- Naulleau, G. and X. Bonnet. 1996. Body condition threshold for breeding in a viviparous snake. *Oecologia* **107**:301-306.
- Nichols, J. and B. Williams. 2006. Monitoring for conservation. *Trends in Ecology & Evolution* **21**:668-673.
- Nichols, J. D. 1992. Capture-Recapture Models. *Bioscience* **42**:94-102.
- Nichols, J. D., H. Hines, J. R. Sauer, F. W. Fallon, J. E. Fallon, and P. J. Heglund. 2000. A double-observer approach for estimating detection probability and abundance from point counts. *The Auk* **117**:393-408.
- Nielsen, S. E., D. L. Haughland, E. Bayne, and J. Schieck. 2009. Capacity of large-scale, long-term biodiversity monitoring programmes to detect trends in species prevalence. *Biodiversity and Conservation* **18**:2961-2978.
- Nielsen, U. N. and D. H. Wall. 2013. The future of soil invertebrate communities in polar regions: different climate change responses in the Arctic and Antarctic? *Ecology Letters* **16**:409-419.
- Nilsson, M., J. Sagerfors, I. Buffam, H. Laudon, T. Eriksson, A. Grelle, L. Klemedtsson, P. E. R. Weslien, and A. Lindroth. 2008. Contemporary carbon accumulation in a boreal oligotrophic minerogenic mire - a significant sink after accounting for all C-fluxes. *Global Change Biology* **14**:2317-2332.
- Normander, B., G. Levin, A.-P. Auvinen, H. Bratli, O. Stabbetorp, M. Hedblom, A. Glimskär, and G. A. Gudmundsson. 2012. Indicator framework for measuring quantity and quality of biodiversity—Exemplified in the Nordic countries. *Ecological Indicators* **13**:104-116.
- Noss, R. F. 1990. Indicators for monitoring biodiversity: A hierarchical approach. *Conservation Biology* **4**:355-364.
- Ohlemuller, R. 2011. Running Out of Climate Space. *Science* **334**:613-614.

-
- Orwin, K. H. and N. J. Ostle. 2012. Moss species effects on peatland carbon cycling after fire. *Functional Ecology* **26**:829-836.
- Paquette, A. and C. Messier. 2011. The effect of biodiversity on tree productivity: from temperate to boreal forests. *Global Ecology and Biogeography* **20**:170-180.
- Parish, F., A. A. Sirin, D. Charman, H. Joosten, T. Minayeva, M. Silvius, and L. Stringer. 2008. Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report. United Nations Environment Programme/Global Environment Facility (UNEP/GEF), Wageningen. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Parker, G. A., P. S. Barboza, and M. P. Gillingham. 2009. Nutrition integrates environmental responses of ungulates. *Funct. Ecol.* **23**:57-69.
- Parnesan, C. 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **37**:637-669.
- Parnesan, C., C. Duarte, E. Poloczanska, A. J. Richardson, and M. C. Singer. 2011. Overstretching attribution. *Nature Climate Change* **1**:2-4.
- Parnesan, C., S. Gaines, L. Gonzalez, D. M. Kaufman, J. Kingsolver, A. T. Peterson, and R. Sagarin. 2005. Empirical perspectives on species borders: from traditional biogeography to global change. *Oikos* **108**:58-75.
- Parnesan, C. and G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* **421**:37-42.
- Pépin, M., R. Proulx, and P. Magnan. 2013. Fall synchrony between leaf color change and brook trout spawning in the Laurentides Wildlife Reserve (Québec, Canada) as potential environmental integrators. *Ecological Indicators*.
- Pereira, H. M., S. Ferrier, M. Walters, G. N. Geller, R. H. G. Jongman, R. J. Scholes, M. W. Bruford, N. Brummitt, S. H. M. Butchart, A. C. Cardoso, N. C. Coops, E. Dulloo, D. P. Faith, J. Freyhof, R. D. Gregory, R. Heip, R. Höft, G. C. Hurtt, W. Jetz, D. S. Karp, M. A. McGeoch, D. Obura, Y. Onoda, N. Pettorelli, B. Reyers, R. Sayre, J. P. W. Scharlemann, S. N. Stuart, E. Turak, M. Walpole, and M. Wegmann. 2013. Essential biodiversity variables. *Science* **339**:277-278.
- Pereira, H. M., P. W. Leadley, V. Proenca, R. Alkemade, J. P. W. Scharlemann, J. F. Fernandez-Manjarres, M. B. Araujo, P. Balvanera, R. Biggs, W. W. L. Cheung, L. Chini, H. D. Cooper, E. L. Gilman, S. Guenette, G. C. Hurtt, H. P. Huntington, G. M. Mace, T. Oberdorff, C. Revenga, P. Rodrigues, R. J. Scholes, U. R. Sumaila, and M. Walpole. 2010. Scenarios for Global Biodiversity in the 21st Century. *Science* **330**:1496-1501.
- Peterson, A. T., M. A. Ortega-Huerta, J. Bartley, V. Sanchez-Cordero, J. Soberon, R. H. Buddemeyer, and D. R. B. Stockwell. 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* **416**:626-629.
- Pettorelli, N., S. Ryan, T. Mueller, N. Bunnefeld, B. Jedrzejewska, M. Lima, and K. Kausrud. 2011. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology. *Climate Research* **46**:15-27.
- Pfeifer, M., M. Disney, T. Quaife, and R. Marchant. 2011. Terrestrial ecosystems from space: a review of earth observation products for macroecology applications. *Global Ecology and Biogeography* **21**:603-624.
- Pimm, S. L., M. Ayres, A. Balmford, G. Branch, K. Brandon, T. Brooks, R. Bustamante, R. Costanza, R. Cowling, L. M. Curran, A. Dobson, Stephen Farber, G. A. B. d. Fonseca, C. Gascon, R. Kitching, J. McNeely, T. Lovejoy, R. A. Mittermeier, N. Myers, J. A. Patz, B. Raffle, D. Rapport, P. Raven, C. Roberts, J. P. Rodríguez, A. B. Rylands, C. Tucker, C.

-
- Safina, C. Samper, M. L. J. Stiassny, J. Supriatna, D. H. Wall, and D. Wilcove. 2001. Can we defy nature's end. *Nature* **293**:2207-2208.
- Post, E. 2013. Erosion of community diversity and stability by herbivore removal under warming. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **280**:*in press*.
- Post, E. and M. C. Forchhammer. 2008. Climate change reduces reproductive success of an Arctic herbivore through trophic mismatch. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **363**:2367-2373.
- Post, E., M. C. Forchhammer, M. S. Bret-Harte, T. V. Callaghan, T. R. Christensen, B. Elberling, A. D. Fox, O. Gilg, D. Hik, T. T. Høye, R. A. Ims, E. Jeppesen, D. R. Klein, J. Madsen, A. D. McGuire, S. Rysgaard, D. E. Schindler, I. Stirling, M. P. Tamstorf, N. J. C. Tyler, R. van der Wal, J. Welker, P. A. Wookey, N. M. Schmidt, and P. Aastrup. 2009. Ecological dynamics across the arctic associated with recent climate change. *Nature* **325**:1355-1358.
- Post, E. and C. Pedersen. 2008. Opposing plant community responses to warming with and without herbivores. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**:12353-12358.
- Potvin, F. and L. Breton. 2005. Testing 2 aerial survey techniques on deer in fenced enclosures - visual double-counts and thermal infrared sensing. *Wildlife Society Bulletin* **33**:317-325.
- Prather, C. M., S. L. Pelini, A. Laws, E. Rivest, M. Woltz, C. P. Bloch, I. D. Toro, C.-K. Ho, J. Kominoski, T. A. Scott Newbold, S. Parsons, and A. Joern. 2013. Invertebrates, ecosystem services and climate change. *Biological Reviews*:*in press*.
- Proulx, R. and L. Parrott. 2008. Measures of structural complexity in digital images for monitoring the ecological signature of an old-growth forest ecosystem. *Ecological Indicators* **8**:270-284.
- Radchuk, V., C. Turlure, N. Schtickzelle, and J. Newman. 2013. Each life stage matters: the importance of assessing the response to climate change over the complete life cycle in butterflies. *Journal of Animal Ecology* **82**:275-285.
- Randin, C. F., R. Engler, S. Normand, M. Zappa, N. E. Zimmermann, P. B. Pearman, P. Vittoz, W. Thuiller, and A. Guisan. 2009. Climate change and plant distribution: local models predict high-elevation persistence. *Global Change Biology* **15**:1557-1569.
- Reed, T. E., S. Jenouvrier, M. E. Visser, and A. Roulin. 2013. Phenological mismatch strongly affects individual fitness but not population demography in a woodland passerine. *Journal of Animal Ecology* **82**:131-144.
- Reed, T. E., D. E. Schindler, and R. S. Waples. 2011. Interacting Effects of Phenotypic Plasticity and Evolution on Population Persistence in a Changing Climate. *Conservation Biology* **25**:56-63.
- Ricklefs, R. E. and D. Schluter. 1993. *Species diversity in ecological communities*. University of Chicago Press, Chicago.
- Robroek, B. J. M., J. Limpens, A. Breeuwer, and M. G. C. Schouten. 2007. Effects of water level and temperature on performance of four sphagnum mosses. *Plant Ecology* **190**:97-107.
- Rodenhouse, N. L., L. M. Christenson, D. Parry, and L. E. Green. 2009. Climate change effects on native fauna of northeastern forests. This article is one of a selection of papers from NE Forests 2100: A Synthesis of Climate Change Impacts on Forests of the Northeastern US and Eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research* **39**:249-263.
- Rogers, T. L., M. B. Ciaglia, H. Klinck, and C. Southwell. 2013. Density Can Be Misleading for Low-Density Species: Benefits of Passive Acoustic Monitoring. *PLoS one* **8**:e52542.

-
- Root, B. A., J. T. Price, and K. Hall. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* **421**:47-60.
- Rustad, L., J. Campbell, J. S. Dukes, T. Huntington, K. F. Lambert, J. Mohan, and Rodenhouse. 2012. Changing climate, changing forests: The impacts of climate change on forests of the northeastern United States and eastern Canada. U.S. Forest Service.
- Sæther, B. E., W. J. Sutherland, and S. Engen. 2004. Climate influences on avian population dynamics. *Birds and Climate Change* **35**:185-209.
- Scheffer, M., S. R. Carpenter, J. A. Foley, C. Folkes, and B. Walker. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* **413**:591-596.
- Schwartz, M., G. Luikart, and R. Waples. 2007. Genetic monitoring as a promising tool for conservation and management. *Trends in Ecology & Evolution* **22**:25-33.
- Seavy, N. E. and M. H. Reynolds. 2007. Is statistical power to detect trends a good assessment of population monitoring? *Biological Conservation* **140**:187-191.
- Sharma, S., D. A. Jackson, C. K. Minns, and B. J. Shuter. 2007. Will northern fish populations be in hot water because of climate change? *Global Change Biology* **13**:2052-2064.
- Shieck, J. 1997. Biased detection of bird vocalizations affects comparisons of bird abundance among forested habitat. *The Condor* **99**:179-190.
- Shokralla, S., J. L. Spall, J. F. Gibson, and M. Hajibabaei. 2012. Next-generation sequencing technologies for environmental DNA research. *Molecular Ecology* **21**:1794-1805.
- Simberloff, D. 1998. Flagships, umbrellas and keystones: is single species management passé in the landscape era? *Biol. Cons.* **83**:247-257.
- Skre, O. and M. Næss. 1999. CO₂ and winter temperature effects on white birch. *Chemosphere - Global Change Science* **1**:469-483.
- Smol, J. P. 2005. Climate-driven regime shifts in the biological communities of arctic lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **102**:4397-4402.
- Soja, A., N. Tchebakova, N. French, M. Flannigan, H. Shugart, B. Stocks, A. Sukhinin, E. Parfenova, F. Chapiniii, and P. Stackhousejr. 2007. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations. *Global and Planetary Change* **56**:274-296.
- Solow, A. R. 2001. observation error and the detection of delayed density-dependence. *Ecology* **82**:3263-3264.
- Spooner, D. E. and C. C. Vaughn. 2008. A trait-based approach to species' roles in stream ecosystems: climate change, community structure, and material cycling. *Oecologia* **158**:307-317.
- Stahlschmidt, P. and C. A. Bruehl. 2012. Bats as bioindicators - the need of a standardized method for acoustic bat activity surveys. *Methods in Ecology and Evolution* **3**:503-508.
- Stainforth, D. A., T. Aina, C. Christensen, M. Collins, N. Faull, D. J. Frame, J. A. Kettleborough, S. Knight, A. Martin, J. M. Murphy, C. Piani, D. Sexton, L. A. Smith, R. A. Spicer, A. J. Thorpe, and M. R. Allen. 2005. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature* **433**:403-406.
- Stamp, J. D., A. T. Hamilton, L. Zheng, and B. G. Bierwagen. 2010. Use of thermal preference metrics to examine state biomonitoring data for climate change effects. *Journal of the North American Benthological Society* **29**:1410-1423.
- Staudinger, M. D., N. B. Grimm, A. Staudt, S. L. Carter, F. S. Chapin III, M. Ruckelshaus, and B. A. Stein. 2012. Impacts of climate change on biodiversity, ecosystems, and ecosystem services: technical input to the 2013 national climate assessment.

-
- Stearns, S. C. 1992. The evolution of life history. Oxford University Press. Oxford, UK.
- Stow, D. A., A. Hope, D. McGuire, D. Verbyla, J. Gamon, F. Huemmrich, S. Houston, C. Racine, M. Sturm, K. Tape, L. Hinzman, K. Yoshikawa, C. Tweedie, B. Noyle, C. Silapaswan, D. Douglas, B. Griffith, G. Jia, H. Epstein, D. Walker, S. Daeschner, A. Petersen, L. Zhou, and R. Myneni. 2004. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sensing of Environment* **89**:281-308.
- Strong, D. R., J. H. Lawton and S. R. Southwood. 1984. Insects on plants. Community patterns and mechanisms. Harvard University Press., Cambridge (MA).
- Schweiger, O., S. J. Kudrna, S. Klotz, and I. Kuhn. 2008. Climate change can cause spatial mismatch of trophically interacting species. *Ecology* **89**:3472-3479.
- Tanadini, L. G. and B. R. Schmidt. 2011. Population Size Influences Amphibian Detection Probability: Implications for Biodiversity Monitoring Programs. *PLoS one* **6**:e28244.
- Tarnocai, C., J. G. Canadell, E. A. G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova, and S. Zimov. 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* **23**:GB2023.
- Taylor, C. 2012. Sensor arrays for automated acoustic monitoring of bird behavior and diversity. *The Journal of the Acoustical Society of America* **132**:2035-2035.
- Thomas, C. D., A. Cameron, R. E. Green, M. Bakkenes, L. J. Beaumont, Y. C. Collingham, B. F. N. Erasmus, M. F. de Siqueira, A. Grainger, L. Hannah, L. Hughes, B. Huntley, A. S. van Jaarsveld, G. F. Midgley, L. Miles, M. A. Ortega-Huerta, A. Townsend Peterson, O. L. Phillips, and S. E. Williams. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* **427**:145-148.
- Thompson, I., B. MacKey, S. McNulty, and A. Mosseler. 2009. Forest Resilience, Biodiversity, and Climate Change. A synthesis of the biodiversity/ resilience/ stability relationship in forest ecosystems. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Canada.
- Thomsen, P. F., J. O. S. Kielgast, L. L. Iversen, C. Wiuf, M. Rasmussen, M. T. P. Gilbert, L. Orlando, and E. Willerslev. 2012. Monitoring endangered freshwater biodiversity using environmental DNA. *Molecular Ecology* **21**:2565-2573.
- Thuiller, W. 2003. BIOMOD – optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology* **9**:1353-1362.
- Thuiller, W., C. Albert, M. B. Araújo, P. M. Berry, M. Cabeza, A. Guisan, T. Hickler, G. F. Midgley, J. Paterson, F. M. Schurr, M. T. Sykes, and N. E. Zimmermann. 2008. Predicting global change impacts on plant species' distributions: Future challenges. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* **9**:137-152.
- Thuiller, W., S. Lavergne, C. Roquet, I. Boulangeat, B. Lafourcade, and M. B. Araujo. 2011. Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature* **470**:531-534.
- Tsyganov, A. N., R. Aerts, I. Nijs, J. H. C. Cornelissen, and L. Beyens. 2012. Sphagnum-dwelling Testate Amoebae in Subarctic Bogs are More Sensitive to Soil Warming in the Growing Season than in Winter: the Results of Eight-year Field Climate Manipulations. *Protist* **163**:400-414.
- Turetsky, M. R., S. E. Crow, R. J. Evans, D. H. Vitt, and R. K. Wieder. 2008. Trade-offs in resource allocation among moss species control decomposition in boreal peatlands. *Journal of Ecology* **96**:1297-1305.
- Vačkář, D., B. ten Brink, J. Loh, J. E. M. Baillie, and B. Reyers. 2012. Review of multispecies indices for monitoring human impacts on biodiversity. *Ecological Indicators* **17**:58-67.

-
- Visser, M. E. 2008. Keeping up with a warming world; assessing the rate of adaptation to climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **275**:649-659.
- Visser, M. E. and C. Both. 2005. Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **272**:2561-2569.
- Vittoz, P., D. Cherix, Y. Gonseth, V. Lubini, R. Maggini, N. Zbinden, and S. Zumbach. 2013. Climate change impacts on biodiversity in Switzerland: A review. *Journal for Nature Conservation*:*in press*.
- Wall, D. H. and R. A. Virginia. 2000. The world beneath our feet: Soil biodiversity and ecosystem functioning. Pages 225–241 in P. R. Raven and t. Williams, editors. *Nature and Human Society: The Quest for a Sustainable World*. National Academy of Sciences and National Research Council, Washington (DC).
- Walls, S., W. Barichivich, and M. Brown. 2013. Drought, Deluge and Declines: The Impact of Precipitation Extremes on Amphibians in a Changing Climate. *Biology* **2**:399-418.
- Walther, G. R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. J. C. Beebee, J. M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg, and F. Bairlein. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* **416**:389-395.
- Warner, B. G. and C. D. A. Rubec. 1997. *Système de classification des terres humides du Canada*. Centre de recherche sur les terres humides, Waterloo, Canada.
- Watson, I. and P. Novelly. 2004. Making the biodiversity monitoring system sustainable: Design issues for large-scale monitoring systems. *Austral Ecology* **29**:16-30.
- Way, D. A. and R. F. Sage. 2008. Elevated growth temperatures reduce the carbon gain of black spruce [*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.]. *Global Change Biology* **14**:624-636.
- Weedon, J. T., G. A. Kowalchuk, R. Aerts, J. van Hal, R. van Logtestijn, N. Taş, W. F. M. Röling, and P. M. van Bodegom. 2012. Summer warming accelerates sub-arctic peatland nitrogen cycling without changing enzyme pools or microbial community structure. *Global Change Biology* **18**:138-150.
- White, M. A., K. M. de Beurs, K. Didan, D. W. Inouye, A. D. Richardson, O. P. Jensen, J. O'Keefe, G. Zhang, R. R. Nemani, W. J. D. van Leeuwen, J. F. Brown, A. de Wit, M. Schaepman, X. Lin, M. Dettinger, A. S. Bailey, J. Kimball, M. D. Schwartz, D. D. Baldocchi, J. T. Lee, and W. K. Lauenroth. 2009. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology* **15**:2335-2359.
- Wiedermann, M. M., A. Nordin, U. Gunnarsson, M. B. Nilsson, and L. Ericson. 2007. Global change shifts vegetation and plant-parasite interactions in a boreal mire. *Ecology* **88**:454-464.
- Wilsey, B. J., P. P. Daneshgar, and H. W. Polley. 2011. Biodiversity, phenology and temporal niche differences between native- and novel exotic-dominated grasslands. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* **13**:265-276.
- Wolters, V., W. L. Silver, D. E. Bignell, D. C. Coleman, P. Lavelle, W. H. van der Putten, P. d. Ruiter, J. Rusek, D. H. Wall, D. A. Wardle, L. Brussaard, J. M. Dangerfield, V. K. Brown, K. Giller, D. U. Hooper, O. Sala, J. Tiedje and J. A. v. Veen. 2000. Effects of global changes on above- and belowground biodiversity in terrestrial ecosystems : Implications for ecosystem functioning. *BioScience* **50**:1089-1098.
- Woodward, G., D. M. Perkins, and L. E. Brown. 2010. Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **365**:2093-2106.

-
- Woodward, G. U. Y. 2009. Biodiversity, ecosystem functioning and food webs in fresh waters: assembling the jigsaw puzzle. *Freshwater Biology* **54**:2171-2187.
- Wu, X. and H. Liu. 2013. Consistent shifts in spring vegetation green-up date across temperate biomes in China, 1982-2006. *Global Change Biology* **19**:870-880.
- Yoccoz, N. G. 2012. The future of environmental DNA in ecology. *Molecular Ecology* **21**:2031-2038.
- Yoccoz, N. G., K. A. Bråthen, L. Gielly, J. Haile, M. E. Edwards, T. Goslar, H. Von Stedingk, A. K. Brysting, E. Coissac, F. Pompanon, J. H. Sønstebo, C. Miquel, A. Valentini, F. De Bello, J. Chave, W. Thuiller, P. Wincker, C. Cruaud, F. Gavory, M. Rasmussen, M. T. P. Gilbert, L. Orlando, C. Brochmann, E. Willerslev, and P. Taberlet. 2012. DNA from soil mirrors plant taxonomic and growth form diversity. *Molecular Ecology* **21**:3647-3655.
- Yoccoz, N. G., J. D. Nichols, and T. Boulinier. 2001. Monitoring of biological diversity in space and time. *Trends in Ecology & Evolution* **16**:446-453.
- Zeigler, S. and C. Bradshaw. 2013. Predicting responses to climate change requires all life-history stages. *Journal of Animal Ecology* **82**:3-5.
- Zhang, S. and Q. L. Dang. 2007. Interactive effects of soil temperature and [CO₂] on morphological and biomass traits in seedlings of four boreal tree species. *Forest Science* **53**:453-460.
- Zhu, K., C. W. Woodall, and J. S. Clark. 2012. Failure to migrate: lack of tree range expansion in response to climate change. *Global Change Biology* **18**:1042-1052.
- Zvereva, E. L. and M. V. Kozlov. 2006. Consequences of simultaneous elevation of carbon dioxide and temperature for plant-herbivore interactions: A metaanalysis. *Global Change Biology* **12**:27-41.

5 Analyse du climat futur

Auteurs : Shubha Pandit, Jason Samson et Pedro Peres-Neto

Affiliation : Université du Québec à Montréal, Chaire du Canada en modélisation spatiale et biodiversité

5.1 Données climatiques

Les données climatiques utilisées pour ce projet ont été fournies par le consortium Ouranos et comportent trois volets. Le premier volet représente les moyennes climatiques du passé récent (1961-2003) basées sur des observations météorologiques. Le deuxième volet représente les moyennes climatiques pour l'horizon 2050, soit la période 2041-2070, tirées du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC). Finalement, nous avons utilisé des observations mensuelles et des prédictions mensuelles du MRCC pour l'horizon 2050 afin de décrire la dynamique temporelle du climat récent et futur. Ici, nous décrivons d'abord le type de données utilisées et la manière de les calculer, puis nous décrivons les variables climatiques qui ont été dérivées de ces jeux de données.

5.2 Données observées pour le passé récent

Les données climatiques sur le passé récent (Hutchinson et al. 2009) sont basées sur des observations quotidiennes interpolées spatialement par la méthode ANUSPLIN (Hutchinson 1995). Dans le cas de la température, les données prennent aussi en considération l'élévation. Ces données représentent la période 1961-2003 et ont une résolution de 10km. Une description complète de la méthode est disponible sur le site internet d'Agriculture et Agroalimentaire Canada²¹. La qualité de ces données est bonne pour le sud du Québec mais la couverture des stations météorologiques est insuffisante pour les territoires nordiques (p.ex. certains endroits dans la péninsule d'Ungava et le centre nord du Québec sont à plus de 300km de la plus proche station météorologique). Les données ne sont pas disponibles au nord du 60°N et ne couvrent donc pas la communauté inuit d'Ivujivik qui est située au 62°25'N. De plus, les stations nordiques ne sont pas nécessairement représentatives de leur région puisqu'elles sont situées sur les côtes de la Baie d'Hudson, de l'océan arctique ou bien de la Baie d'Ungava et qu'il n'y a pas de station à l'intérieur des terres malgré l'effet important des côtes sur le climat. Une discussion exhaustive sur les défis et limites de la climatologie du Québec nordique a été produite dans le cadre du projet de l'atlas de la biodiversité du Québec nordique et est accessible sur le site internet d'Ouranos²².

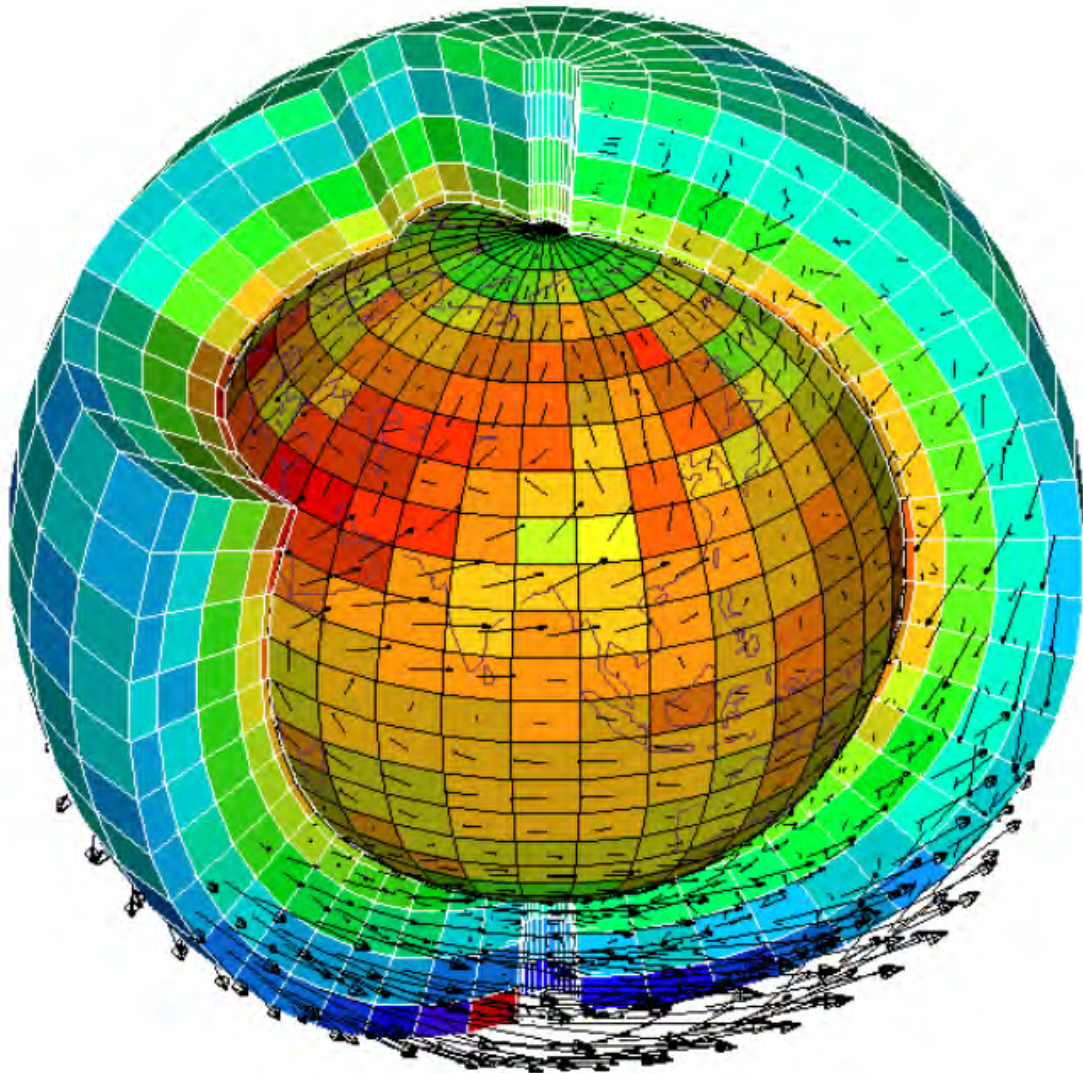
²¹ ftp://ftp.agr.gc.ca/pub/outgoing/aesb-eos-g/Climate_Data/GeoTIFF/Disk2/Metadata/NLWIS-National_Daily_10km_Gridded_Dataset_for_Canada.pdf

²² http://www.ouranos.ca/media/publication/271_RapportRapaic2013red.pdf

5.3 Données climatiques simulées pour le futur

5.3.1 *Modèle Global du Climat (MGC)*

La modélisation du climat futur est basée fondamentalement sur des équations provenant de la dynamique des fluides (atmosphère et océans), la radiation solaire et les changements de concentration de gaz à effets de serre à l'échelle planétaire, d'où le nom de Modèle Global du Climat. Malgré l'amélioration constante des MGC grâce à l'incorporation de phénomènes subtils influençant le climat (p.ex. l'albédo de la surface de la terre, la chimie de l'atmosphère, le transfert hydrique des végétaux), la puissance de calcul des ordinateurs restreint leur résolution spatiale à quelques centaines de kilomètres (Fig. 5.1). Cette résolution spatiale limite fortement les études d'impacts régionaux puisque ces modèles divisent la province de Québec en seulement 15 à 20 cellules où les conditions climatiques futures diffèrent. Cela implique que les nombreux processus météorologiques qui se produisent à une échelle plus fine qu'une centaine de kilomètres (p.ex. les nuages, les précipitations convectives, la turbulence à basse altitude) ne peuvent être résolus explicitement par ces modèles. Une troisième et dernière faiblesse des MGC est qu'ils sont libres de créer leur propre climat car c'est seulement lors du départ d'une simulation que certaines limites climatiques (p.ex. les moyennes climatiques du moment) leurs sont imposées. Ainsi, la météorologie créée par un MGC n'a aucune relation temporelle avec la météorologie observée, c'est-à-dire que les années réelles ne peuvent être comparées directement à celles qui sont simulées. Ce sont uniquement les statistiques des données simulées sur de longues périodes (p.ex. moyenne, écart-type sur 30 années) qui peuvent être comparées aux statistiques observées dans la réalité.



Météo-France

Figure 5.1. Schéma de la représentation des modèles globaux du climat. L'atmosphère et les océans sont divisés par cellule de quelques centaines de kilomètres de large avec 30 niveaux verticaux pour l'atmosphère. Chaque cellule « reçoit » les données météorologiques de la cellule adjacente selon l'écoulement des fluides et les processus physiques sont calculés avec un pas de temps de 20 minutes. Adaptée de Météo-France²³.

²³ http://climat.meteofrance.com/chgt_climat2/presentation

5.3.2 Modèle Régional du Climat

Pour répondre au besoin du projet CC-Suivi, nous avons plutôt opté pour un Modèle Régional du Climat (MRC). Les MRC ont été développés afin de simuler les processus météorologiques à une résolution beaucoup plus fine que celle des MCG en modélisant non pas toute la planète mais plutôt une région d'intérêt (p.ex. l'Amérique du Nord ou le Québec), ce qui permet d'utiliser la même puissance de calcul à meilleur escient (Figure 5.2). Ils peuvent ainsi mieux simuler certains processus importants qui prennent place dans la région d'intérêt. Par contre, le fait de se concentrer sur une région limitée implique des "frontières" latérales aux périmètres de leur domaine. Cela fait en sorte que le modèle doit obtenir des informations à ses frontières latérales afin de rester "en contact" avec les événements météorologiques qui se produisent en dehors de son domaine, et ces informations sont obtenues par les MGC.

5.3.3 Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC)

Pour le projet CC-Suivi, nous avons utilisé les données provenant de simulations de la 4^{ième} version du MRCC (Music and Caya 2007). Ces simulations sont à une résolution horizontale de 45 km et couvrent l'Amérique du Nord. Les simulations historiques du MRCC couvrent une période de 40 ans (1961-2000) du passé récent et les simulations futures couvrent la période de (2041-2060), nommée l'horizon 2050. La validation des données de ce modèle, par des comparaisons entre les données du passé récent simulées et les observations de stations météorologiques, est disponible sur le site internet d'Ouranos²⁴.

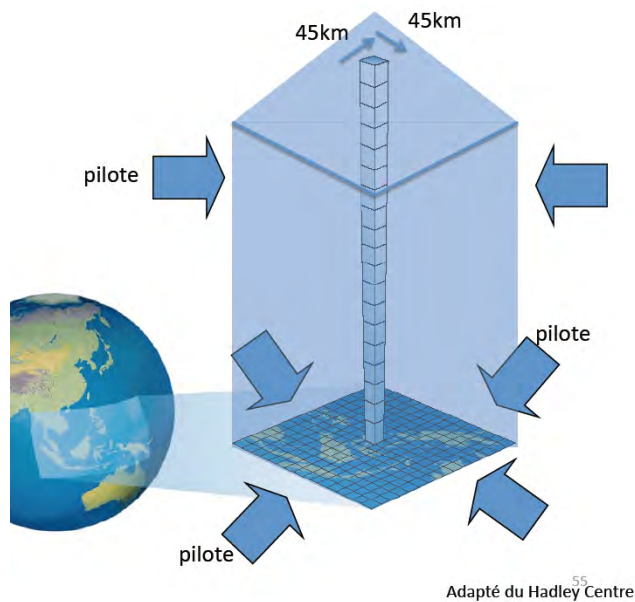


Figure 5.2. Représentation schématique des modèles régionaux du climat. La zone ciblée, montrée sur le globe, est informée par des « pilotes » qui sont des modèles globaux du climat. L'atmosphère et les océans sont divisés par cellule de quelques dizaines de kilomètres de large avec 30 à 60 niveaux verticaux pour l'atmosphère. Chaque cellule « reçoit » les données météorologiques des cellules adjacentes selon l'écoulement des fluides et les processus physiques sont calculés avec un pas de temps de 15 minutes. Figure de Dominique Paquin, Ouranos. Adaptée du Hadley Centre.

²⁴ http://www.ouranos.ca/media/publication/271_RapportRapaic2013red.pdf

5.3.4 *Changements climatiques (CC)*

Les modèles climatiques, tant globaux que régionaux, ont tous des biais lorsqu'ils sont comparés aux conditions climatiques observées dans le passé récent. Certains modèles vont prédire des températures plus froides (ou chaudes) de quelques degrés comparativement aux données observées ou bien des précipitations plus ou moins abondantes. Il est donc essentiel d'enlever ce biais lorsque nous faisons des prédictions sur l'impact des CC sur la biodiversité puisque les prédictions écologiques sont basées sur les corrélations entre la biodiversité actuelle et le climat actuel.

Il existe de nombreuses méthodes afin d'éliminer le biais des modèles climatiques, dont la plus connue et la plus intuitive est la méthode « delta » (Lettenmaier and Gan 1990, Hamlet et al. 2010), le nom provient de la lettre grecque δ qui représente la différence entre deux valeurs. La Figure 5.3 explique la méthode en détails. Nous avons utilisé cette méthode pour toutes les données climatiques dans le projet CC-Suivi.

Le choix des modèles climatiques utilisés apporte aussi de l'incertitude car chaque modèle a une structure unique et donc des prédictions de CC plus ou moins importants. La Figure 5.4 représente les changements prévus pour la température moyenne annuelle et les précipitations totales au Québec pour l'horizon 2080 provenant de 70 modèles globaux du climat. On peut voir que les changements de température prévus ont une grande fourchette allant de 2°C à 8°C tandis que les changements de précipitations vont de 50mm à 225mm. Étant donné qu'il est impossible de savoir quel modèle représente le plus fidèlement la réalité, il y a des méthodes pour tenir compte de cette incertitude. La méthode la plus fréquemment utilisée est celle de la prévision d'ensemble (Stainforth et al. 2005, Araujo and New 2007, Marmion et al. 2009). Cette méthode calcule la moyenne d'un grand nombre de modèle climatique. Pour le projet de CC-Suivi, nous avons utilisé la moyenne de 12 modèles régionaux (MRCC version 4.2.3).

5.3.5 *Agrégation des données sur grille*

Nous avons agrégé toutes les données climatiques à une grille de résolution de 15km. Les données du MRCC sont à 45km de résolution et la grille de 15km est nichée à l'intérieur de celle de 45km. La province de Québec est représentée par 8155 cellules et, par raison d'esthétisme, nous avons cartographié les variables climatiques en incluant aussi le Labrador ce qui augmente le nombre de cellule à 8652.

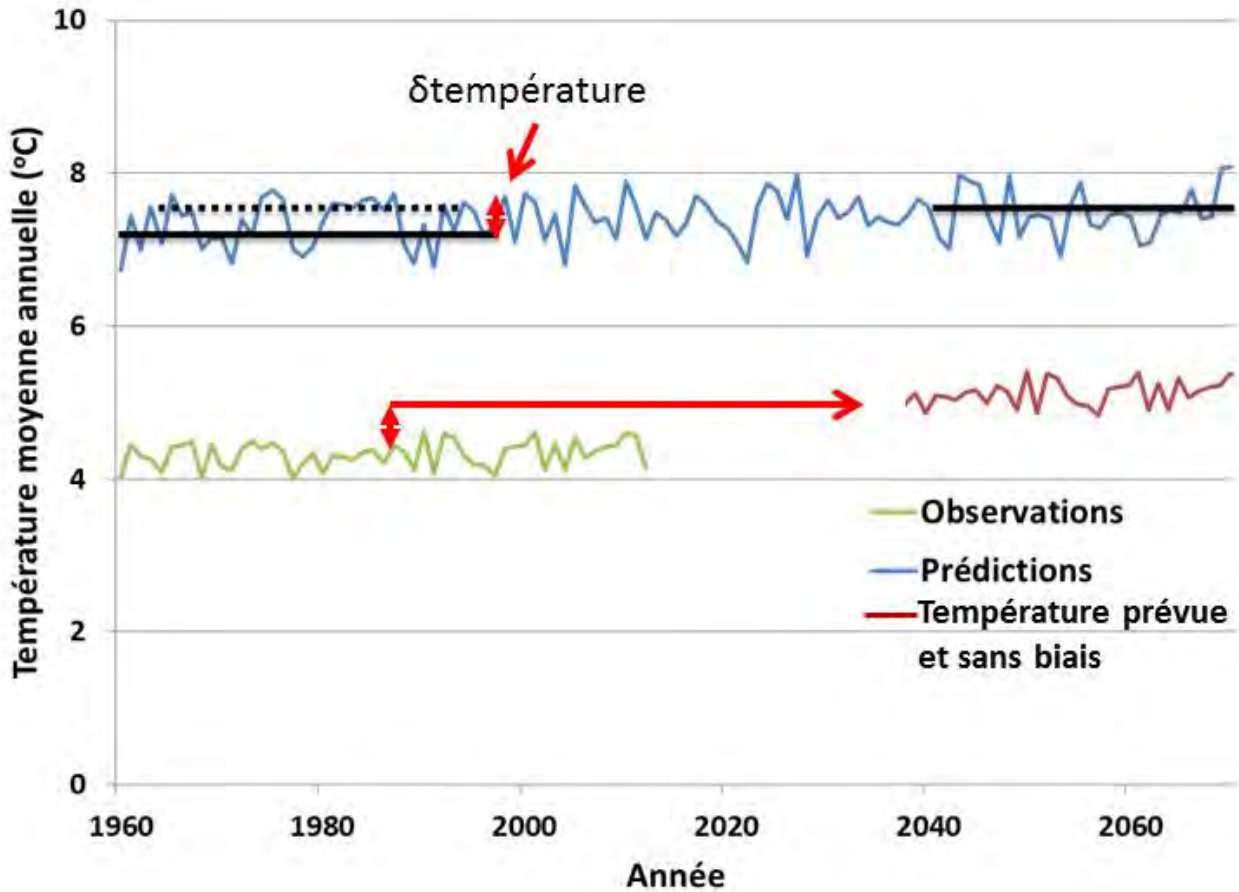


Figure 5.3. Méthode « delta » pour corriger le biais des modèles climatiques. Dans cet exemple fictif, le modèle climatique est biaisé vers une température plus chaude que les observations des stations météorologiques. La méthode delta consiste à calculer le changement de température prévu par le modèle climatique entre le passé récent et l'horizon futur désiré, soit les périodes 1961-2000 et 2041-2070. Ici, le modèle prédit une augmentation d'environ 0.5°C, indiqué par la flèche rouge entre la moyenne de la période historique et celle de l'horizon 2050. Par la suite, on additionne cette valeur delta aux observations afin d'obtenir une prédiction future sans le biais du modèle climatique.

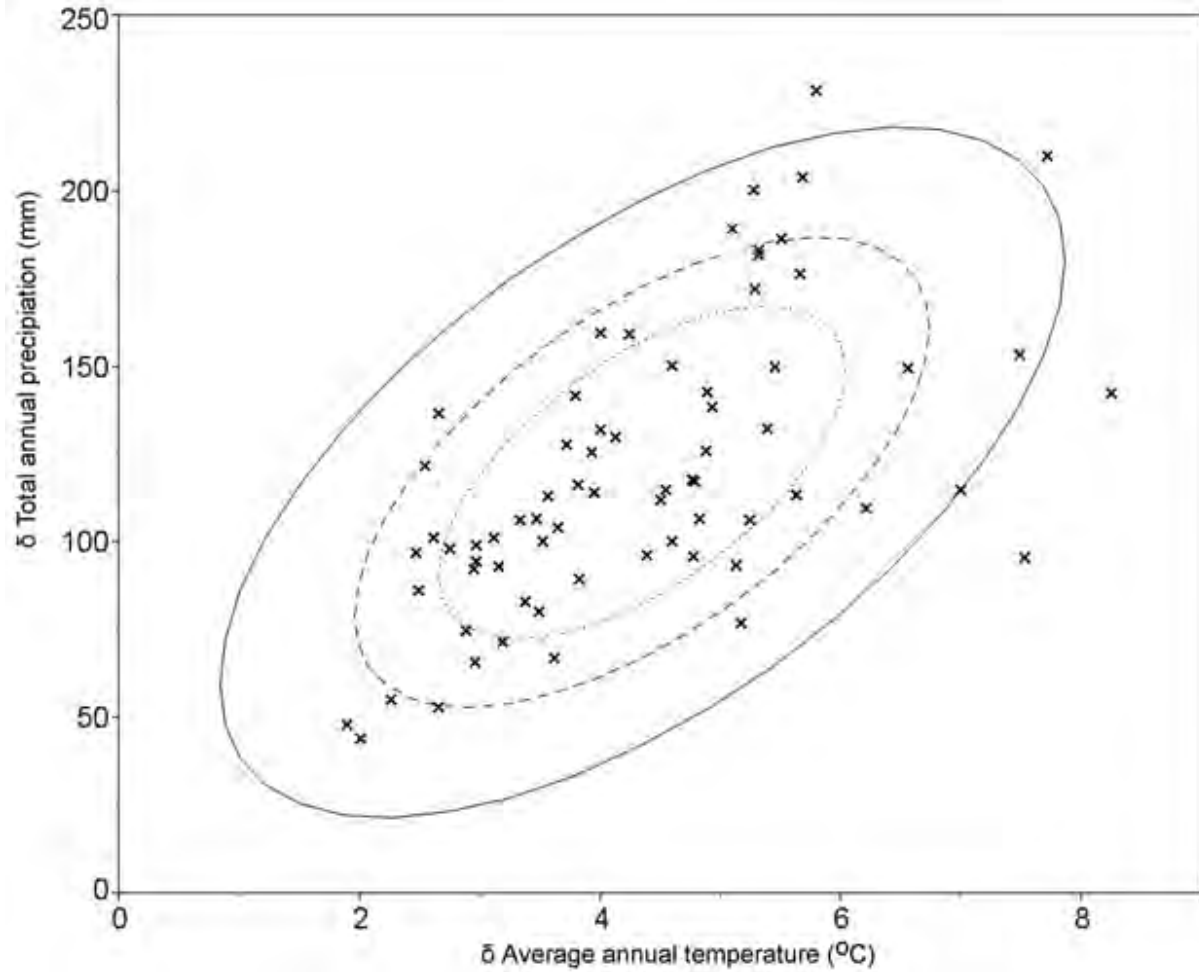


Figure 5.4. Changements de la température annuelle moyenne et des précipitations annuelles totales au Québec pour l'horizon 2080 selon 70 modèles globaux du climat. Les ellipses correspondent aux intervalles de confiances bivariées de 0.50, 0.75, et 0.90. Figure de Samson (2011).

5.4 Variables climatiques

Les variables climatiques choisies pour étudier l'impact des CC sur la biodiversité sont nombreuses et elles sont souvent le résultat d'un compromis entre la disponibilité des données et la pertinence des variables pour une étude donnée. Jason Samson a fait une courte méta-analyse des variables utilisées dans des études par enveloppes climatiques. Une requête sur le site internet « *Web of Science* » a été faite avec les mots clés « *climate envelope model** » entre septembre 2011 et septembre 2012. Cette requête a donné 26 articles étudiant l'impact des CC sur plus de 2000 espèces avec une échelle spatiale allant de régionale à globale. Les variables climatiques utilisées et les types d'organismes étudiés ont été prélevés de ces articles et les résultats se trouvent dans les tableaux 5.1 et 5.2. Quoique cette méta-analyse ne soit pas exhaustive, elle démontre quand même certaines tendances dans l'étude de l'impact des CC sur la biodiversité. Premièrement, les variables climatiques utilisées plus d'une fois sont, à l'exception de la durée de la saison de croissance et des degrés-jours de croissance, tous disponible sur le site WorldClim²⁵, un site offrant des données climatiques gratuites pour les écologistes et les modélisateurs en SIG. Ces variables climatiques sont parfois questionnables sur le plan de la climatologie. Par exemple, les précipitations totales du mois le plus pluvieux pourraient ne pas être comparable si le mois le plus pluvieux dans le futur est novembre alors que dans le présent c'est le mois de mai. Les variables utilisées une seule fois sont souvent plus pertinentes, comme la vitesse du vent pour des oiseaux de mer. Pour ce projet, nous avons utilisé des variables climatiques de trois types : des données moyennes, des données de dynamiques temporelles et de corrélations entre les variables climatiques.

²⁵ <http://www.worldclim.org/>

Table 5.1. Nombres d'articles utilisant différentes variables climatiques et les espèces modélisées selon une requête faite le 27 septembre 2012 sur le site internet « Web of Science » avec les mots clés « climate envelope model* » et une restriction de dates entre septembre 2011 et septembre 2012. Voir annexe 5.1 pour les articles cités.

Variables climatiques	# d'articles	Espèces modélisées
Précipitations annuelles	17	856 plantes, 701 plantes, 181 mammifères, 130 arbres, 94 oiseaux, 35 poissons, 27 arbres, 3 dendroctones, maringouin, chauve-souris, colibri, koala, tortue, eucalyptus, peuplier, ornithorynque, humain.
Température moyenne	12	701 plantes, 130 arbres, 94 oiseaux, 35 poissons, 27 arbres, 3 dendroctones, maringouin, tortue, eucalyptus, peuplier, humain, doryphore et pyrale.
Température minimale	9	856 plantes, 130 arbres, 94 oiseaux, 27 arbres, chauve-souris, colibri, tortue, ornithorynque, doryphore et pyrale.
Température maximale	7	130 arbres, 94 oiseaux, 27 arbres, colibri, tortue, ornithorynque, doryphore et pyrale.
Degré-jours de croissance	6	856 plantes, 701 plantes, 13 oiseaux de mer, colibri, peuplier, une plante rare.
Précipitations du trimestre le plus sec	4	181 mammifères, 3 dendroctones, maringouin, colibri.
Saisonnalité des précipitations	4	3 dendroctones, humain.
Toutes les variables de WorldClim	4	73 dytiques, 4 communautés végétales, gazelle, papillon.
Étendue des températures	3	701 plantes, 94 oiseaux, 35 poissons.
Précipitations du trimestre le plus chaud	3	130 arbres, 3 dendroctones, maringouin.
Température moyenne du mois le plus chaud	3	701 plantes, 7 arbres et arbustes, peuplier.
Durée de la saison de croissance	2	856 plantes, 701 plantes.
Précipitations du mois le plus pluvieux	2	94 oiseaux, 3 dendroctones.
Précipitations du trimestre le plus froid	2	130 arbres, maringouin.

Variables climatiques	# d'articles	Espèces modélisées
Précipitations du trimestre le plus pluvieux	2	3 dendroctones, colibri.
Précipitations durant l'été	2	27 arbres, eucalyptus.
Saisonnalité des températures	2	maringouin, chauve-souris.
Température moyenne du mois le plus froid	2	701 plantes, peuplier.
Température moyenne du trimestre le plus chaud	2	3 dendroctones, maringouin.
Température moyenne du trimestre le plus froid	2	181 mammifères, maringouin.

Table 5.2. Variables utilisées une seule fois dans les articles trouvés par une requête sur le site internet « Web of Science » avec les mots clés « climate envelope model* » et une restriction d'année de publication à 2011.

Variables bioclimatiques	Espèces modélisées
ACP sur variables WorldClim	Chrysomèle
Continentalité	Peuplier
Couverture nuageuse	701 plantes
Degré-jour de croissance durant l'été	856 plantes
Degré-jour sous 0°C en juillet	Plante rare
Durée des vagues de chaleur durant l'été	701 plantes
Durée des vagues de chaleur durant l'hiver	701 plantes
Étendue des températures diurnes	Humain
Humidité du sol	856 plantes
Humidité durant l'été	181 mammifères
Indice d'aridité	27 arbres
Indice de sécheresse annuel	Peuplier
Indice de sécheresse durant l'été	Peuplier
Intensité des précipitations	701 plantes
Jours avec des précipitations >1mm	701 plantes
Jours avec gelées de l'air	701 plantes
Jours avec gelées du sol	701 plantes
Jours consécutif avec précipitation	701 plantes
Jours sans gelées	Peuplier
Précipitations du mois le plus sec	94 oiseaux
Précipitations durant l'hiver	27 arbres
Précipitations maximales durant 5 jours consécutifs	701 plantes
Précipitations moyennes durant la saison de croissance	Peuplier
Radiation solaire	13 oiseaux de mer
Spécifique à chaque espèce basée sur 36 variables	63 arbres
Température maximale de l'été	Koala
Température moyenne de la surface de l'océan au printemps	13 oiseaux de mer

Variables bioclimatiques	Espèces modélisées
Température moyenne de l'été de l'année précédente	Plante rare
Température moyenne du trimestre le plus sec	181 mammifères
Vitesse du vent	13 oiseaux de mer

5.4.1 Variables climatiques moyennes

Les variables climatiques moyennes peuvent être catégorisées selon la période de l'année, le type de phénomènes (p.ex. précipitation, gel-dégel, sécheresse) et le type de statistiques (p.ex. moyenne, variabilité, accumulation). Pour la période de l'année, nous avons développé des variables pour la saison de croissance, de dormance ainsi que des variables annuelles, ce qui nous semble une stratégie biologiquement réaliste. Tel que mentionné précédemment, les variables mensuelles ou bien trimestrielles ne sont pas toujours pertinentes pour la biodiversité car les saisons de grande productivité primaire ne sont pas régulées par le calendrier mais par des facteurs abiotiques, et parfois biotiques. De plus, la saison de croissance est fortement reliée à plusieurs phénomènes phénologiques tel que la migration, la reproduction, ou le débourrage des feuilles. Les changements phénologiques représentent une des conséquences les plus facilement observables de l'impact des CC sur la biodiversité (Walther et al. 2002, Parmesan and Yohe 2003). En effet, les nombreuses et consistantes corrélations observées depuis les 30 dernières années entre le réchauffement climatique de l'hémisphère nord et les changements dans la phénologie, et ce, à tous les niveaux trophiques (IPCC 2007) suggèrent que les espèces vont être fortement perturbées par les CC anticipés dans les prochaines décennies. Les changements phénologiques des communautés végétales sont particulièrement importants compte tenu de l'influence des producteurs primaires sur les niveaux trophiques supérieurs. L'influence des CC sur la phénologie des communautés végétales a été démontrée tant par des expériences sur le terrain que par des analyses d'images satellitaires (White et al. 2005, Saino et al. 2011, Zhu et al. 2012).

Nous avons calculé plus de 75 variables moyennes et nous avons fait une analyse de corrélations entre ces variables afin de déterminer les variables qui n'étaient pas trop corrélées. En utilisant un seuil de corrélation de Pearson de 0,8, 22 variables furent sélectionnées et 53 furent exclues car trop corrélées. Le tableau 5.3 représente ces 22 variables ainsi que les variables de dynamiques temporelles et de corrélations entre les variables climatiques (voir ici-bas). Les variables moyennes sont décrites et représentées spatialement tant dans le passé récent que pour l'horizon 2050 dans les figures 5.5-5.26.

5.4.2 Variables de la dynamique temporelle du climat

La dynamique temporelle du climat est définie par des composantes linéaires, cycliques, saisonnières ainsi que la partie résiduelle qui n'est pas expliquée par les trois autres composantes. La composante linéaire représente les CC, soit une augmentation (ou une diminution) de manière constante dans le temps. La composante cyclique représente des cycles sur plus d'une année et, bien que nous ne puissions pas déterminer si les cycles observées correspondent aux cycles connus (p.ex. El Niño, La Niña ou l'oscillation nord-atlantique (Wyrтки

1973, Trenberth and Hurrell 1994, Hurrell 1995)), il est clair que ces cycles peuvent influencer fortement la biodiversité (Holmgren et al. 2001, Dulcic et al. 2004). Finalement, la composante saisonnière nous est familière et les résiduelles représentent ce qu'on ne comprend pas de la variabilité du climat.

Pour calculer les variables dynamiques du climat, nous avons utilisé un jeu de données climatiques mensuelles composé de trois MRCC (simulations aet, aev, agx) à 45km de résolution. La période pour le passé récent est de 1961-1990 et nous avons choisi l'horizon 2050 pour être consistant avec les données climatiques moyennes. Pour la décomposition de la dynamique temporelle, nous avons tout d'abord appliqué une régression linéaire sur les données pour vérifier s'il y a une tendance linéaire et en estimer son amplitude. Par la suite, nous avons enlevé la composante linéaire et utilisé une moyenne glissante centralisée pour détecter les composantes saisonnières et cycliques. Nous avons fait ces calculs pour la température moyenne mensuelle et les précipitations mensuelles totales et nous avons aussi évalué la variabilité de ces composantes en utilisant des coefficients de variations. Ces variables de la dynamique temporelle du climat sont représentées spatialement tant dans le passé récent que pour l'horizon 2050 dans les figures 5.27 à 5.40.

5.4.3 Corrélations entre les variables climatiques

La plupart des études sur l'impact des CC sur la biodiversité utilise des données de précipitations et de températures en assumant que l'influence de l'interaction de ces deux variables est constante dans le temps. Néanmoins, il est possible qu'une espèce soit parfaitement à l'aise lorsque les hivers sont humides et les été sont secs mais non l'inverse. Bien que la moyenne annuelle des précipitations et de la température soient identiques dans les deux situations, l'influence du climat sur les espèces peut être très différente selon les corrélations entre la température et les précipitations. Nous avons calculé le coefficient de corrélation entre la température mensuelle moyenne et les précipitations mensuelles totales (Figure 5.41).

Table 5.3. Variables climatiques utilisées pour évaluer la similarité du climat futur par rapport au climat récent. Le climat futur est défini comme étant la moyenne de l'horizon 2050, soit 2041-2070. Le climat récent est défini comme étant la moyenne de 1961-2000. Les variables sont décrites dans la légende de leur figure.

Type de variables climatiques	Type de statistiques	Période de l'année	Variable	Unité	Figure
Degré-jour	Moyenne	Saison de croissance	Degré-jours de croissance au-dessus de 0°C durant la saison de croissance	Degré -Jour	5.5
Extrême	Moyenne	Annuelle	Degré-jours sous -30°C	Degré -Jour	5.6
Extrême	Moyenne	Annuelle	Degré-jours au-dessus de 20°C	Degré -Jour	5.7
Extrême	Moyenne	Annuelle	Durée des périodes sous -30°C	Jour	5.8
Extrême	Moyenne	Annuelle	Durée des périodes au-dessus de 20°C	Jour	5.9
Extrême	Moyenne	Annuelle	Fréquence annuelle des périodes sous -30°C		5.10
Extrême	Moyenne	Annuelle	Fréquence annuelle des périodes au-dessus de 20°C		5.11
Gel-Dégel	Moyenne	Annuelle	Jours dans l'année avec un événement de gel et dégel	Jour	5.12
Gel-Dégel	Moyenne	Saison de dormance	Jours dans la saison de dormance avec un événement de gel et dégel	Jour	5.13
Endurcissement	Moyenne	Annuelle	Période d'endurcissement	Degré -Jour	5.14
Phénologie	Moyenne	Saison de croissance	Durée de la saison de croissance	Jour	5.15

Type de variables climatiques	Type de statistiques	Période de l'année	Variable	Unité	Figure
Précipitation	Moyenne	Annuelle	Précipitations quotidiennes moyennes	mm/Jour	5.16
Précipitation	Variabilité	Annuelle	Saisonnalité des précipitations mensuelles moyennes		5.17
Précipitation	Moyenne	Annuelle	Durée moyenne des moments où il y a au moins 7 jours sans précipitation	Jour	5.18
Précipitation	Moyenne	Annuelle	Fréquence annuelle des moments où il y a au moins 7 jours sans précipitation	NA	5.19
Température	Moyenne	Saison de dormance	Température moyenne durant la saison de dormance	mm/Jour	5.20
Température	Variabilité	Annuelle	Saisonnalité de la température mensuelle moyenne		5.21
Température	Moyenne	Annuelle	Température moyenne annuelle	°C	5.22
Température	Moyenne	Saison de dormance	Température minimale durant la saison de dormance	°C	5.23
Température	Moyenne	Saison de croissance	Température moyenne durant la saison de croissance	°C	5.24
Précipitation	Variabilité	Annuelle	Écart-type des précipitations annuelles totales	mm	5.25
Température	Variabilité	Annuelle	Écart-type de la température moyenne annuelle	°C	5.26
Température	Dynamique temporelle	Mensuelle	Portion linéaire de la dynamique de la température moyenne mensuelle		5.27

Type de variables climatiques	Type de statistiques	Période de l'année	Variable	Unité	Figure
Température	Dynamique temporelle	Mensuelle	Portion saisonnière de la dynamique de la température moyenne mensuelle		5.28
Température	Dynamique temporelle	Mensuelle	Portion cyclique de la dynamique de la température moyenne mensuelle		5.29
Température	Dynamique temporelle	Mensuelle	Portion résiduelle de la dynamique de la température moyenne mensuelle		5.30
Température	Variabilité dans la dynamique temporelle	Mensuelle	Coefficient de variation de la portion linéaire de la dynamique de la température moyenne mensuelle		5.31
Température	Variabilité dans la dynamique temporelle	Mensuelle	Coefficient de variation de la portion saisonnière de la dynamique de la température moyenne mensuelle		5.32
Température	Variabilité dans la dynamique temporelle	Mensuelle	Coefficient de variation de la portion cyclique de la dynamique de la température moyenne mensuelle		5.33
Précipitation	Dynamique temporelle	Mensuelle	Portion linéaire de la dynamique des précipitations mensuelles totales		5.34
Précipitation	Dynamique temporelle	Mensuelle	Portion saisonnière de la dynamique des précipitations mensuelles totales		5.35
Précipitation	Dynamique temporelle	Mensuelle	Portion cyclique de la dynamique des précipitations mensuelles totales		5.36
Précipitation	Dynamique temporelle	Mensuelle	Portion résiduelle de la dynamique des précipitations mensuelles totales		5.37

Type de variables climatiques	Type de statistiques	Période de l'année	Variable	Unité	Figure
Précipitation	Variabilité dans la dynamique temporelle	Mensuelle	Coefficient de variation de la portion linéaire de la dynamique des précipitations mensuelles totales		5.38
Précipitation	Variabilité dans la dynamique temporelle	Mensuelle	Coefficient de variation de la portion saisonnière de la dynamique des précipitations mensuelles totales		5.39
Précipitation	Variabilité dans la dynamique temporelle	Mensuelle	Coefficient de variation de la portion cyclique de la dynamique des précipitations mensuelles totales		5.40
Précipitation et température	Corrélation	Mensuelle	Coefficient de corrélation entre la température moyenne mensuelle et les précipitations totales mensuelles		5.41

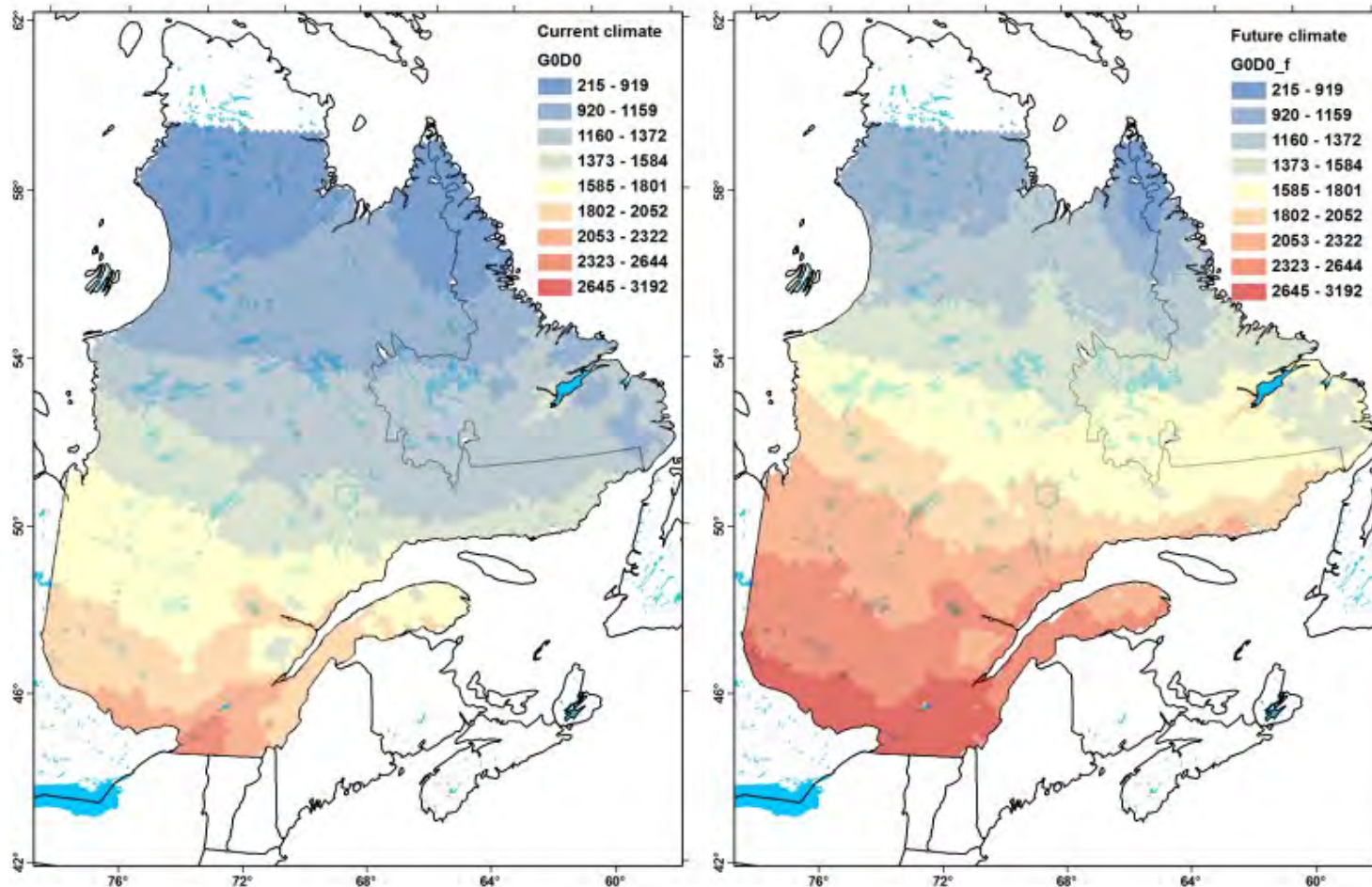


Figure 5.5. Degré-jours de croissance au-dessus de 0°C durant la saison de croissance (degré-jours). Les degré-jours sont calculées en additionnant le nombre de degrés au-dessus de 0°C pour chaque jour de la saison de croissance. La saison de croissance débute le premier jour d'une séquence de 5 jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne supérieure à 0°C et se termine le dernier jour d'une séquence de 5 jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne inférieure à 0°C. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

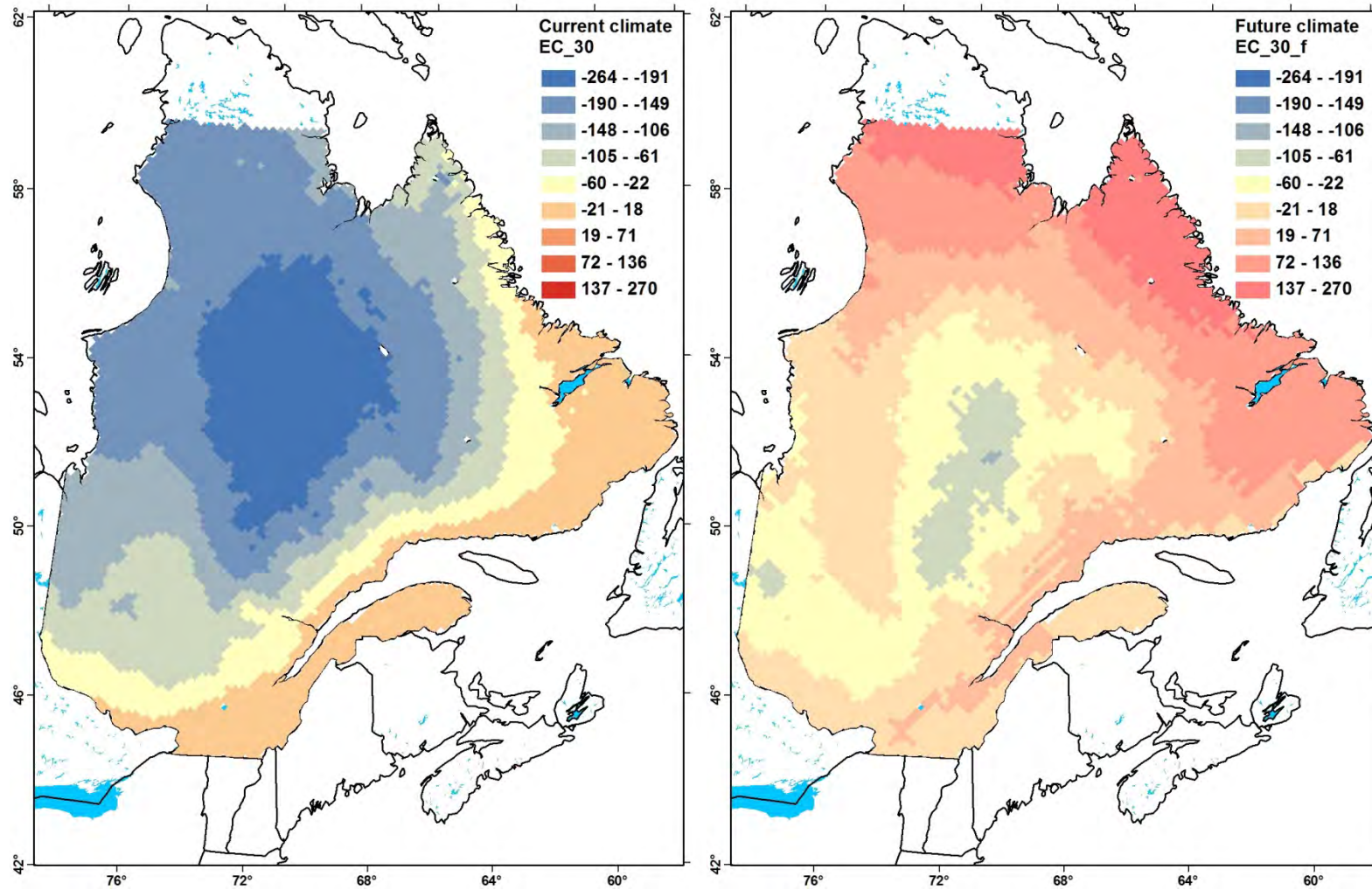


Figure 5.6. Degré-jours au-dessous de -30°C (degré-jours). Cette variable est calculée en additionnant le nombre de degrés au-dessous de -30°C pour la température minimale quotidienne durant tous les jours de l'année. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

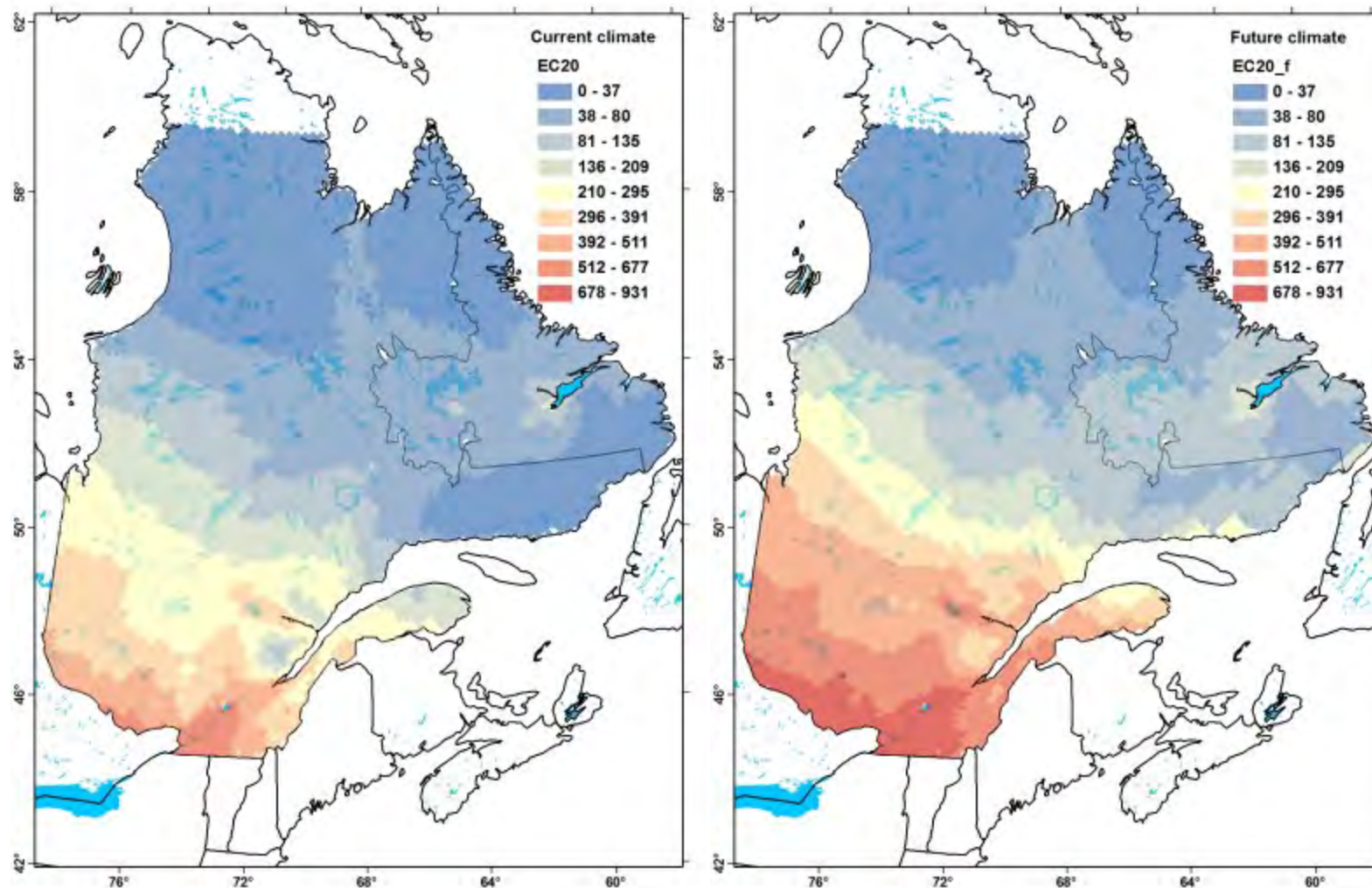


Figure 5.7. Degré-jours au-dessus de 20°C (degré-jours). Cette variable est calculée en additionnant le nombre de degrés au-dessus de 20°C pour la température maximale quotidienne durant tous les jours de l'année. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

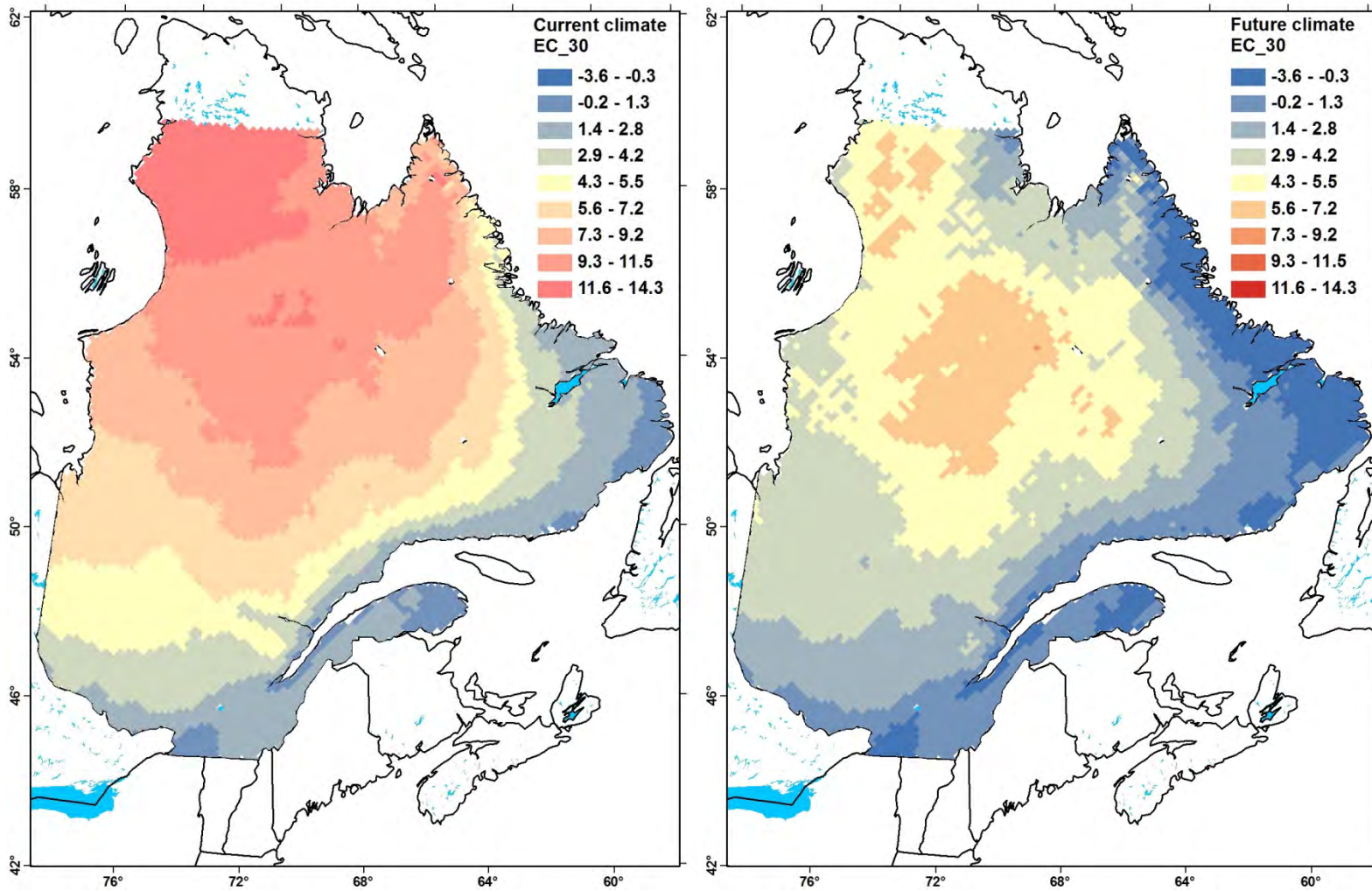


Figure 5.8. Durée moyenne des périodes au-dessous de -30°C . La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

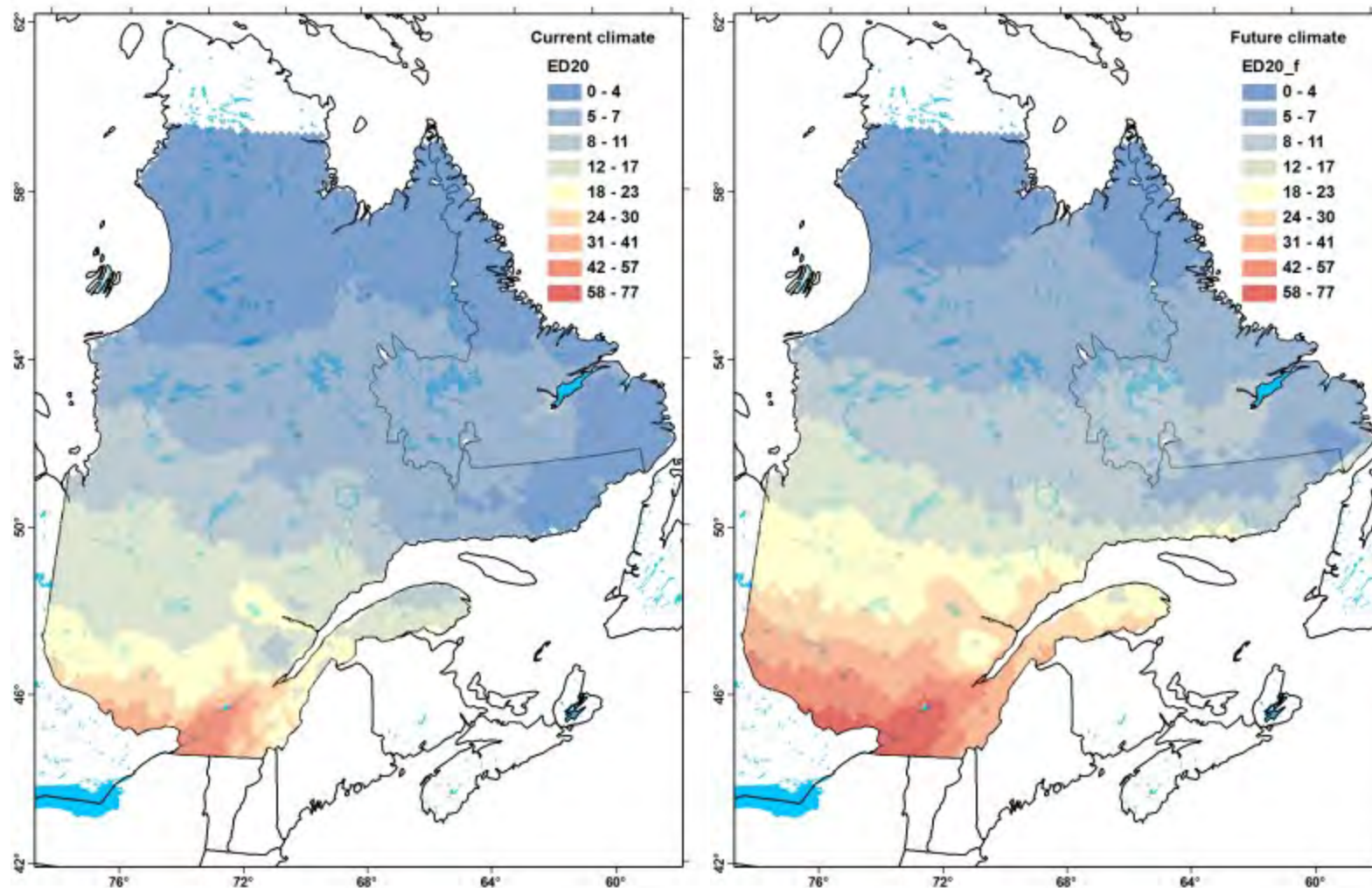


Figure 5.9. Durée moyenne des périodes au-dessus de 20°C. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

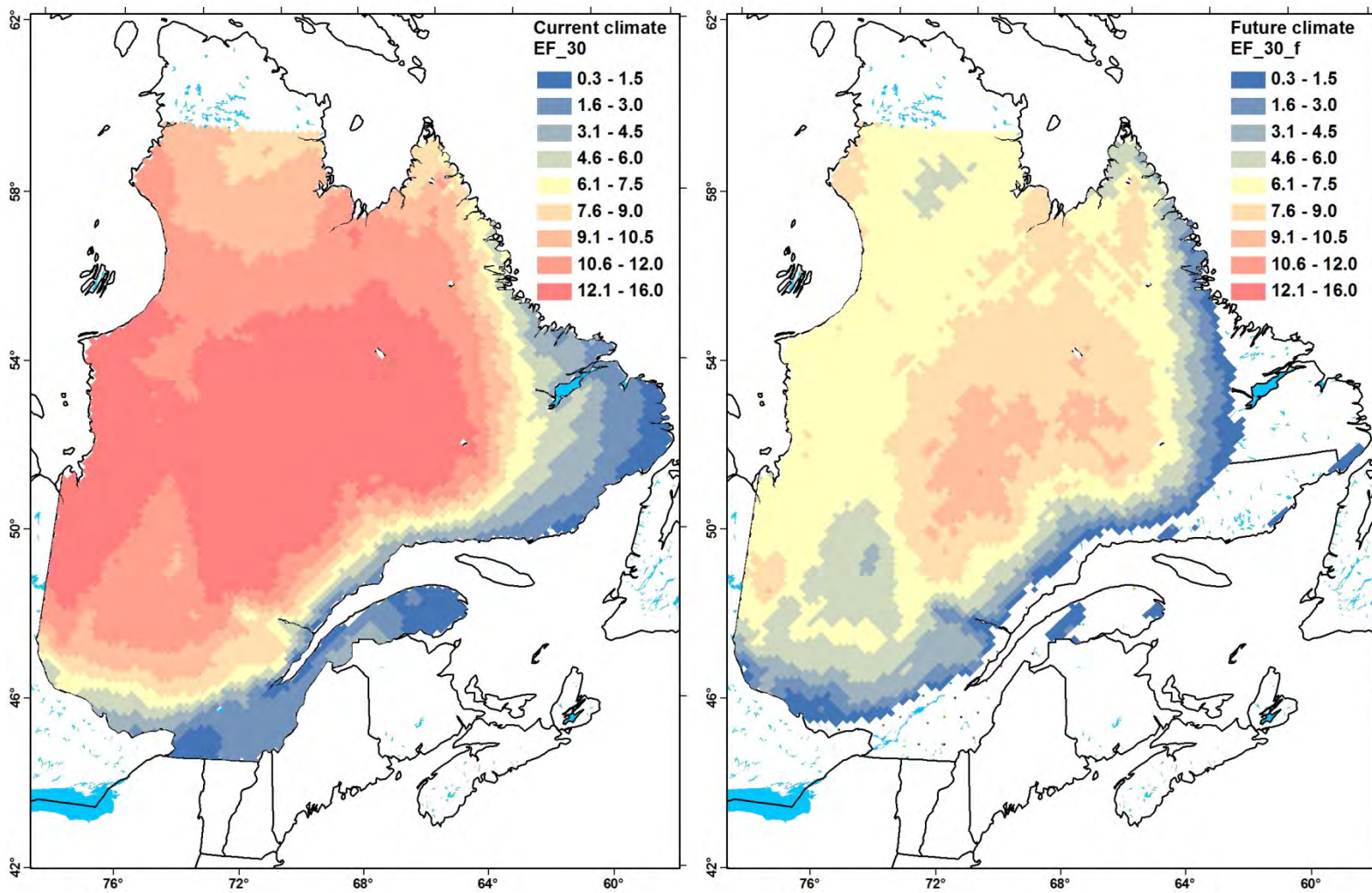


Figure 5.10. Fréquence annuelle des périodes au-dessous de -30°C . Cette variable est basée sur le nombre de fois dans l'année où la température minimale quotidienne a été au-dessous de -30°C . La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

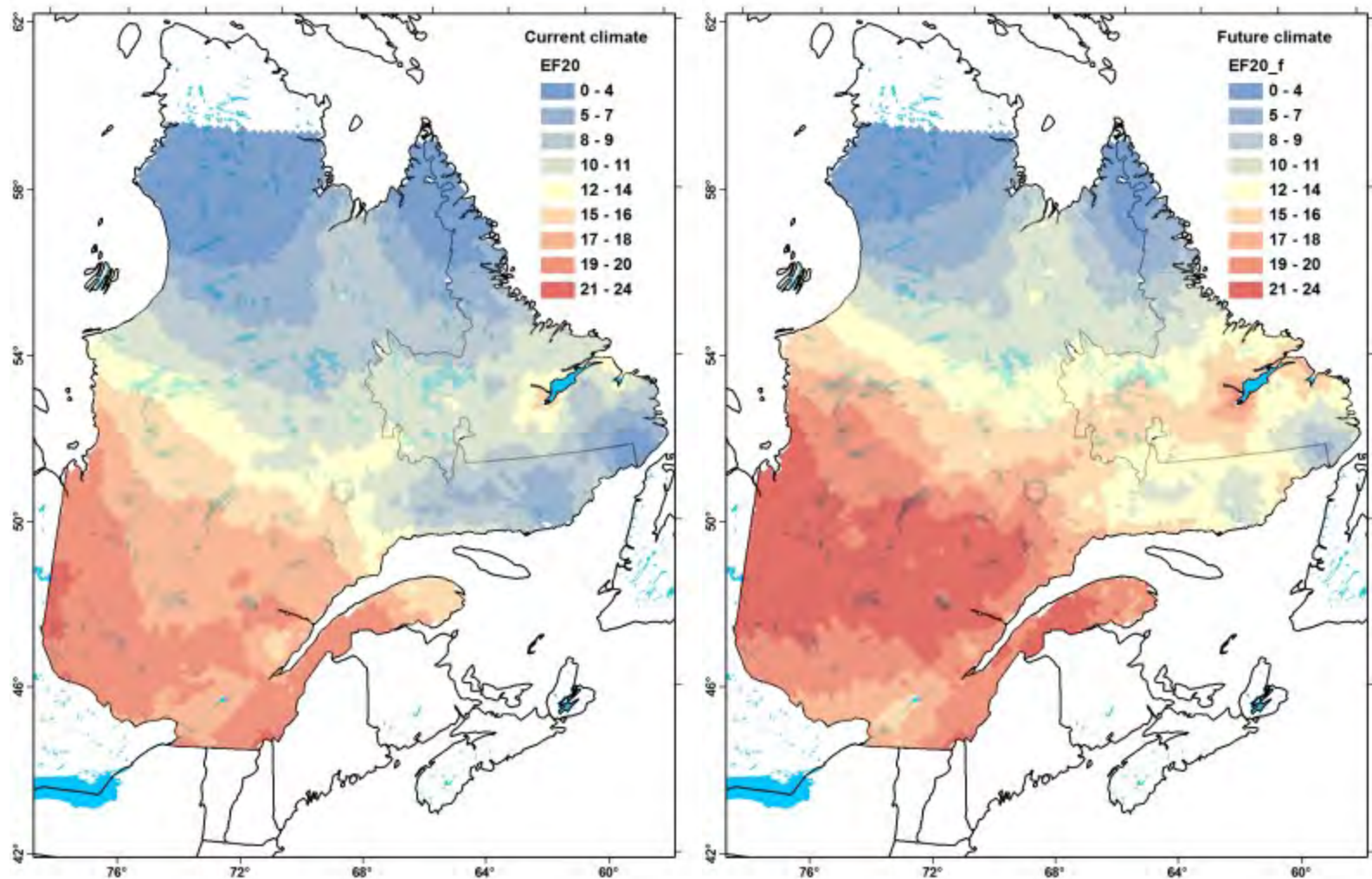


Figure 5.11. Fréquence annuelle des périodes au-dessus de 20°C. Cette variable est basée sur le nombre de fois dans l'année où la température maximale quotidienne a été au-dessus de 20°C. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

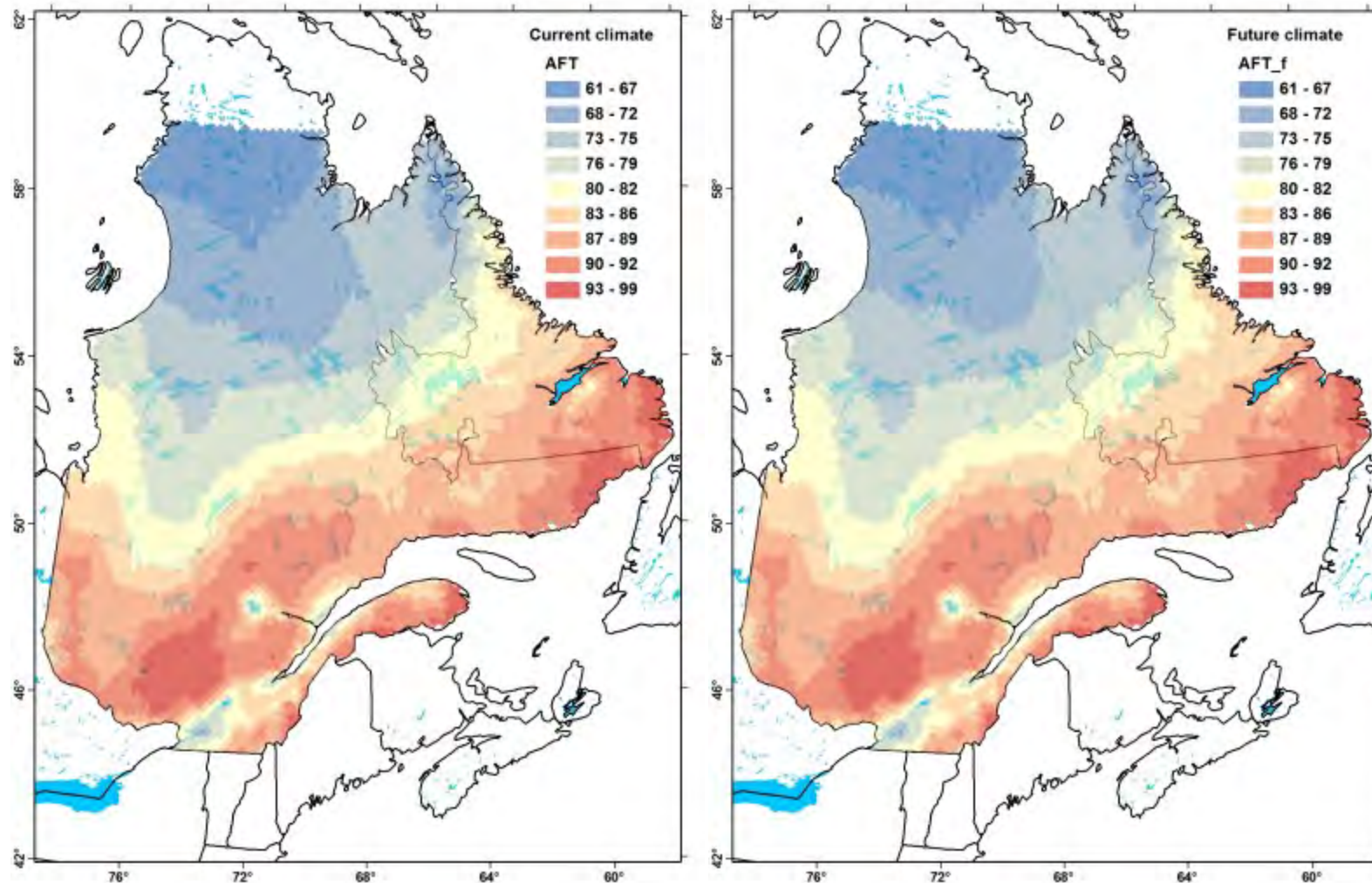


Figure 5.12. Jours dans l'année avec un événement de gel et dégel. Cette variable est basée sur le nombre de fois dans l'année où la température maximale quotidienne est au-dessus de 0°C et que la température minimale quotidienne est au-dessous de 0°C. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

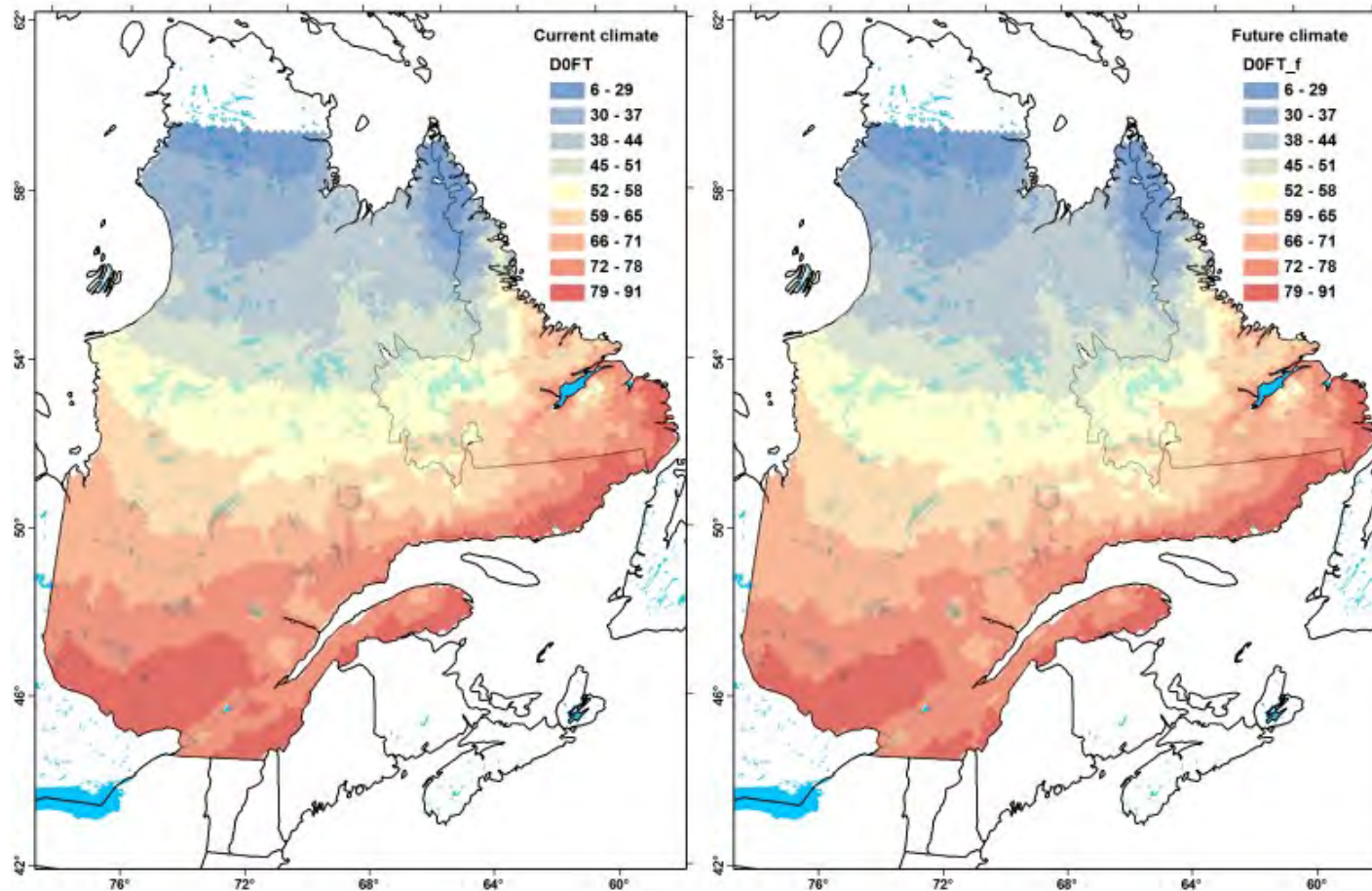


Figure 5.13. Jours dans la saison de dormance avec un événement de gel et dégel. Cette variable est basée sur le nombre de fois dans la saison de dormance où la température maximale quotidienne est au-dessus de 0°C et que la température minimale quotidienne est au-dessous de 0°C. La saison de dormance débute le dernier jour d'une séquence de 5 jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne inférieure à 0°C et se termine le premier jour d'une séquence de 5 jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne supérieure à 0°C. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

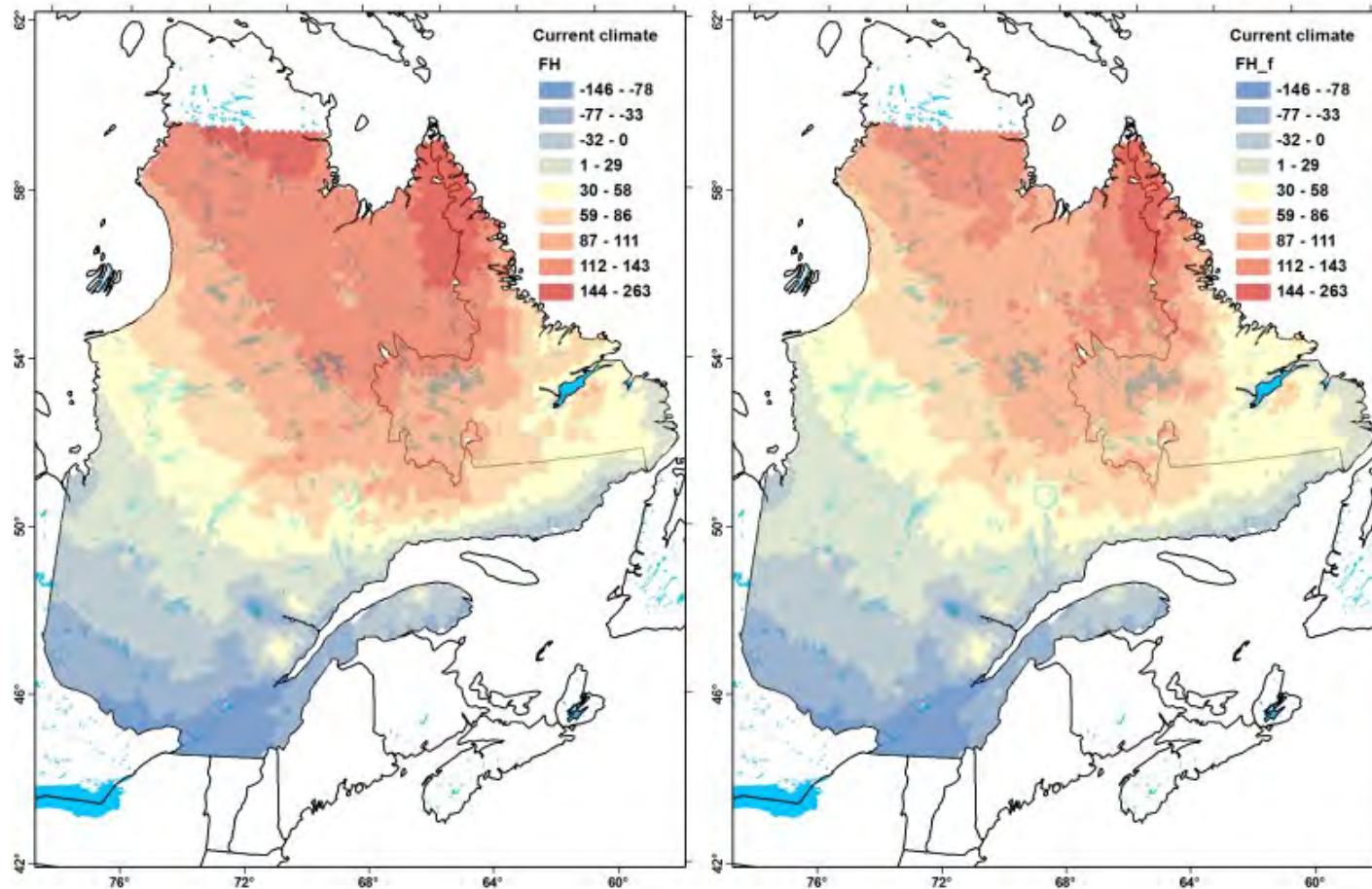


Figure 5.14. Période d'endurcissement. L'endurcissement des plantes est un processus d'acclimatation de végétaux au froid déclenché par la baisse de la température à la fin de la saison de croissance, la méthode pour calculer cet indice est disponible dans un document d'Ouranos²⁶. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

²⁶ http://www.ouranos.ca/media/publication/271_RapportRapaic2013red.pdf

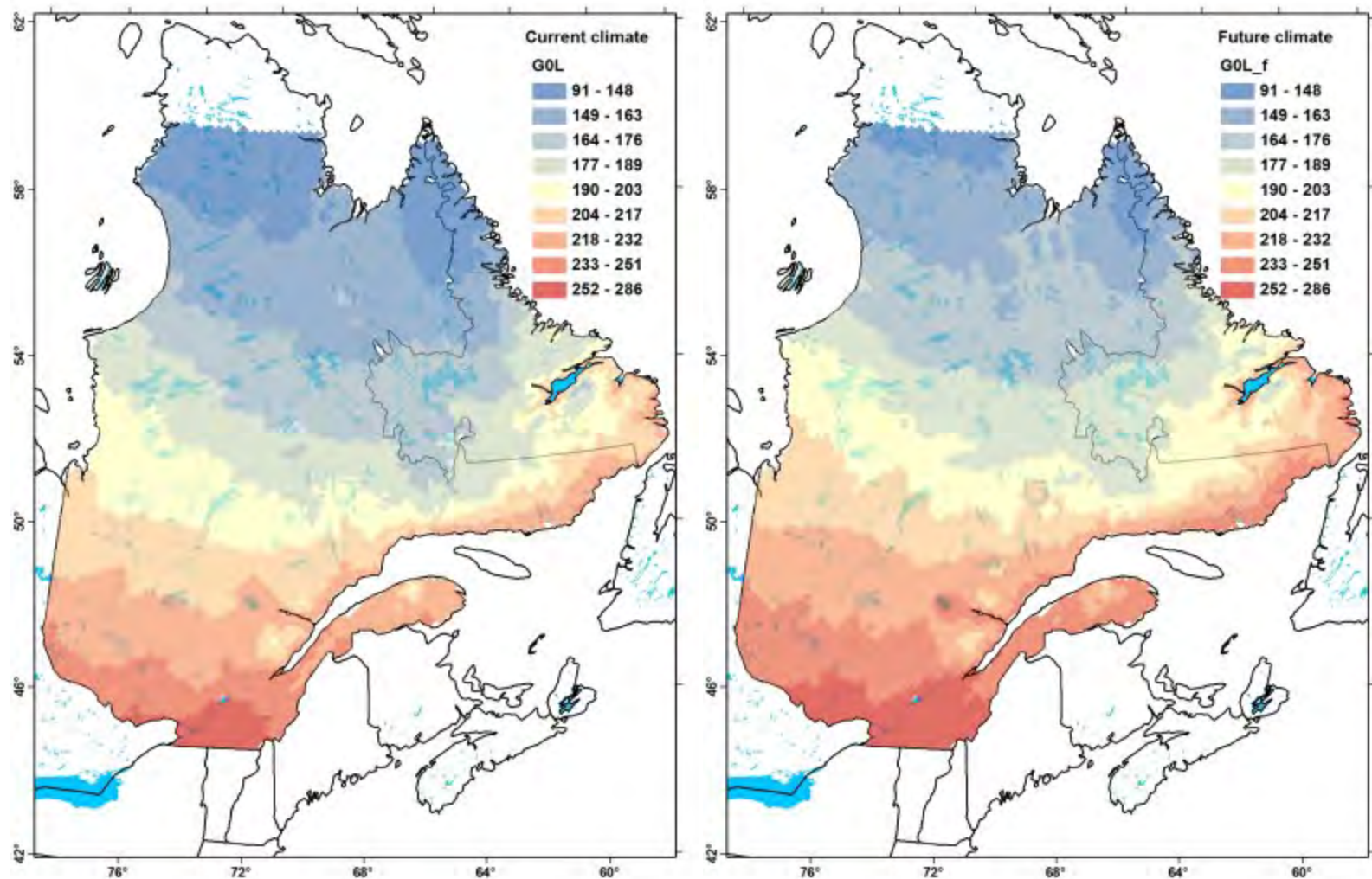


Figure 5.15. Durée de la saison de croissance. La saison de croissance débute le premier jour d'une séquence de 5 jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne supérieure à 0°C et se termine le dernier jour d'une séquence de 5 jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne inférieure à 0°C. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

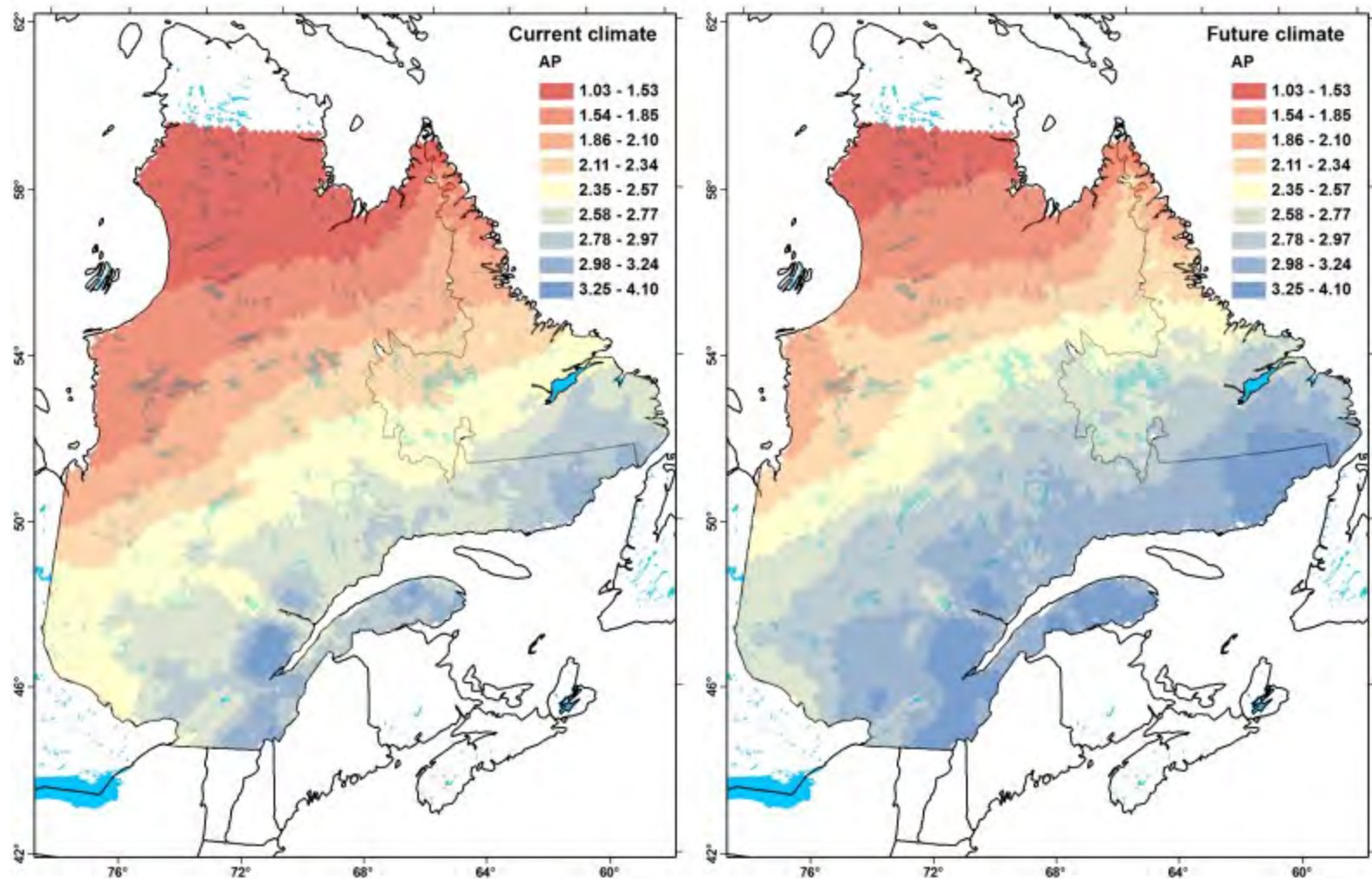


Figure 5.16. Précipitations moyennes quotidiennes (mm/jour). La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

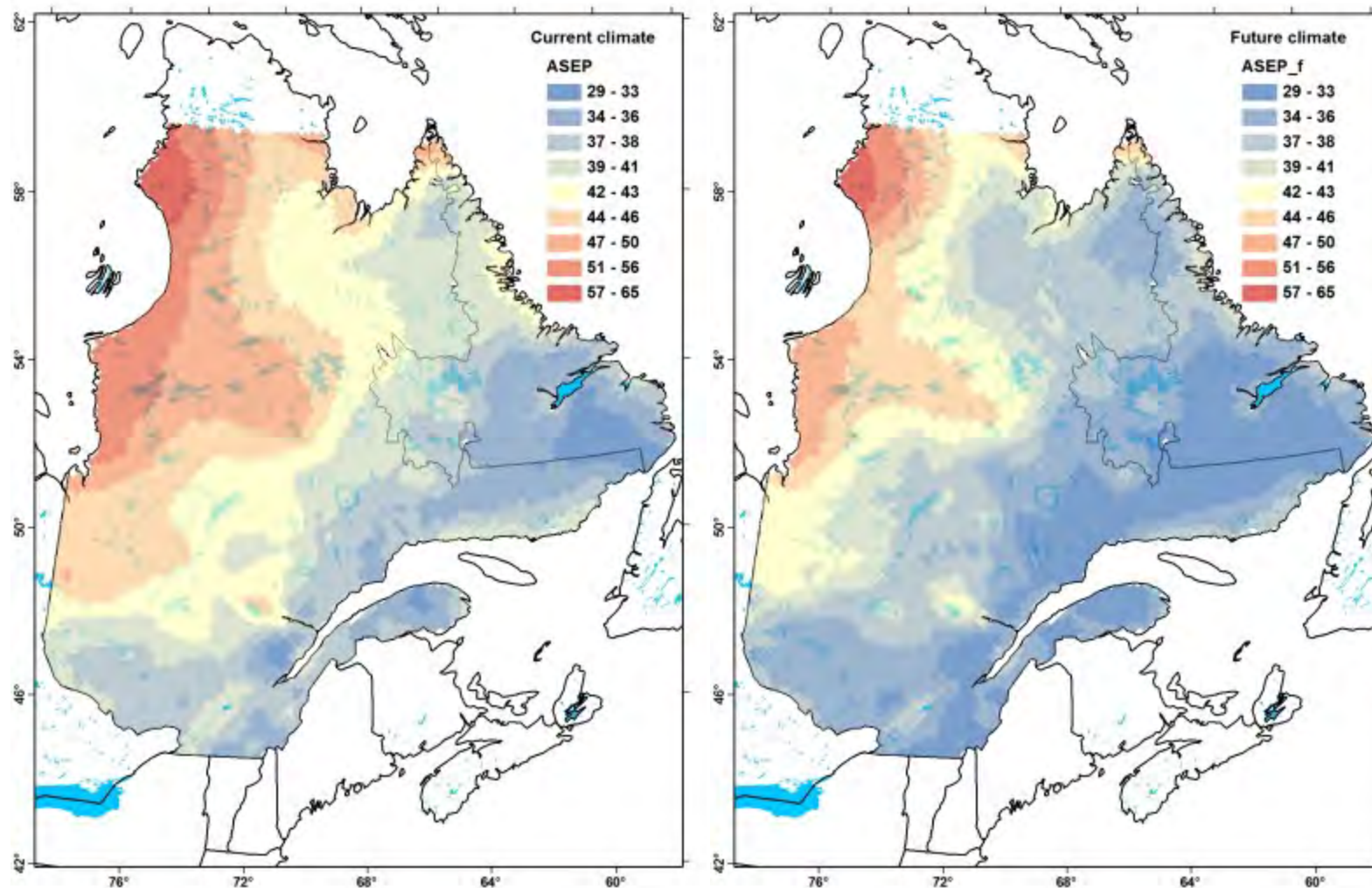


Figure 5.17. Saisonnalité des précipitations mensuelles moyennes. Cette variable représente le coefficient de variation des précipitations mensuelles moyennes en pourcentage. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

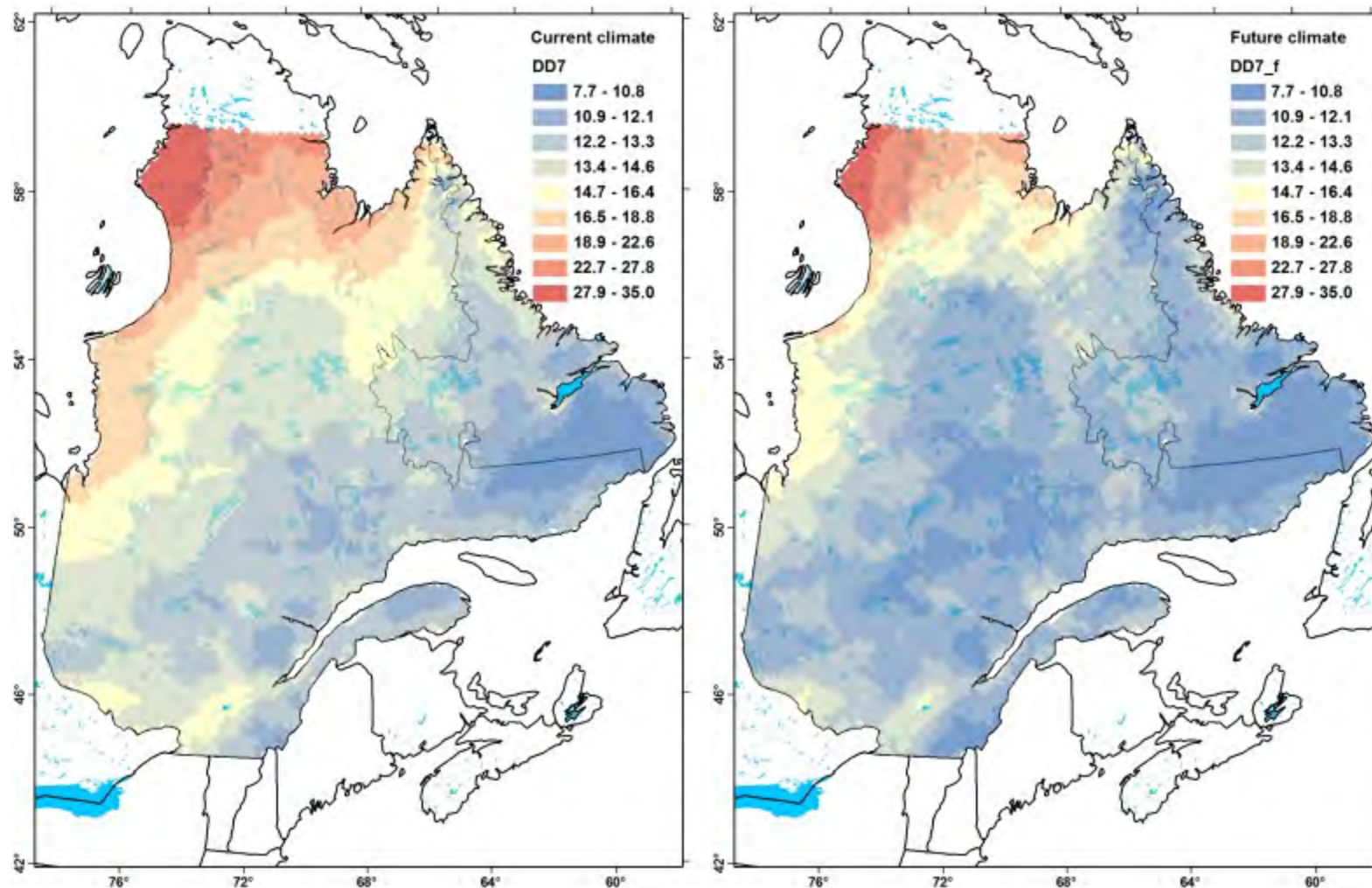


Figure 5.18. Durée moyenne des moments où il y a au moins 7 jours sans précipitation (jour) basée sur un seuil de précipitations quotidiennes de moins de 1mm. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

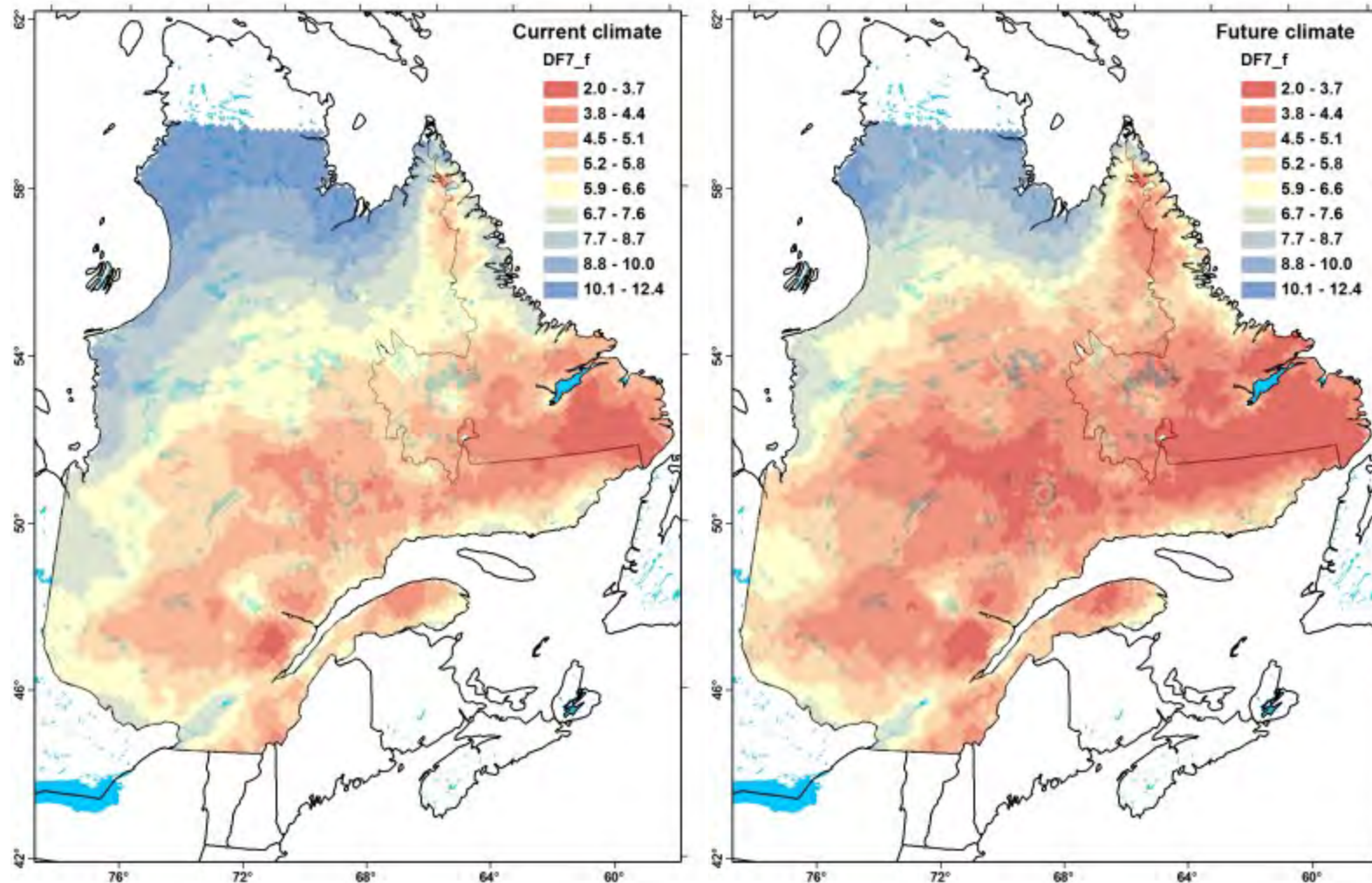


Figure 5.19. Fréquence annuelle des moments où il y a au moins 7 jours sans précipitation basée sur un seuil de précipitations quotidiennes de moins de 1mm. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

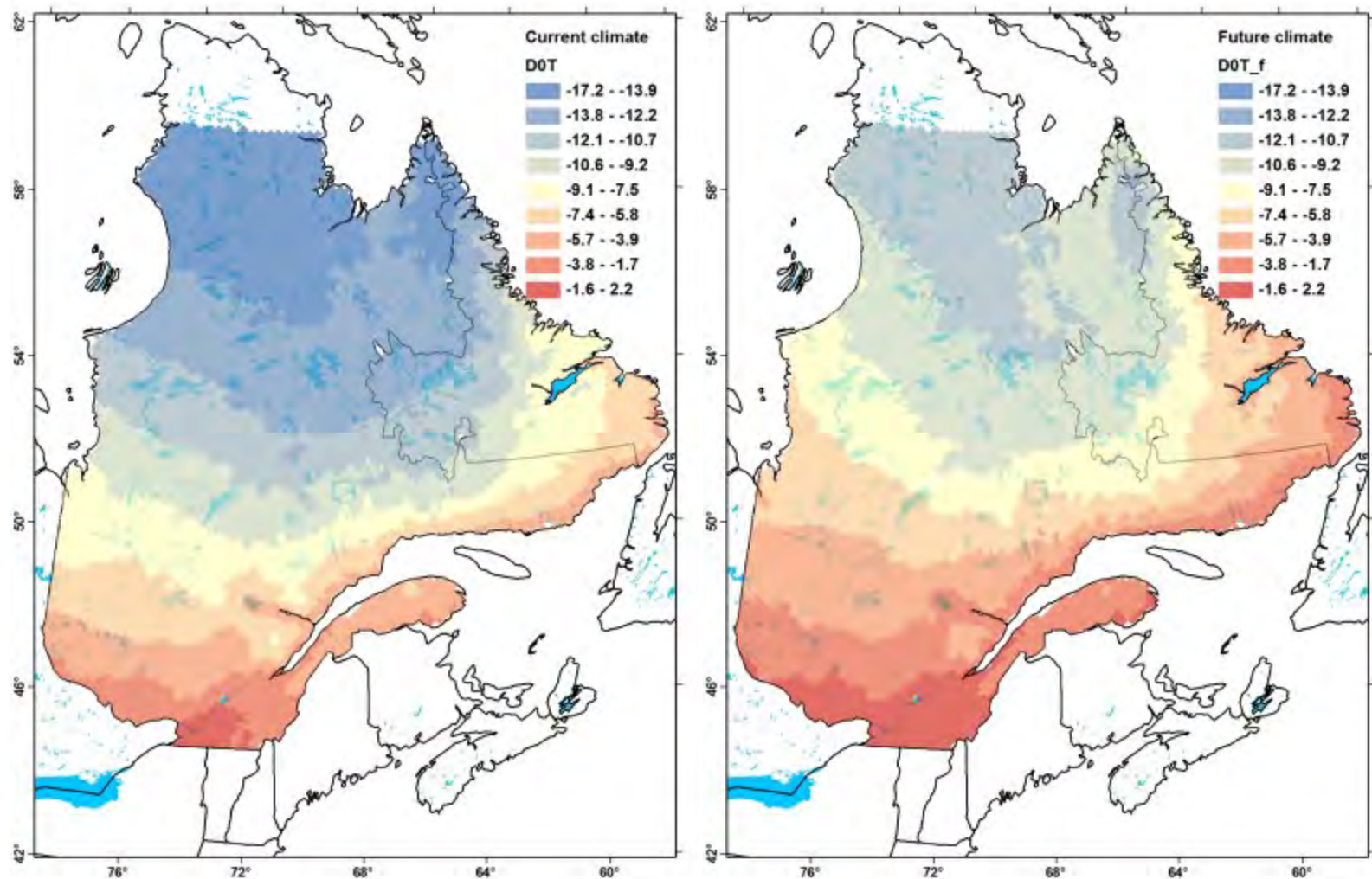


Figure 5.20. Température annuelle moyenne durant la saison de dormance (°C). La saison de dormance débute le dernier jour d’une séquence de 5 jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne inférieure à 0°C et se termine le premier jour d’une séquence de 5 jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne supérieure à 0°C. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

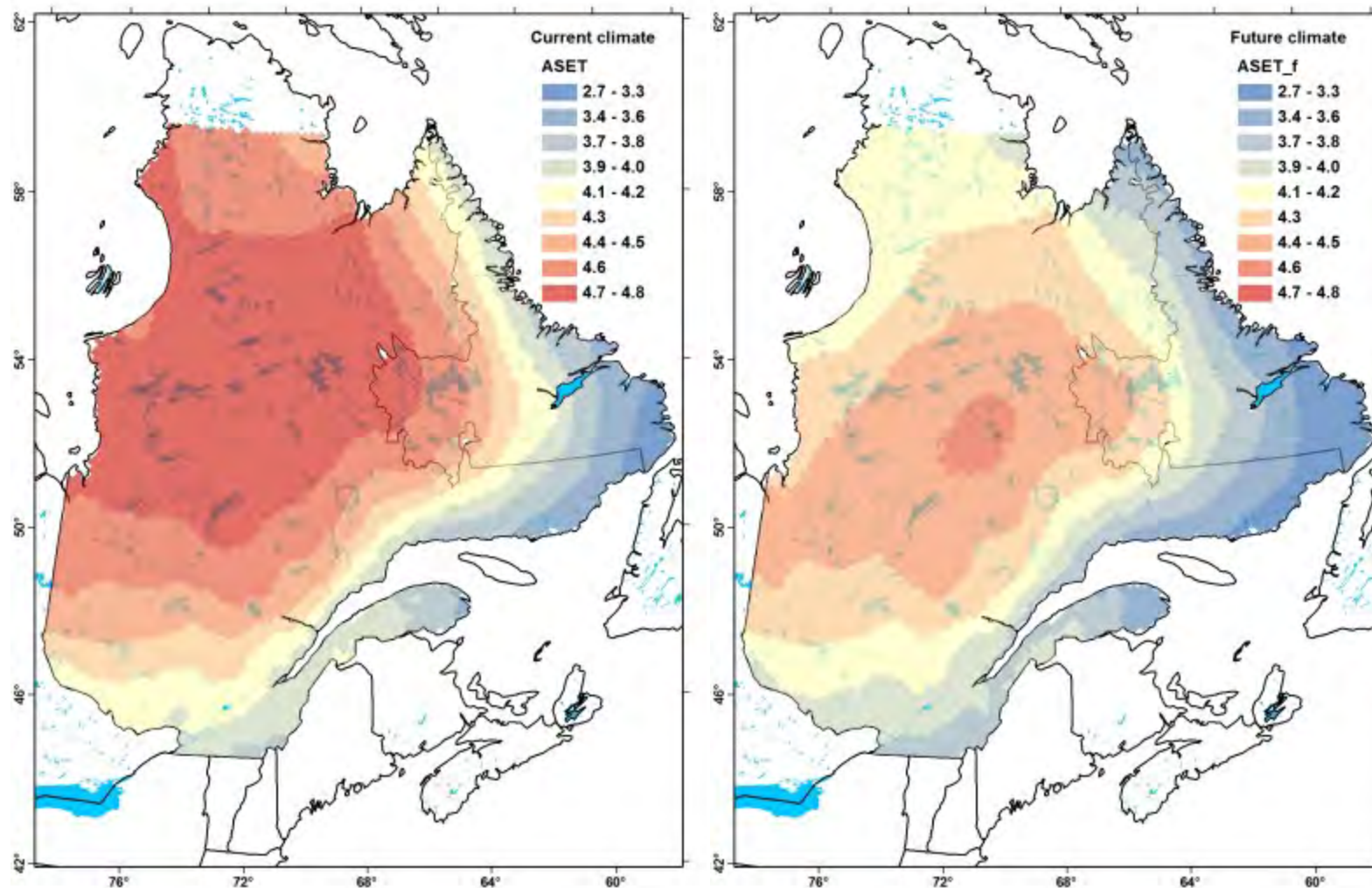


Figure 5.21. Saisonnalité de la température mensuelle moyenne. Cette variable représente le coefficient de variation de la température mensuelle moyenne en pourcentage. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

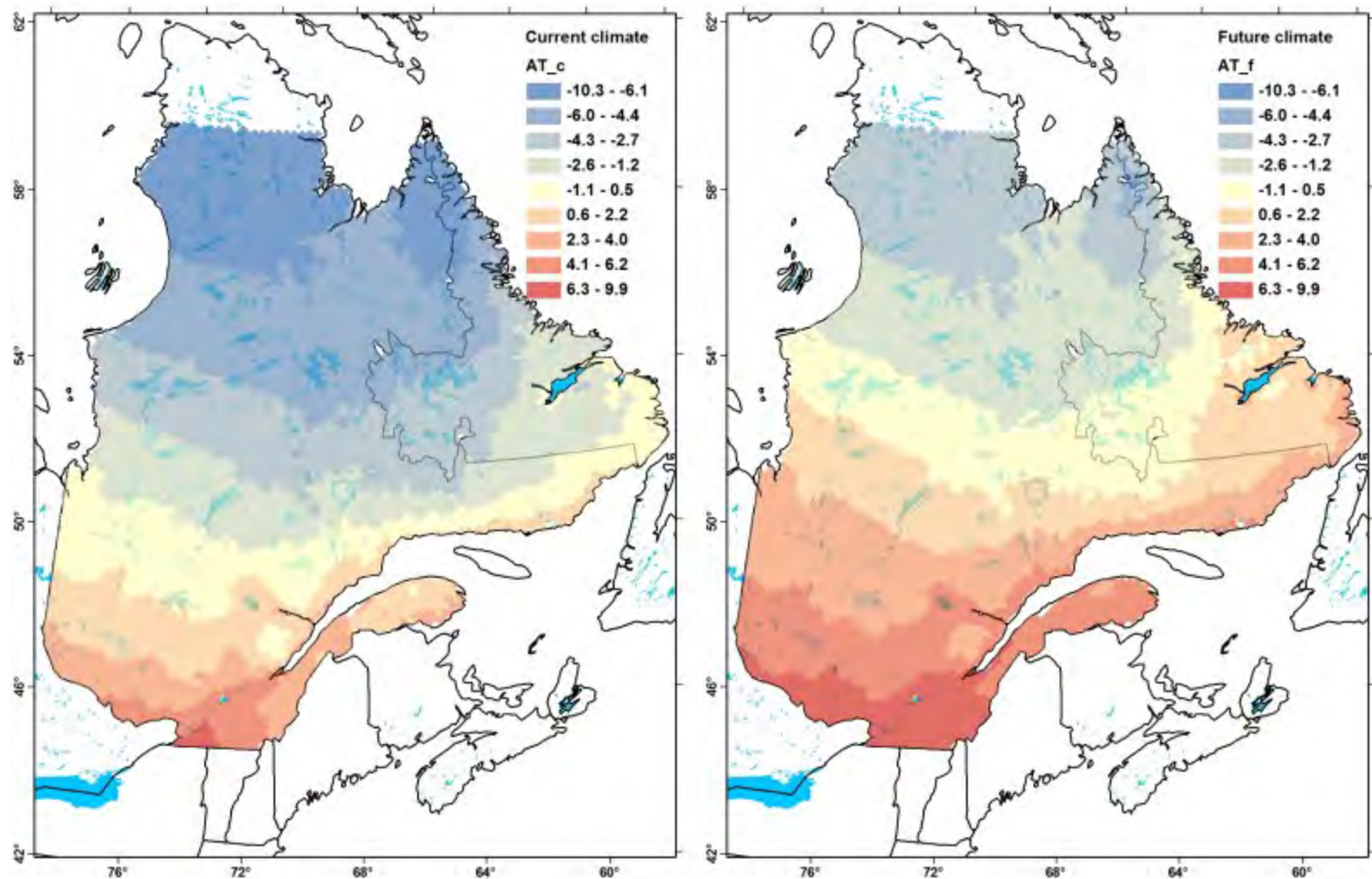


Figure 5.22. Température moyenne annuelle (°C). La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

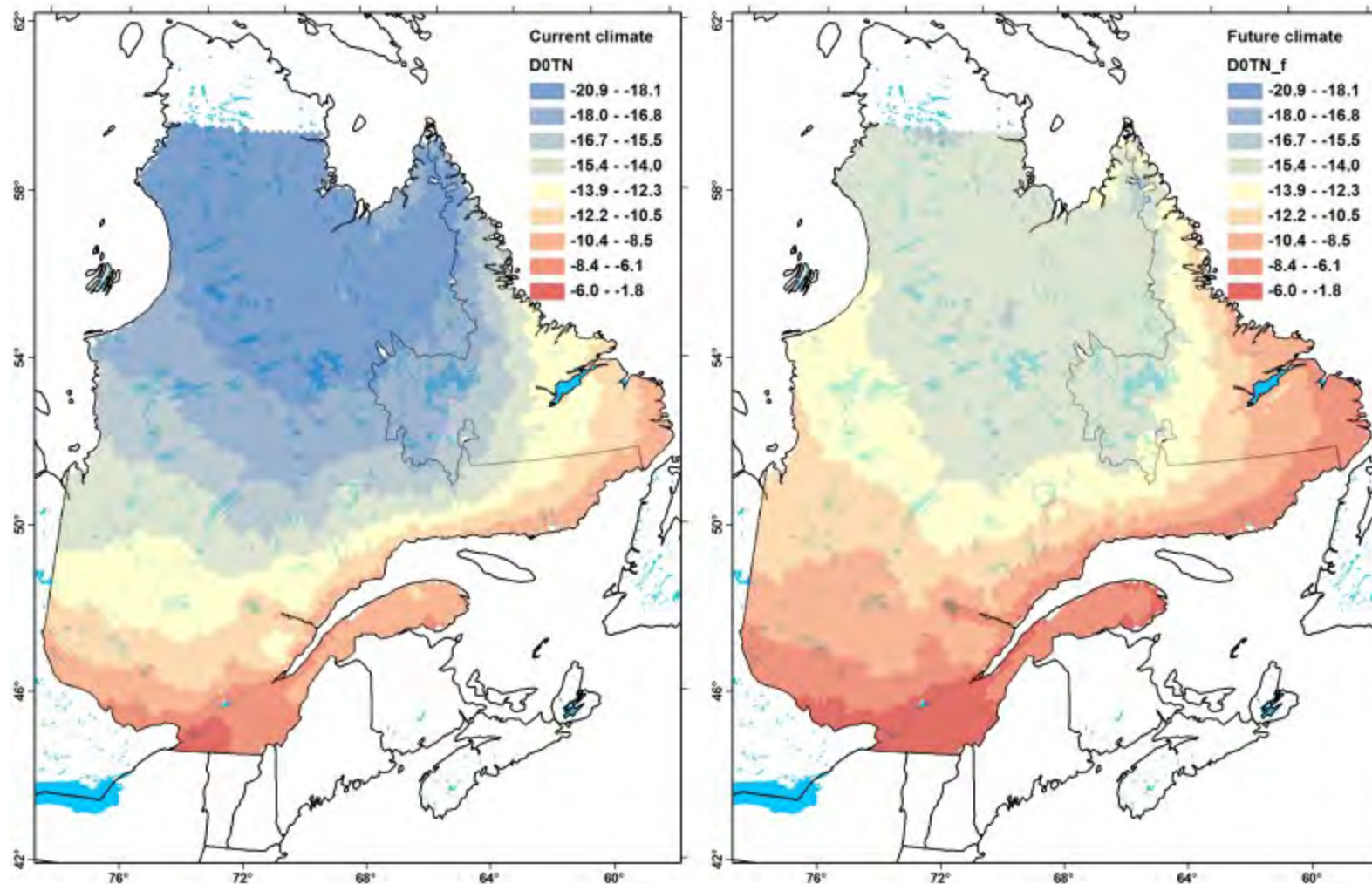


Figure 5.23. Température minimale durant la saison de dormance (°C). La saison de dormance débute le dernier jour d’une séquence de 5 jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne inférieure à 0°C et se termine le premier jour d’une séquence de 5 jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne supérieure à 0°C. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

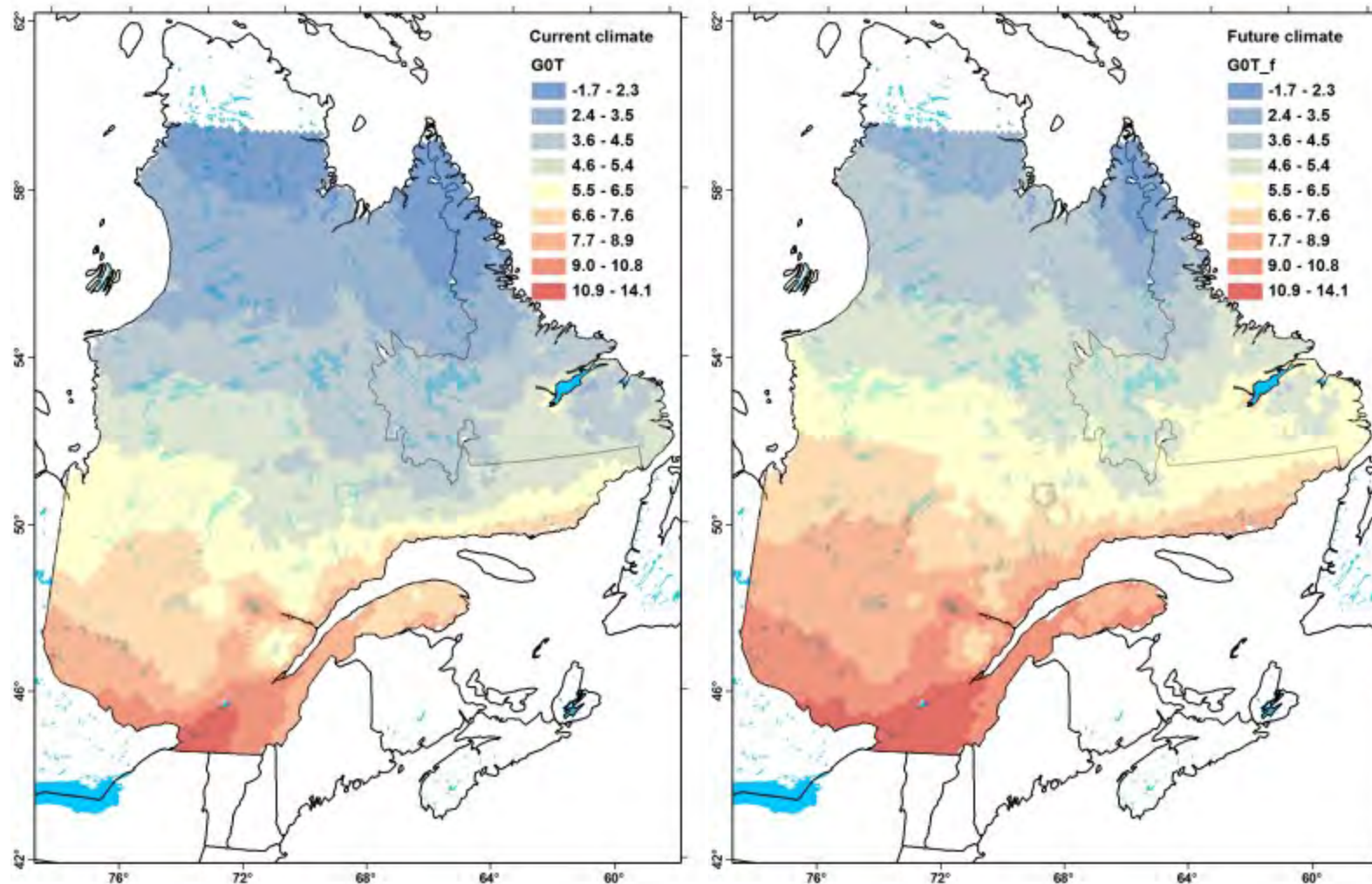


Figure 5.24. Température moyenne durant la saison de croissance (°C). La saison de croissance débute le premier jour d'une séquence de 5 jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne supérieure à 0°C et se termine le dernier jour d'une séquence de 5 jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne inférieure à 0°C. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

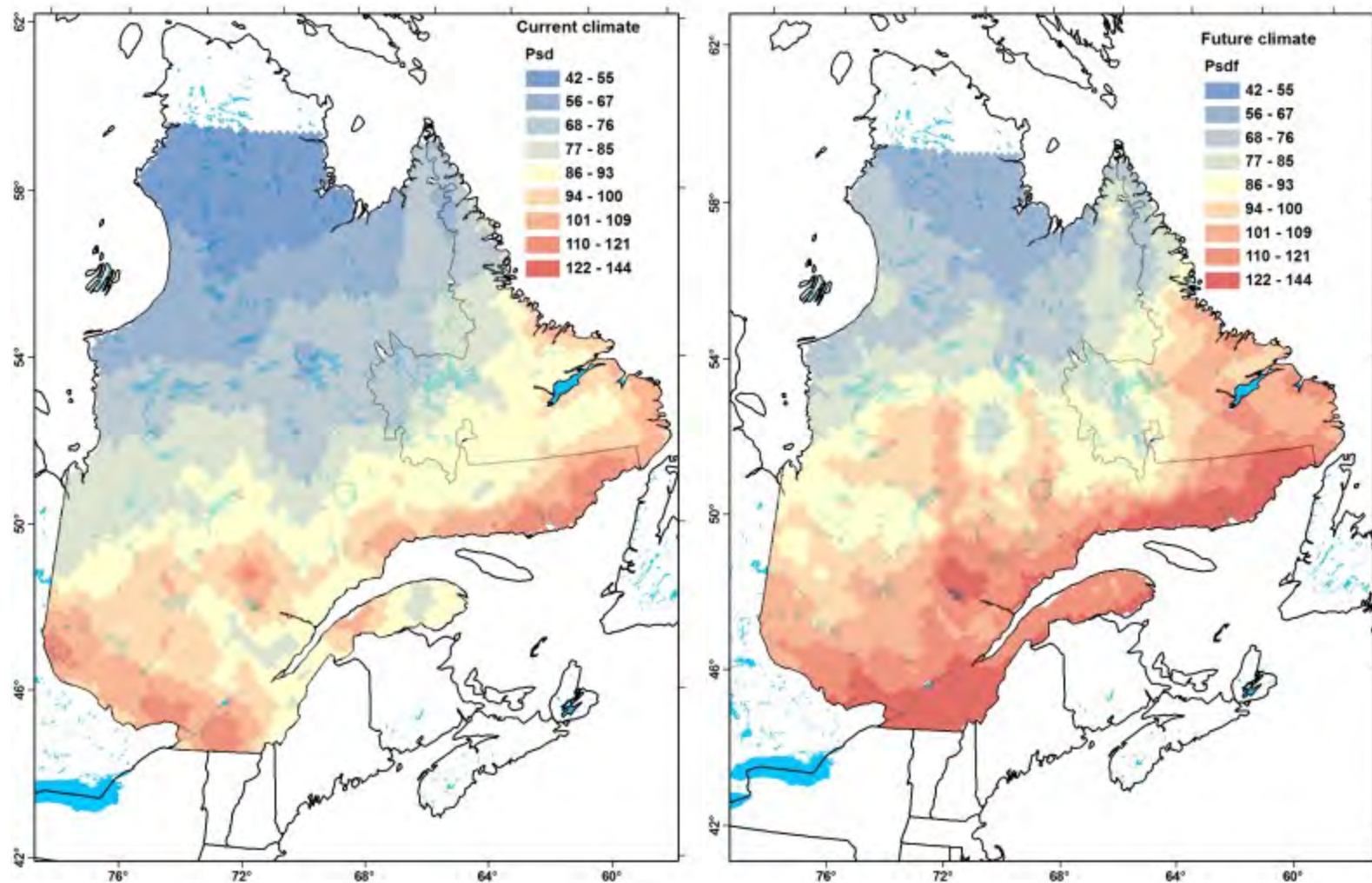


Figure 5.25. Écart-type des précipitations annuelles totales (mm). La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

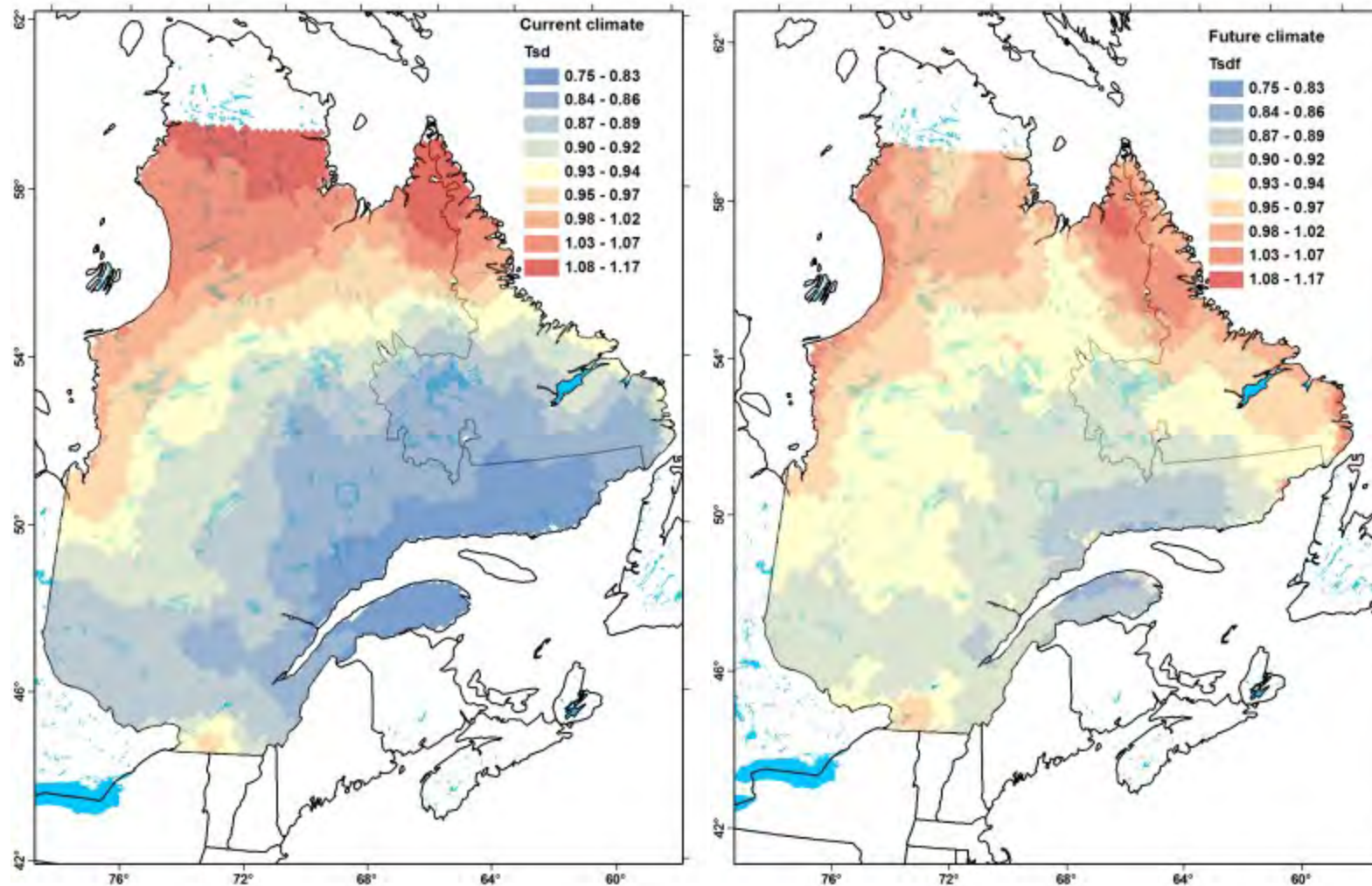


Figure 5.26. Écart-type de la température moyenne annuelle (°C). La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

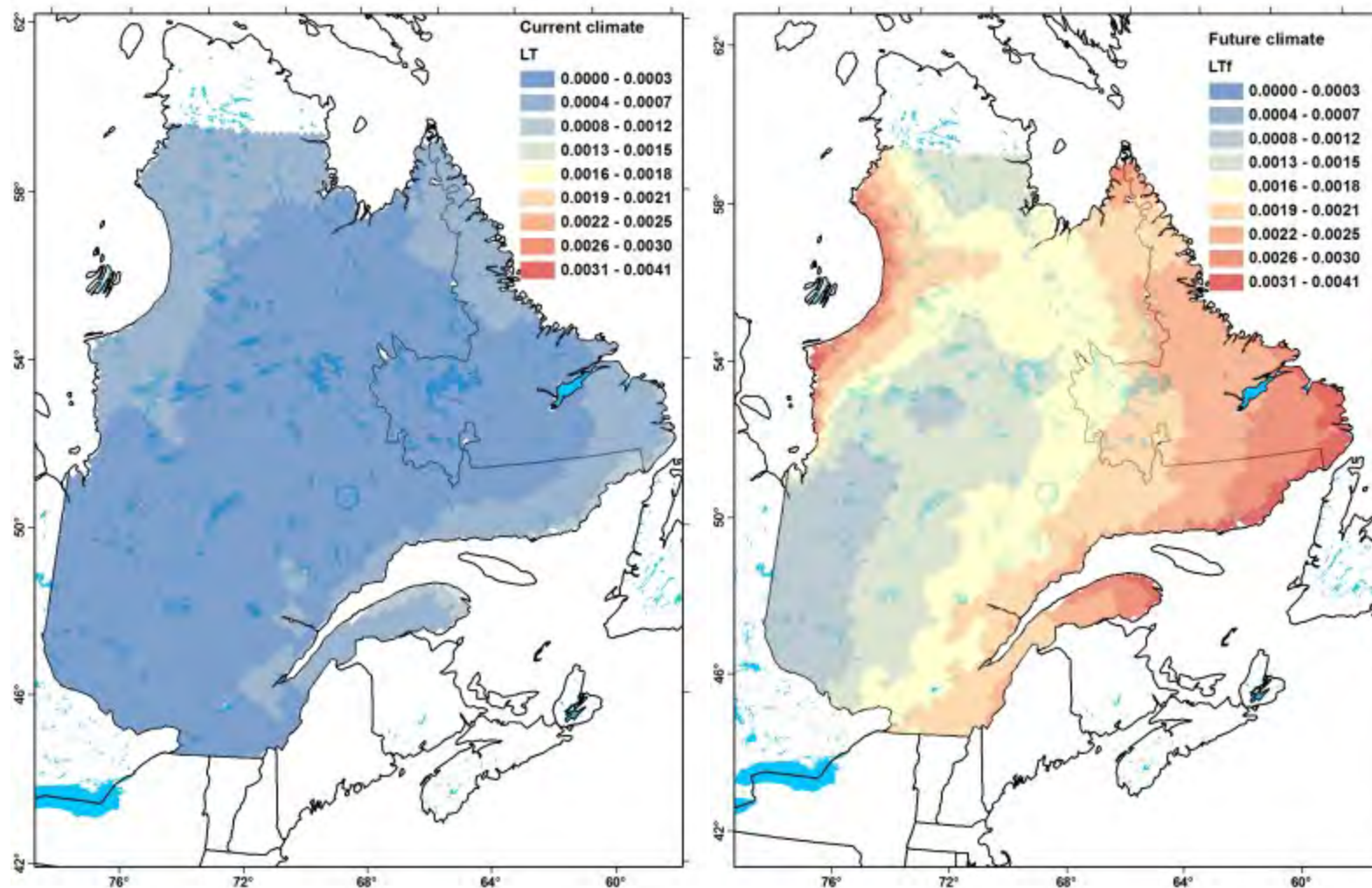


Figure 5.27. Portion linéaire de la dynamique temporelle de la température moyenne annuelle. Cette variable représente la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat expliquée par la portion linéaire. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

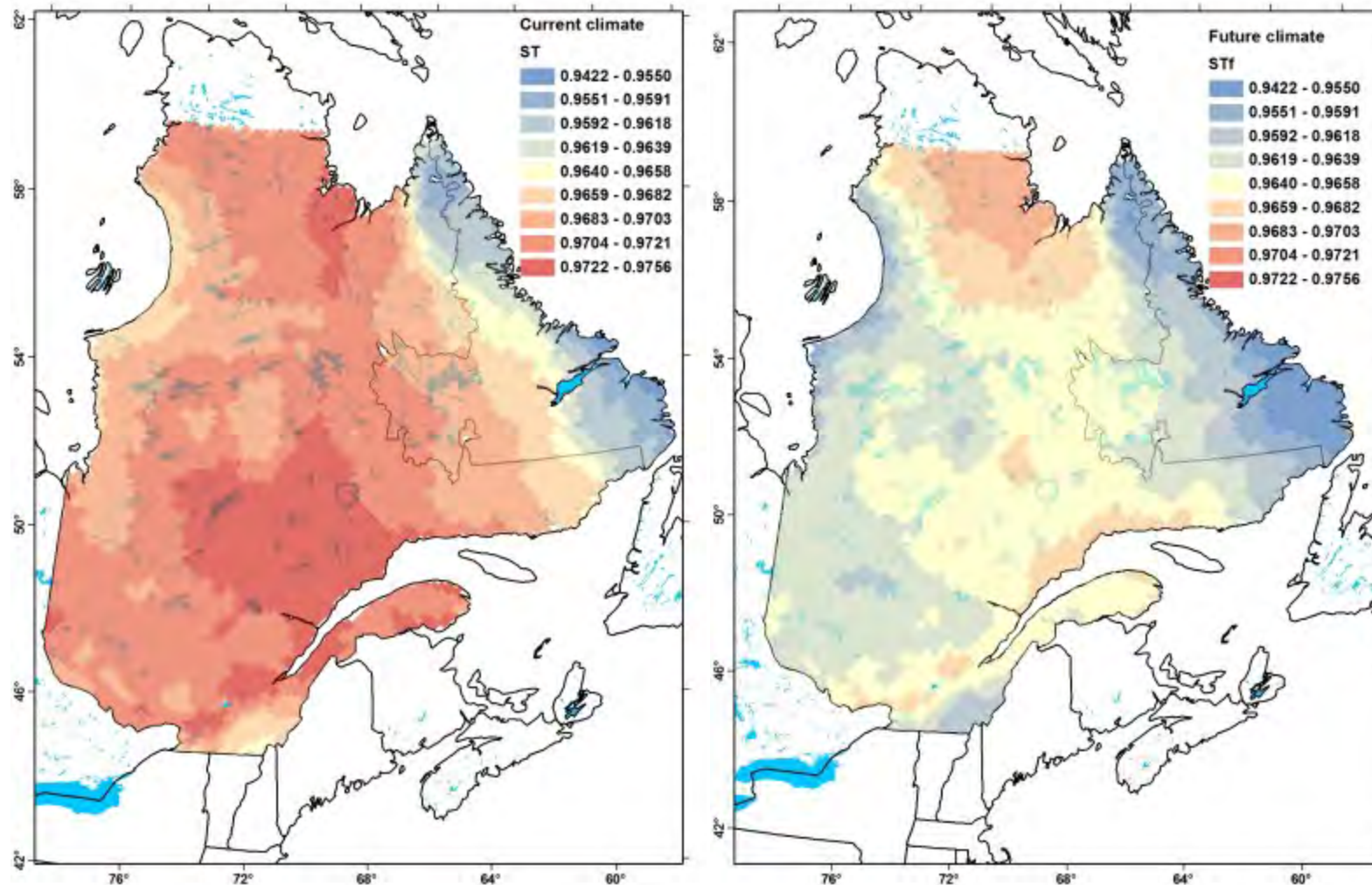


Figure 5.28. Portion saisonnière de la dynamique temporelle de la température moyenne annuelle. Cette variable représente la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat expliquée par la portion saisonnière. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

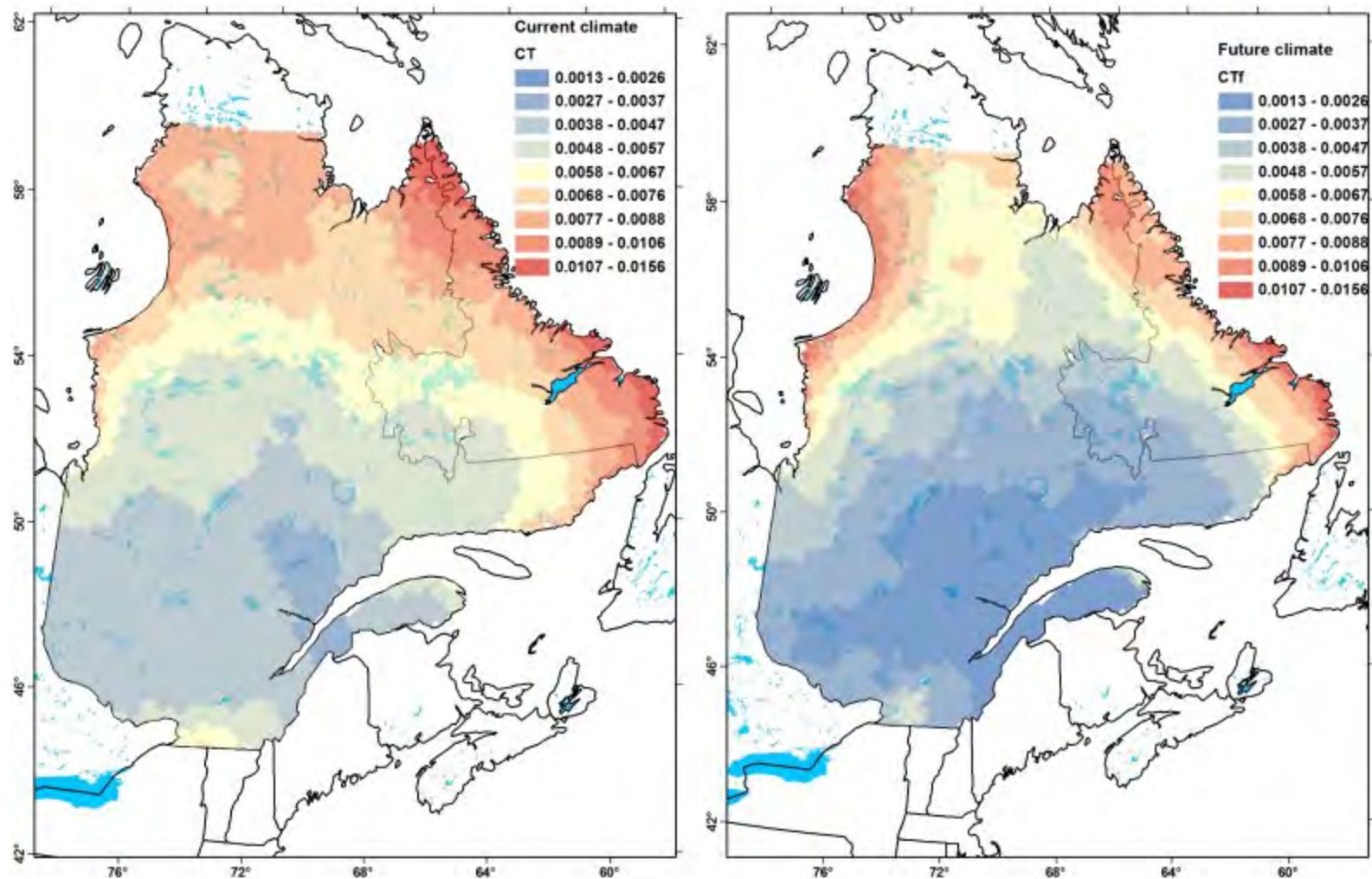


Figure 5.29. Portion cyclique de la dynamique temporelle de la température moyenne annuelle. Cette variable représente la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat expliquée par la portion cyclique. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

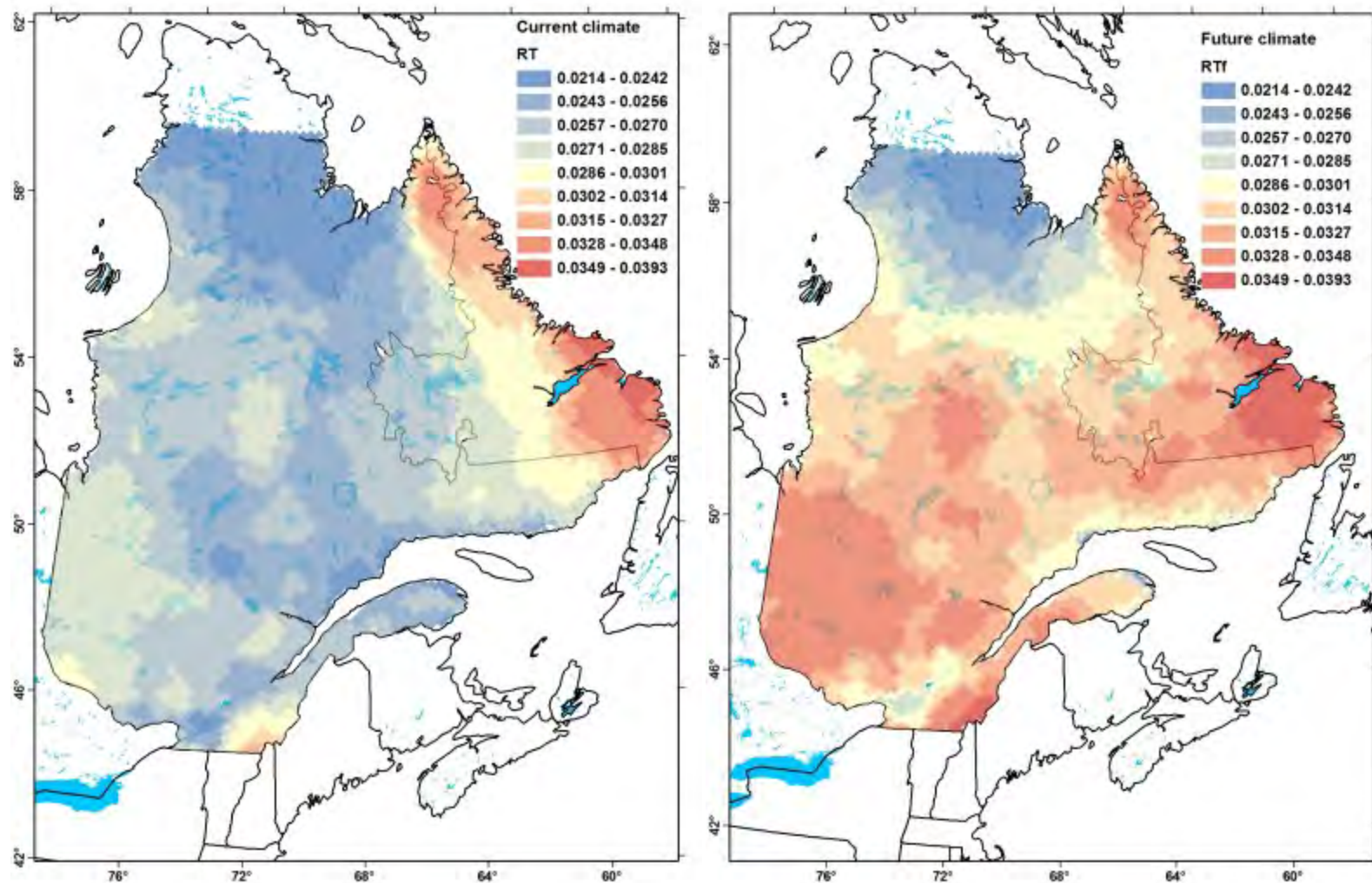


Figure 5.30. Portion résiduelle de la dynamique temporelle de la température moyenne annuelle. Cette variable représente la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat non-expliquée. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

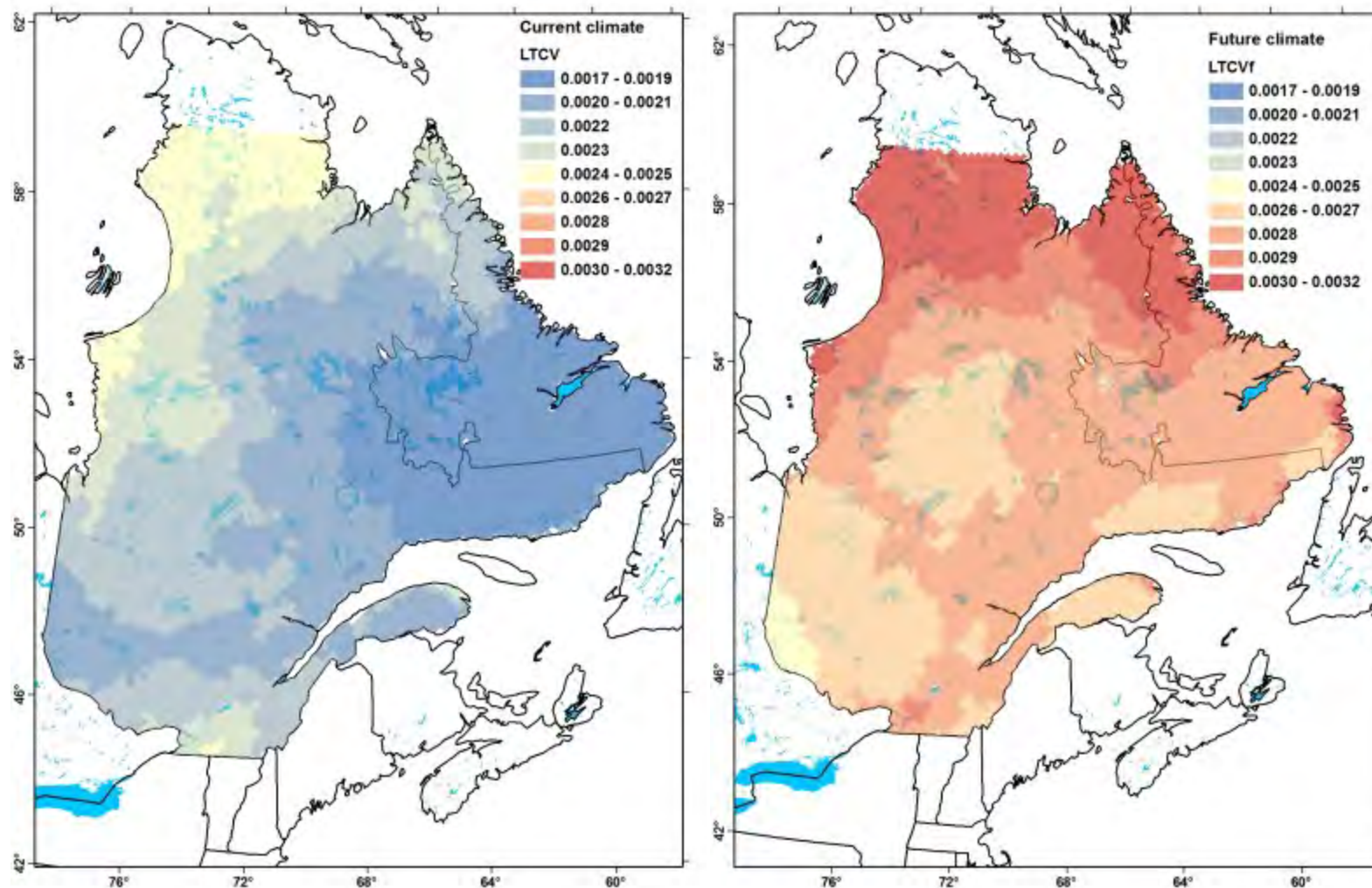


Figure 5.31. Coefficient de variation de la portion linéaire de la dynamique de la température moyenne annuelle. Cette variable représente le coefficient de variation de la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat expliquée par la portion linéaire. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

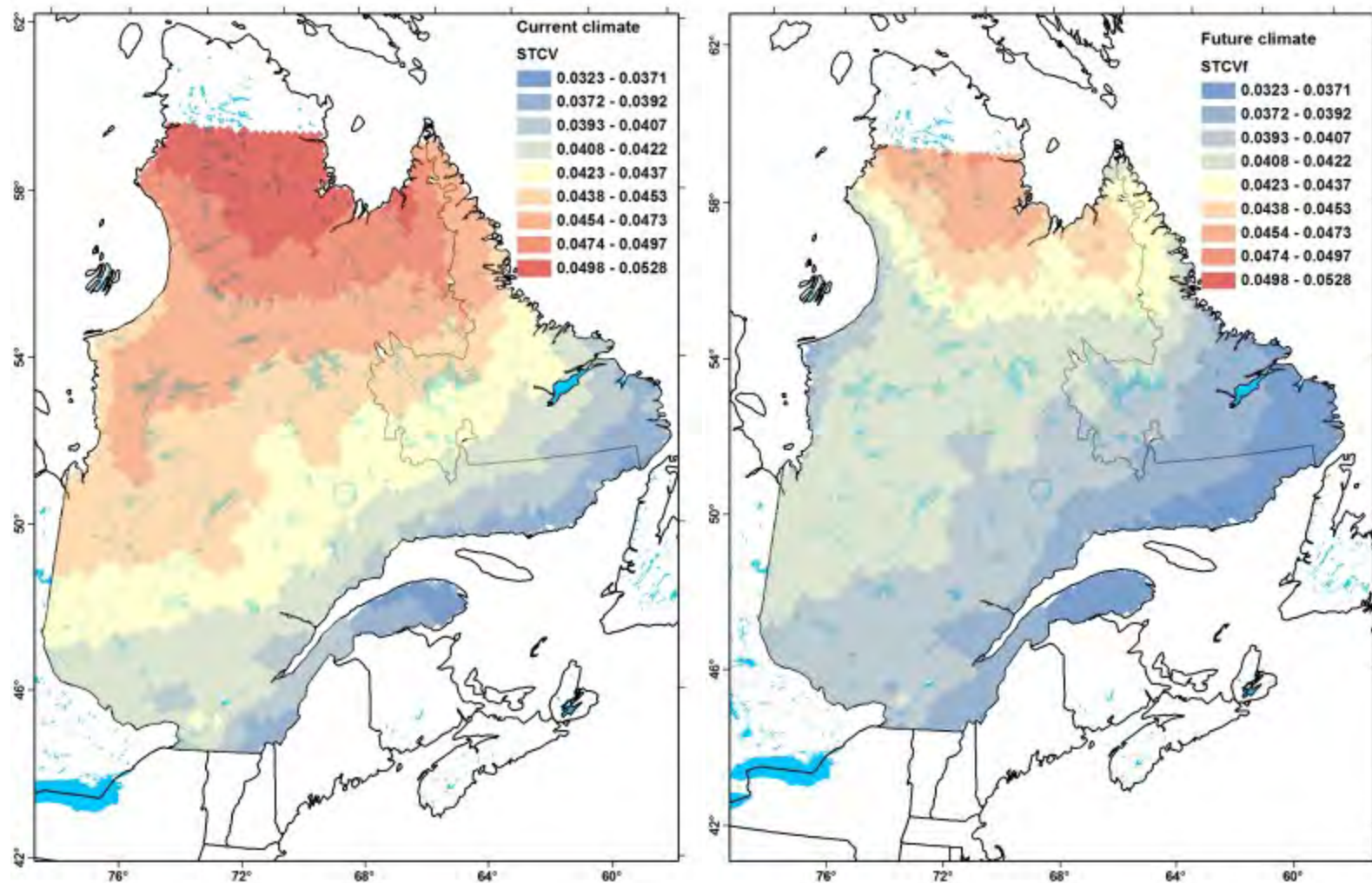


Figure 5.32. Coefficient de variation de la portion saisonnière de la dynamique de la température moyenne annuelle. Cette variable représente le coefficient de variation de la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat expliquée par la portion saisonnière. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

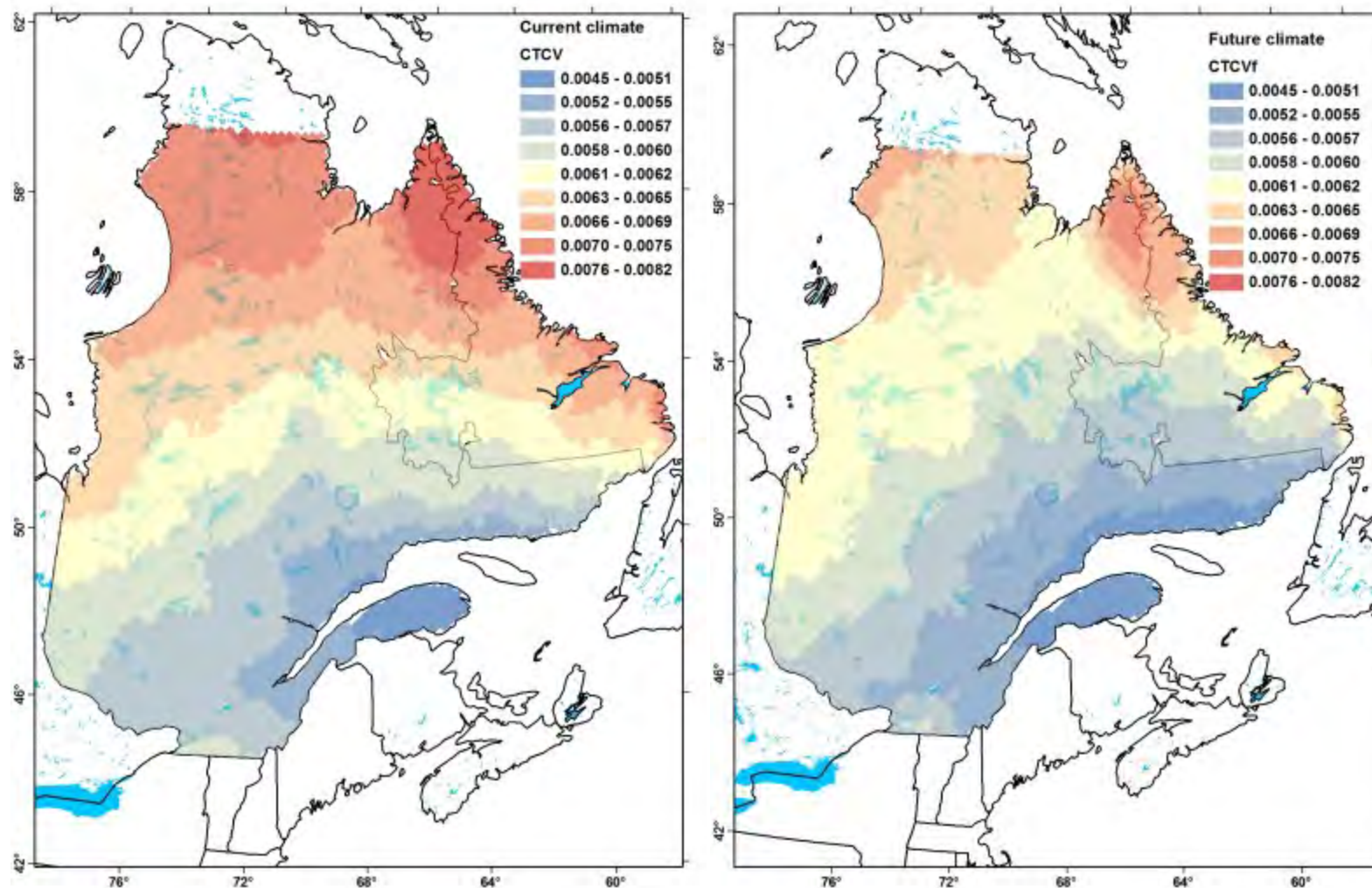


Figure 5.33. Coefficient de variation de la portion cyclique de la dynamique de la température moyenne annuelle. Cette variable représente le coefficient de variation de la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat expliquée par la portion cyclique. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

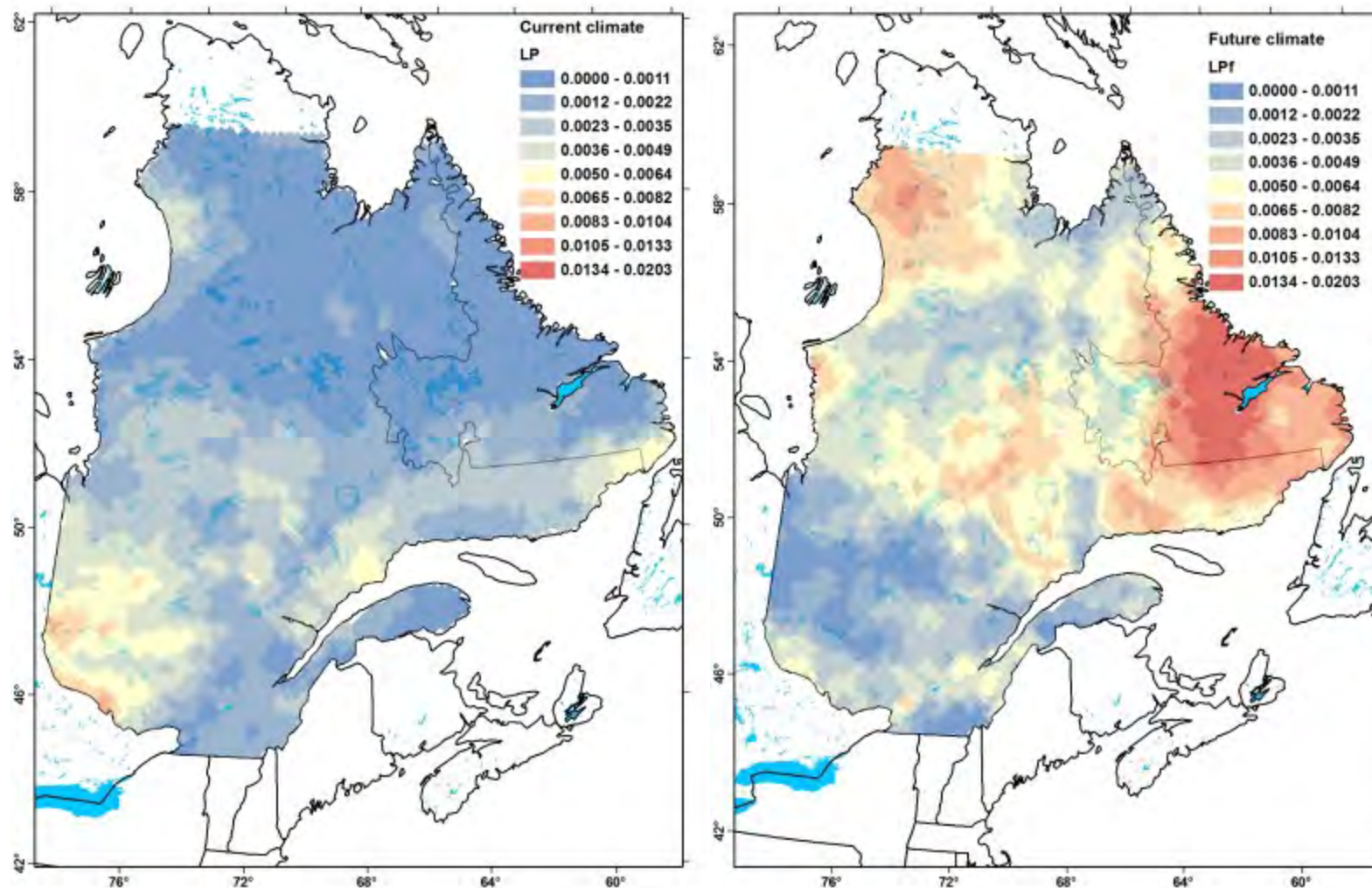


Figure 5.34. Portion linéaire de la dynamique des précipitations annuelles totales. Cette variable représente la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat expliquée par la portion linéaire. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

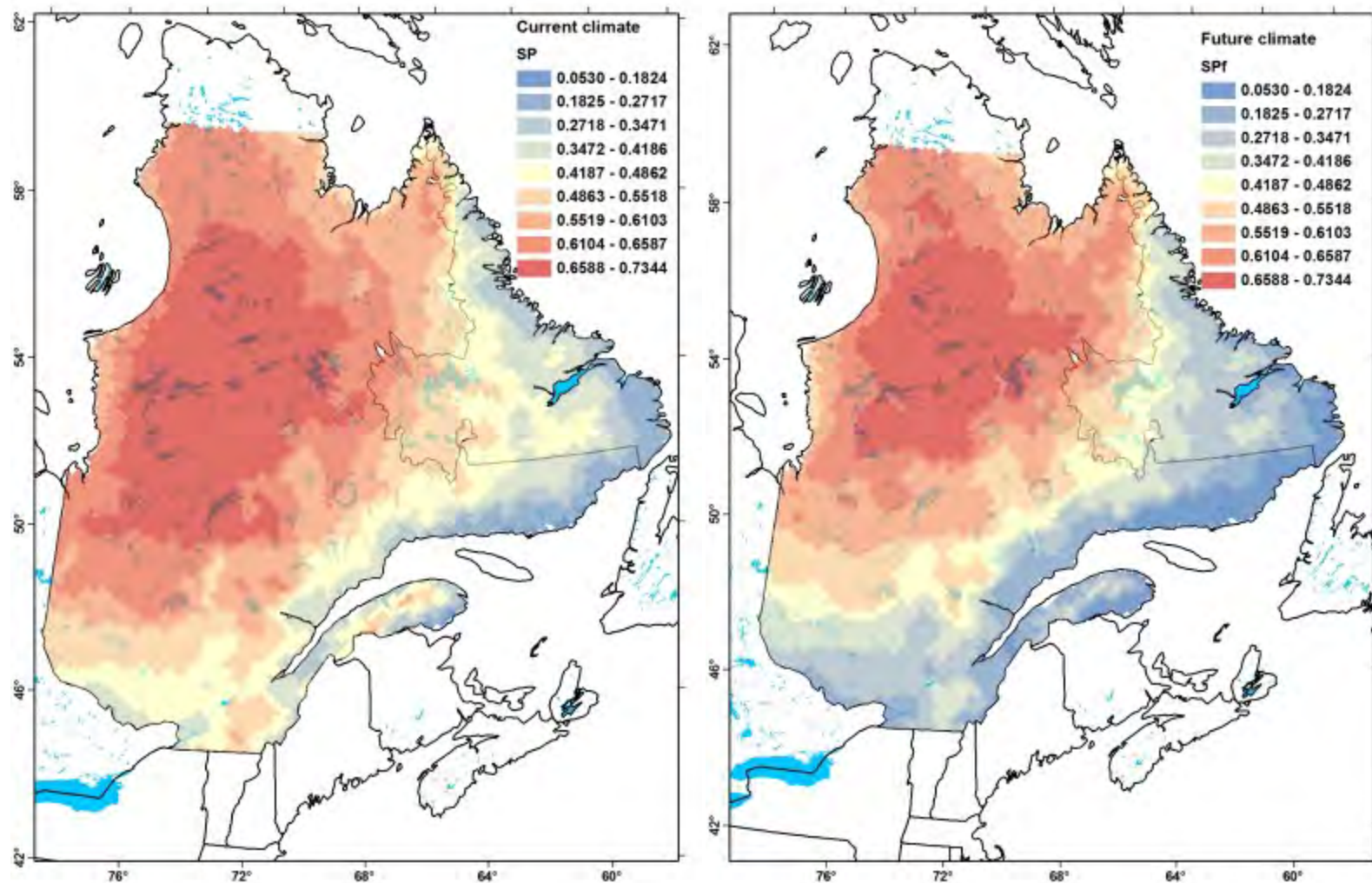


Figure 5.35. Portion saisonnière de la dynamique des précipitations annuelles totales. Cette variable représente la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat expliquée par la portion saisonnière. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

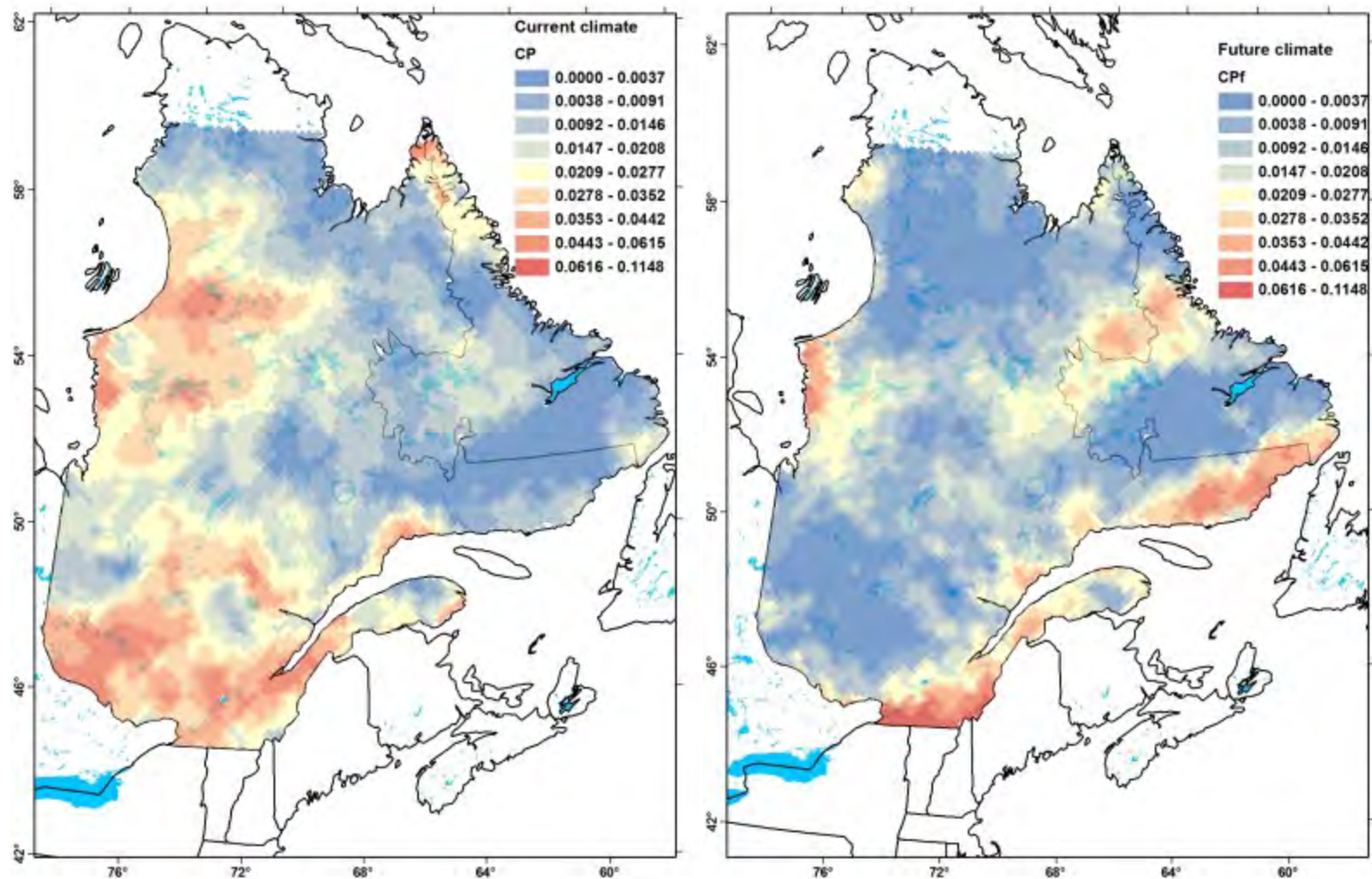


Figure 5.36. Portion cyclique de la dynamique des précipitations annuelles totales. Cette variable représente la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat expliquée par la portion cyclique. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

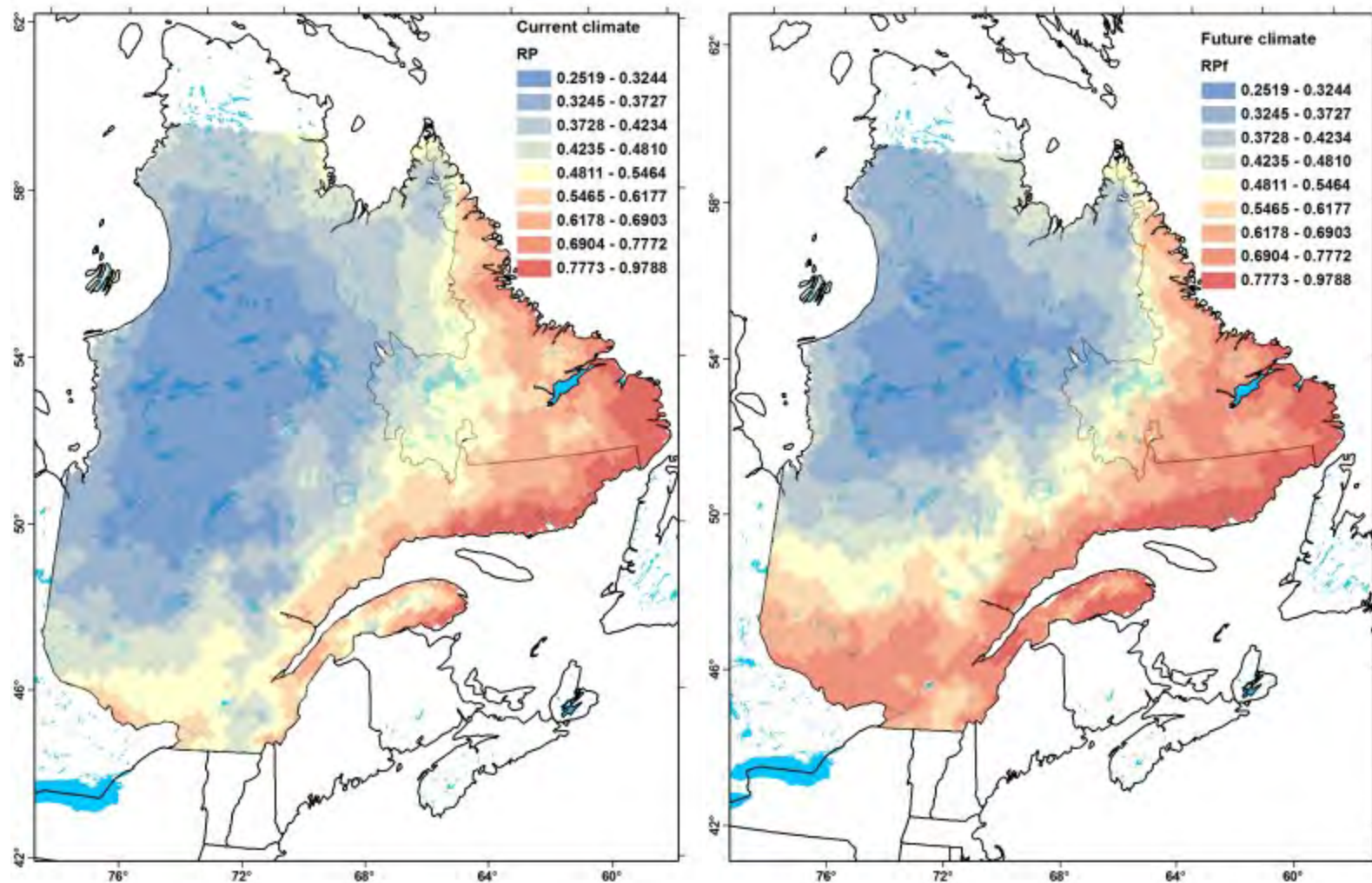


Figure 5.37. Portion résiduelle de la dynamique des précipitations annuelles totales. Cette variable représente la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat non-expliquée. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

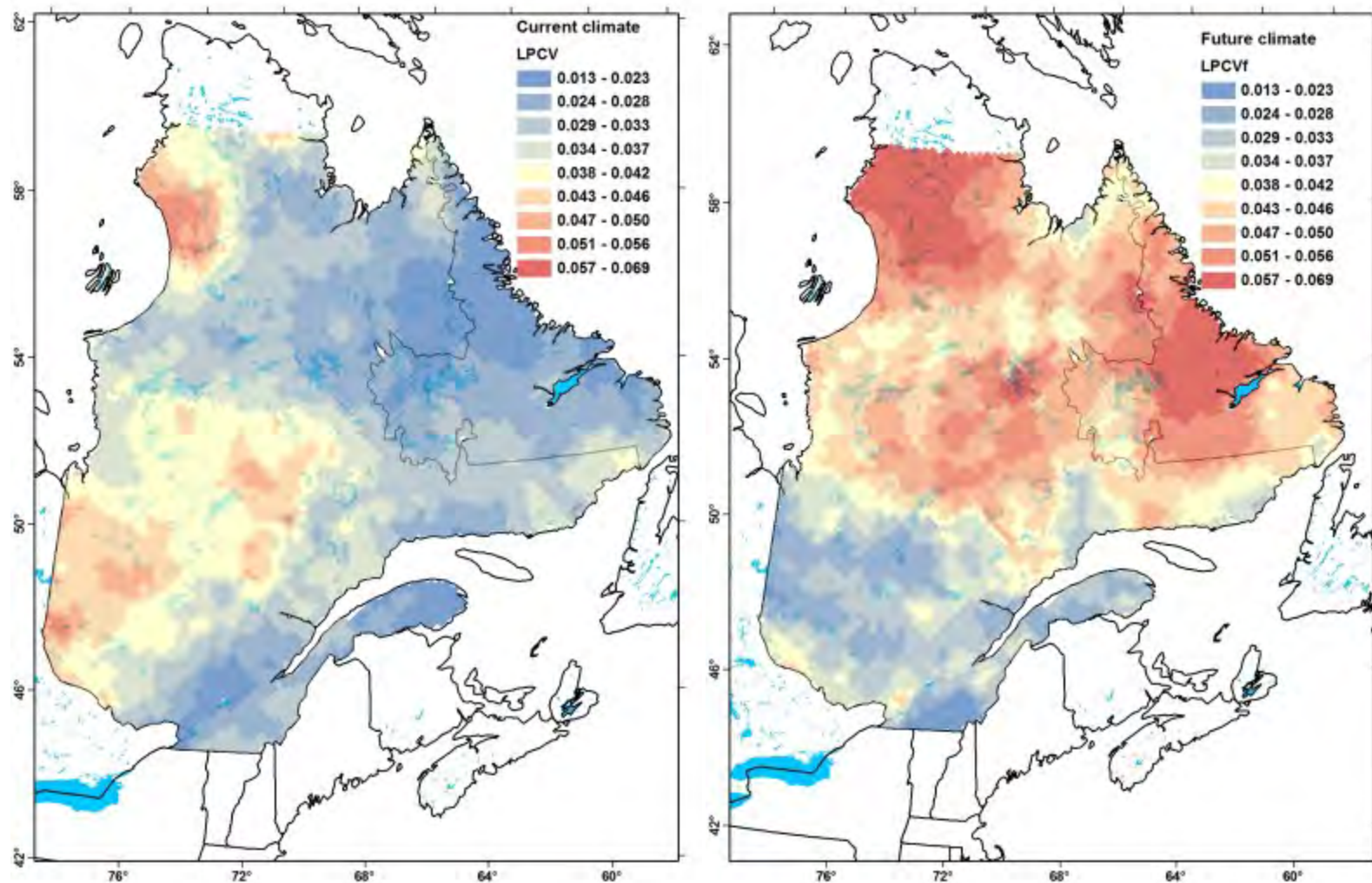


Figure 5.38. Coefficient de variation de la portion linéaire de la dynamique des précipitations annuelles totales. Cette variable représente le coefficient de variation de la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat expliquée par la portion linéaire. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

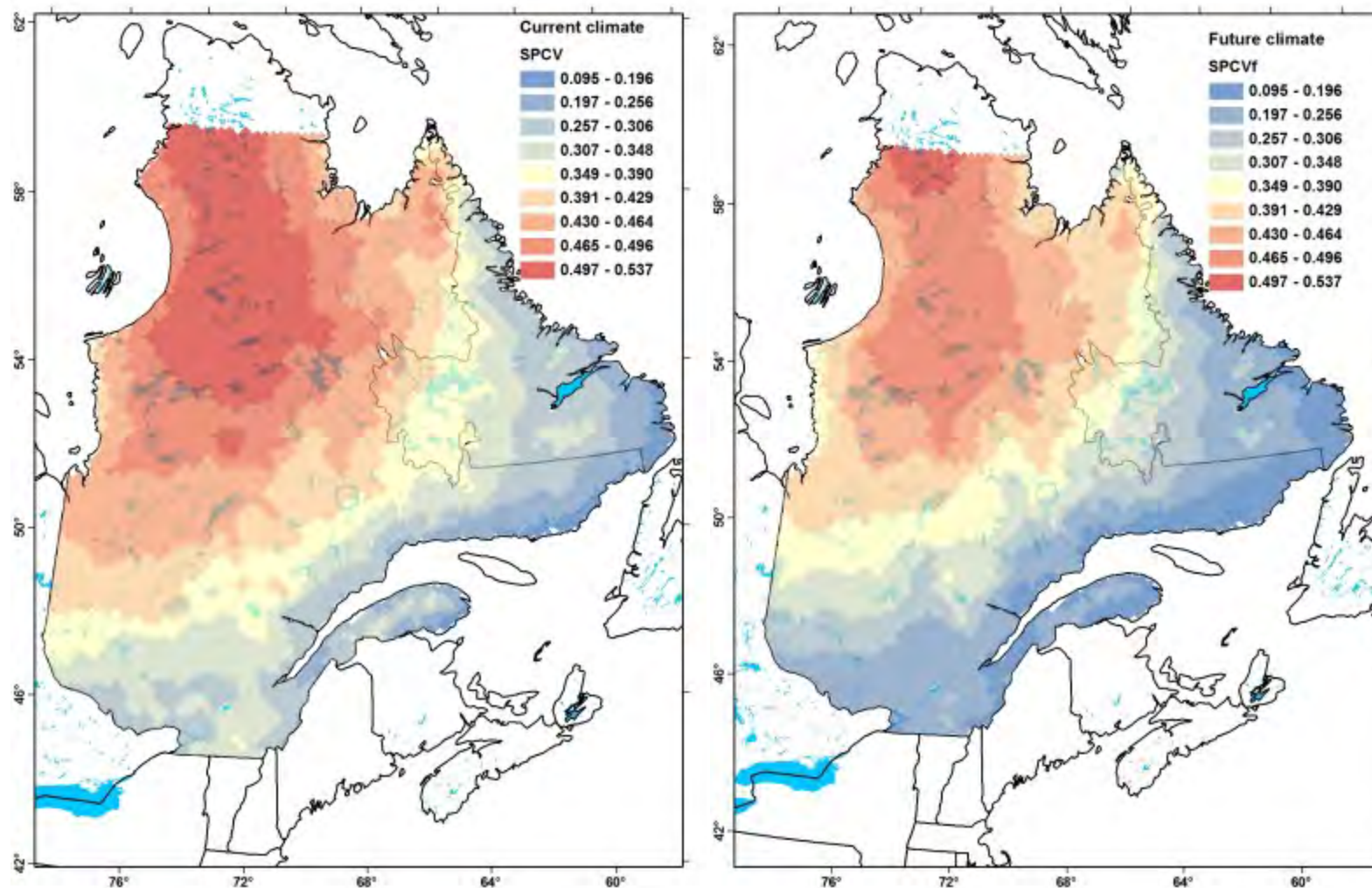


Figure 5.39. Coefficient de variation de la portion saisonnière de la dynamique des précipitations annuelles totales. Cette variable représente le coefficient de variation de la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat expliquée par la portion saisonnière. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

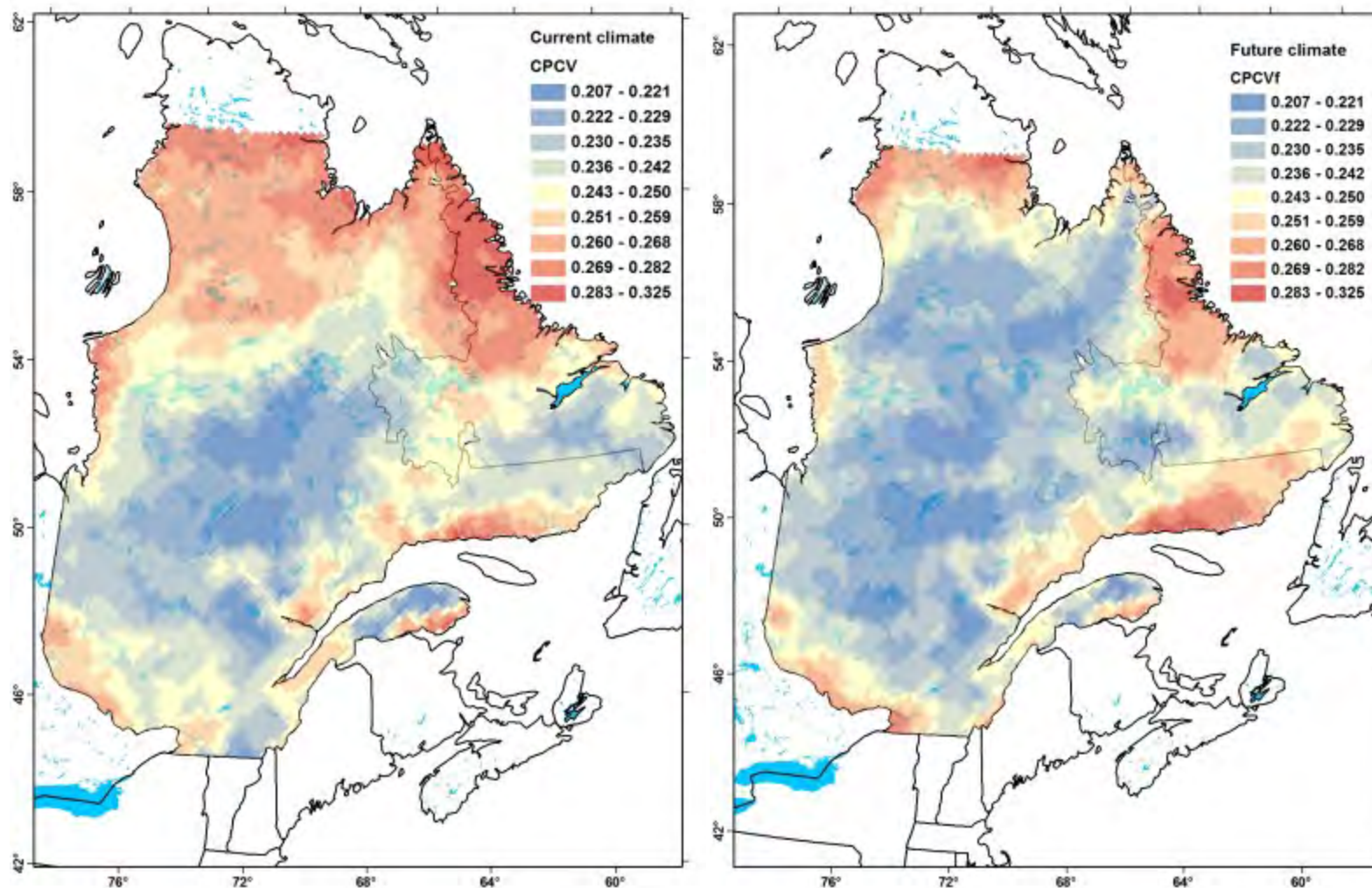


Figure 5.40. Coefficient de variation de la portion cyclique de la dynamique des précipitations annuelles totales. Cette variable représente le coefficient de variation de la proportion de la variabilité (R^2) de la dynamique temporelle du climat expliquée par la portion cyclique. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

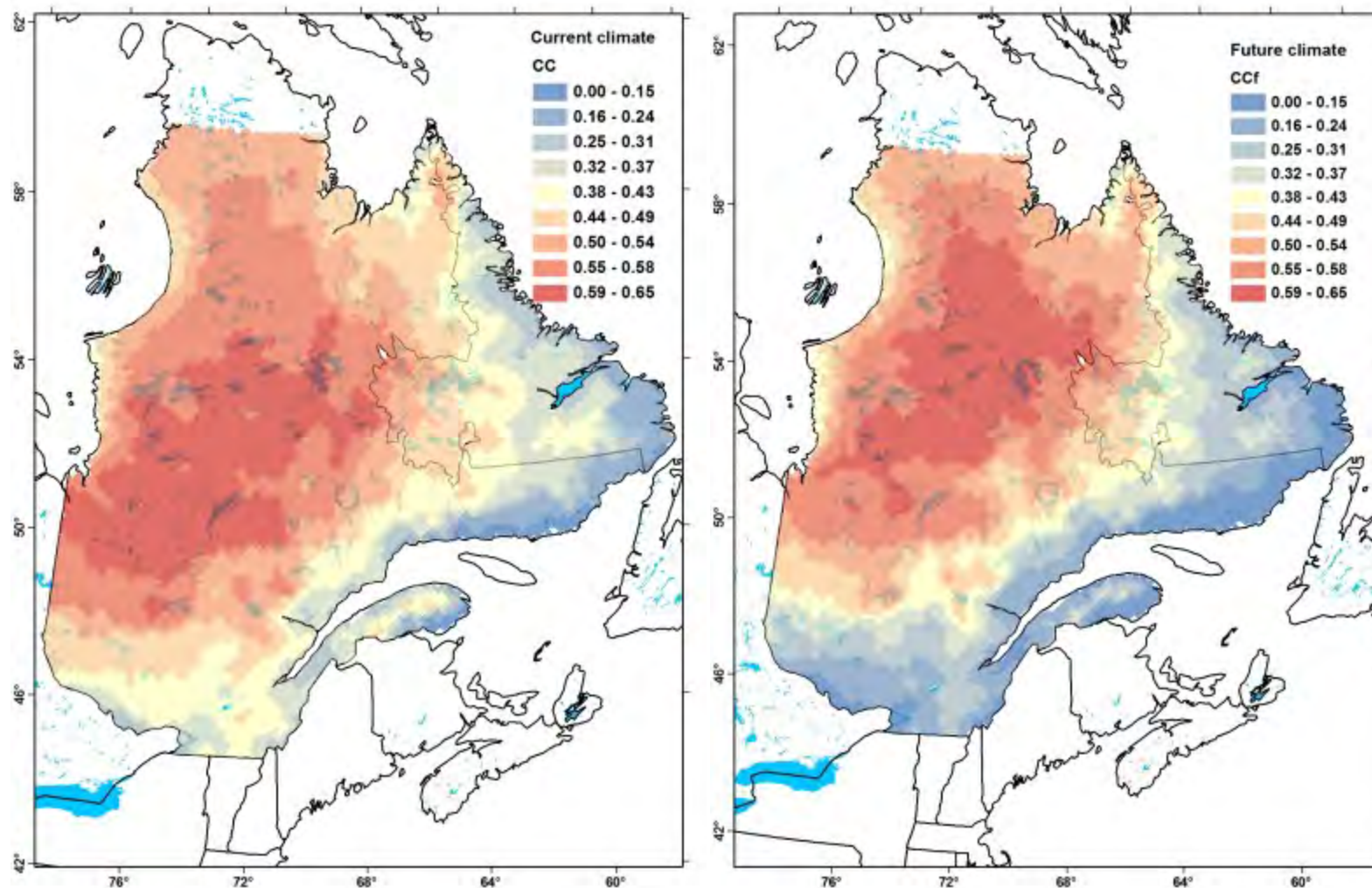


Figure 5.41. Coefficient de corrélation entre la température moyenne annuelle et les précipitations totales annuelles. La figure de droite représente le climat du passé récent tandis que la figure de gauche représente le climat futur.

5.5 Indice de similarité climatique entre le passé récent et le futur

Afin de déterminer les sites où les CC devraient être les plus importants, et donc où on peut s'attendre à des changements significatifs dans la biodiversité, nous avons développé une analyse de similarité climatique entre le climat du passé récent et du climat futur. Notre stratégie est de traiter un grand nombre de variables climatiques comme étant aussi importantes les unes que les autres puisque nous ne pouvons pas prédire quelles variables vont influencer le plus fortement la biodiversité.

5.5.1 Analyse de composantes principales

Nous avons premièrement fait une analyse de composantes principales (ACP) sur l'ensemble des variables. L'ACP offre, par définition, un nombre de composantes égales au nombre de variables utilisées, soit 37 dans cette étude (voir table 5.3). Ces composantes sont dites orthogonales, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas corrélées linéairement. Ainsi, la température moyenne et la température maximale, qui sont corrélées, devraient contribuer à la même composante tandis que les précipitations devraient être incluses dans une autre composante. La première composante explique la plus grande proportion de la variabilité climatique dans la zone étudiée et cette proportion décroît à mesure que nous progressons dans le nombre de composantes. Puisque que notre hypothèse est que nous ne connaissons pas quelles variables vont influencer la biodiversité, nous attribuons une importance égale à chaque composante. Cette standardisation des valeurs propres de l'ACP permet de donner plus d'importance à certains types de variabilité, ce qui est important lorsque les variables analysées sont corrélées. Il est à noter que cette méthode est spécifique aux systèmes avec beaucoup d'incertitude en termes de causalité et que normalement les composantes d'une ACP sont pondérées par la proportion de la variation qu'elles expliquent.

Afin de s'assurer que certaines cellules n'influencent pas trop fortement l'analyse des composantes principales, nous avons retiré aléatoirement 100 cellules et refait les analyses, et ce, pour 100 réplicas. Ce test nous permet de conclure que nos analyses sont robustes envers les valeurs atypiques de certaines cellules.

5.5.2 Calcul de l'indice de similarité climatique

L'indice de similarité climatique est déterminé en calculant la distance euclidienne entre les composantes des ACP du climat du passé récent et du climat futur (Figure 5.42). L'indice de similarité de chaque cellule de la grille est par la suite ordonné du plus petit au plus grand et transformé en valeur entre 0 et 100 pour simplifier son utilisation. Il serait donc plus rigoureux de parler d'indice de *dissemblance* climatique puisque des valeurs faibles (près de zéro) représentent les cellules où le climat du passé récent est le plus similaire au climat futur.

5.5.3 Choix du nombre de composantes pour déterminer l'indice de similarité climatique

Compte tenu que le but de l'ACP est de limiter le nombre de variables, il y a un choix à faire en terme de nombre de composantes à inclure dans l'analyse. Compte tenu que nous avons pondéré de manière identique les 37 composantes, il est essentiel que les dernières composantes ne soient

pas incluses puisqu'elles ne représentent qu'une infime fraction de la variabilité climatique observée. Il faut donc utiliser seulement les premières composantes. Pour trouver le nombre optimal de composantes, nous avons corrélés les indices de similarité climatique utilisant n et $n-1$ composantes (p.ex. 3 et 2 composantes ou 8 et 7 composantes). Le nombre optimal se trouve lorsque la corrélation atteint un maximum et, pour le climat du Québec, le nombre optimal est de 6 composantes. La Figure 5.43 montre l'indice final de similarité climatique utilisé pour le projet CC-Suivi.

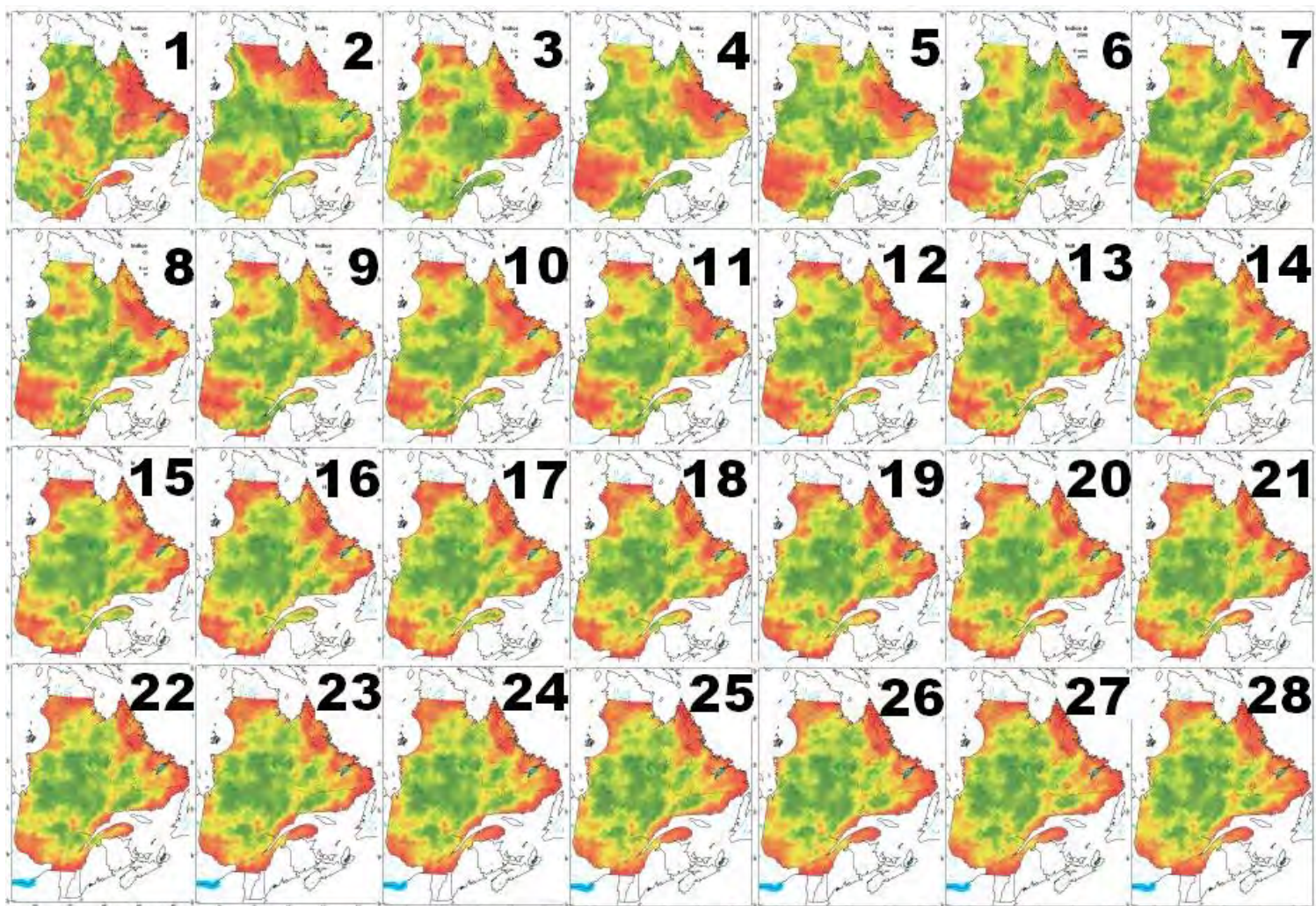


Figure 5.42. Indices de similarité climatique selon le nombre de composantes principales utilisées. L'indice est déterminé en calculant la distance euclidienne entre les composantes des ACP du climat du passé récent et du climat futur. Les régions en vert sont les plus similaires et celles en rouges sont les moins similaires. Seulement les indices des 28 premières composantes sont affichés pour des raisons de clarté.

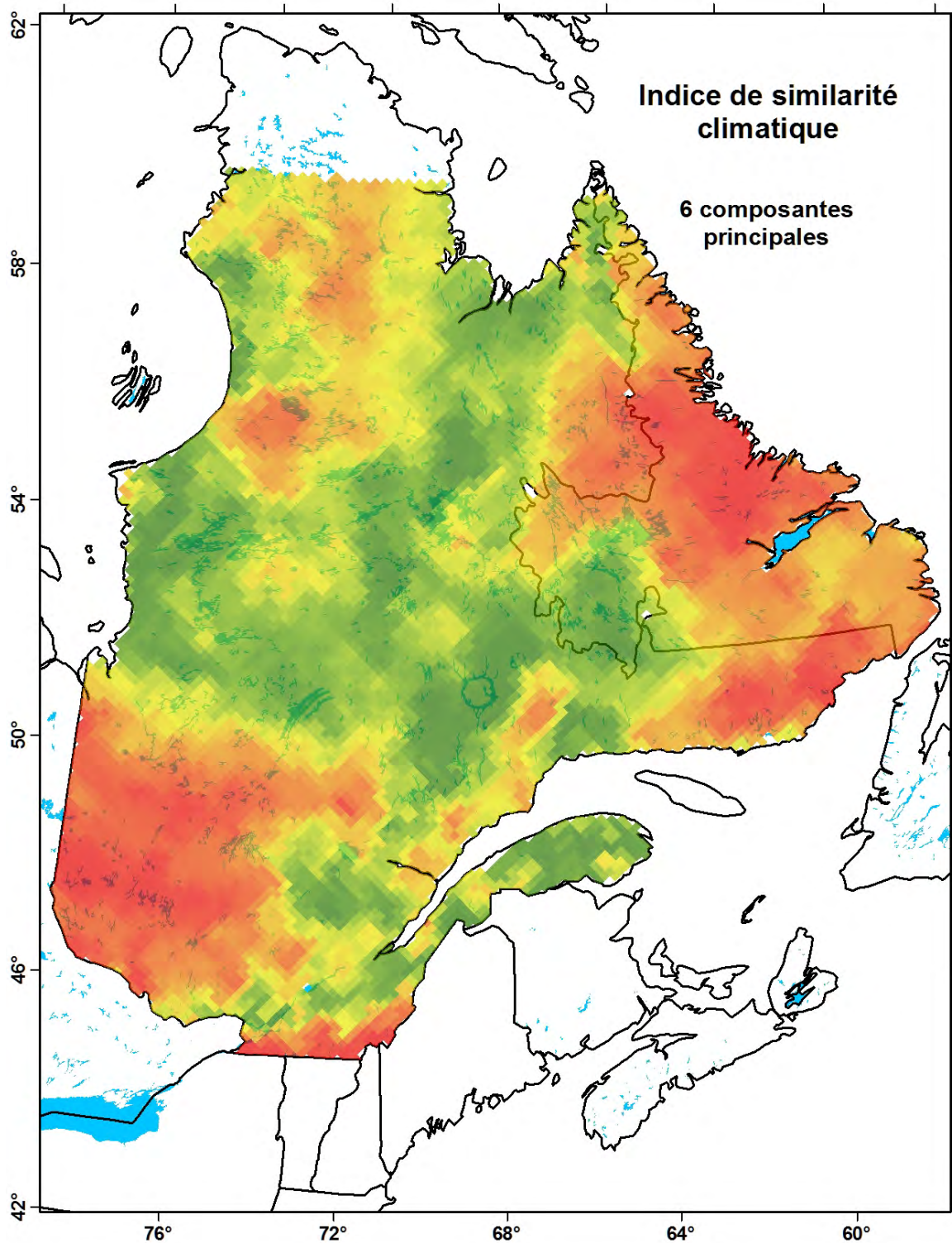


Figure 5.43. Indice de similarité climatique optimal avec six composantes principales du climat. L'indice est déterminé en calculant la distance euclidienne entre les composantes des composantes principales du climat du passé récent et du climat futur. Les régions en vert sont les plus similaires et celles en rouge sont les moins similaires.

5.6 Références

- Araujo, M. B. and M. New. 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution* **22**:42-47.
- Dulcic, J., B. Grbec, L. Lipej, G. B. Paklar, N. Supic, and A. Smircic. 2004. The effect of the hemispheric climatic oscillations on the adriatic ichthyofauna. *Fresenius Environmental Bulletin* **13**:293-298.
- Hamlet, A. F., S.-Y. Lee, K. E. B. Mickelson, and M. M. Elsner. 2010. Effects of projected climate change on energy supply and demand in the Pacific Northwest and Washington State. *Climatic Change* **102**:103-128.
- Holmgren, M., M. Scheffer, E. Ezcurra, J. R. Gutierrez, and G. M. J. Mohren. 2001. El Nino effects on the dynamics of terrestrial ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution* **16**:89-94.
- Hurrell, J. W. 1995. Decadal trends in the north-atlantic oscillation - regional temperatures and precipitation. *Science* **269**:676-679.
- Hutchinson, M. F. 1995. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems* **9**:385-403.
- Hutchinson, M. F., D. W. McKenney, K. Lawrence, J. H. Pedlar, R. F. Hopkinson, E. Milewska, and P. Papadopol. 2009. Development and Testing of Canada-Wide Interpolated Spatial Models of Daily Minimum-Maximum Temperature and Precipitation for 1961-2003. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **48**:725-741.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lettenmaier, D. P. and T. Y. Gan. 1990. Hydrologic sensitivities of the Sacramento-San-Joaquin River basin, California, to global warming. *Water Resources Research* **26**:69-86.
- Marmion, M., M. Parviainen, M. Luoto, R. K. Heikkinen, and W. Thuiller. 2009. Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and distributions* **15**:59-69.
- Music, B. and D. Caya. 2007. Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi River basin as simulated by the Canadian regional climate model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology* **8**:969-988.
- Parmesan, C. and G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* **421**:37-42.
- Saino, N., R. Ambrosini, D. Rubolini, J. von Hardenberg, A. Provenzale, K. Hueppop, O. Hueppop, A. Lehikoinen, E. Lehikoinen, K. Rainio, M. Romano, and L. Sokolov. 2011. Climate warming, ecological mismatch at arrival and population decline in migratory birds. *Proceedings Of The Royal Society B-Biological Sciences* **278**:835-842.
- Samson, J. 2011. *Forecasting the impacts of climate change with non-stationary niche models of regional population density*. McGill University, Montreal, Canada.
- Stainforth, D. A., T. Aina, C. Christensen, M. Collins, N. Faull, D. J. Frame, J. A. Kettleborough, S. Knight, A. Martin, J. M. Murphy, C. Piani, D. Sexton, L. A. Smith, R. A. Spicer, A. J. Thorpe, and M. R. Allen. 2005. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature* **433**:403-406.

-
- Trenberth, K. E. and J. W. Hurrell. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics* **9**:303-319.
- Walther, G. R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. J. C. Beebee, J. M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg, and F. Bairlein. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* **416**:389-395.
- White, M. A., F. Hoffman, W. W. Hargrove, and R. R. Nemani. 2005. A global framework for monitoring phenological responses to climate change. *Geophysical research letters* **32**.
- Wyrtki, K. 1973. Teleconnections in the equatorial pacific ocean. *Science (New York, N.Y.)* **180**:66-68.
- Zhu, W., H. Tian, X. Xu, Y. Pan, G. Chen, and W. Lin. 2012. Extension of the growing season due to delayed autumn over mid and high latitudes in North America during 1982–2006. *Global Ecology and Biogeography* **21**:260-271.

5.7 Annexe 5.1

Table 5.A.1. Sources de la méta-analyse des variables climatiques utilisées dans des études par enveloppes climatiques entre septembre 2011 et septembre 2012 selon une requête faite le 27 septembre 2012 sur le site internet « Web of Science » avec les mots clés « climate envelope model* ».

Espèces étudiées	Source
856 plantes	(Alkemade et al. 2011)
701 plantes	(Chapman and Purse 2011)
181 mammifères	(Maiorano et al. 2011)
130 arbres	(McKenney et al. 2011)
94 oiseaux	(Jimenez-Valverde et al. 2011)
35 poissons	(Grenouillet et al. 2011)
27 arbres	(Attorre et al. 2011)
3 dendroctones	(Evangelista et al. 2011)
Maringouin	(Fischer et al. 2011)
Chauve-souris	(Lundy et al. 2010)
Colibri	(Buermann et al. 2011)
Koala	(Adams-Hosking et al. 2011)
Tortue	(Kikillus et al. 2010)
Eucalyptus	(Austin and Van Niel 2011)
Peuplier	(Gray et al. 2011)
Ornithorynque	(Klamt et al. 2011)
Humain	(Samson et al. 2011)
Doryphore et pyrale	(Kocmankova et al. 2011)
13 oiseaux de mer	(Oswald et al. 2011)
Une plante rare	(Jäkäläniemi 2011)
73 dytiques	(Sanchez-Fernandez et al. 2011)
4 communautés végétales	(Dlamini 2011)
Gazelle	(Hu and Jiang 2011)
Papillon	(Habel et al. 2011)
7 arbres et arbustes	(Sormunen et al. 2011)
Chrysomèle	(Dupin et al. 2011)

Références

- Adams-Hosking, C., H. S. Grantham, J. R. Rhodes, C. McAlpine, and P. T. Moss. 2011. Modelling climate-change-induced shifts in the distribution of the koala. *Wildlife Research* **38**:122-130.
- Alkemade, R., M. Bakkenes, and B. Eickhout. 2011. Towards a general relationship between climate change and biodiversity: an example for plant species in Europe. *Regional Environmental Change* **11**:S143-S150.

-
- Attorre, F., M. Alfo, M. De Sanctis, F. Francesconi, R. Valenti, M. Vitale, and F. Bruno. 2011. Evaluating the effects of climate change on tree species abundance and distribution in the Italian peninsula. *Applied Vegetation Science* **14**:242-255.
- Austin, M. P. and K. P. Van Niel. 2011. Impact of landscape predictors on climate change modelling of species distributions: a case study with *Eucalyptus fastigata* in southern New South Wales, Australia. *Journal of Biogeography* **38**:9-19.
- Buermann, W., J. A. Chaves, R. Dudley, J. A. McGuire, T. B. Smith, and D. L. Altshuler. 2011. Projected changes in elevational distribution and flight performance of montane Neotropical hummingbirds in response to climate change. *Global Change Biology* **17**:1671-1680.
- Chapman, D. S. and B. V. Purse. 2011. Community versus single-species distribution models for British plants. *Journal of Biogeography* **38**:1524-1535.
- Dlamini, W. 2011. Probabilistic spatio-temporal assessment of vegetation vulnerability to climate change in Swaziland. *Global Change Biology* **17**:1425-1441.
- Dupin, M., P. Reynaud, V. Jarosik, R. Baker, S. Brunel, D. Eyre, J. Pergl, and D. Makowski. 2011. Effects of the training dataset characteristics on the performance of nine species Distribution Models: Application to *Diabrotica virgifera virgifera*. *PLoS ONE* **6**:e20957.
- Evangelista, P. H., S. Kumar, T. J. Stohlgren, and N. E. Young. 2011. Assessing forest vulnerability and the potential distribution of pine beetles under current and future climate scenarios in the Interior West of the US. *Forest Ecology and Management* **262**:307-316.
- Fischer, D., S. M. Thomas, F. Niemitz, B. Reineking, and C. Beierkuhnlein. 2011. Projection of climatic suitability for *Aedes albopictus* Skuse (Culicidae) in Europe under climate change conditions. *Global and Planetary Change* **78**:54-64.
- Gray, L. K., T. Gylander, M. S. Mbogga, P.-y. Chen, and A. Hamann. 2011. Assisted migration to address climate change: recommendations for aspen reforestation in western Canada. *Ecological Applications* **21**:1591-1603.
- Grenouillet, G., L. Buisson, N. Casajus, and S. Lek. 2011. Ensemble modelling of species distribution: the effects of geographical and environmental ranges. *Ecography* **34**:9-17.
- Habel, J. C., D. Roedder, T. Schmitt, and G. Neve. 2011. Global warming will affect the genetic diversity and uniqueness of *Lycaena helle* populations. *Global Change Biology* **17**:194-205.
- Hu, J. and Z. Jiang. 2011. Climate change hastens the conservation urgency of an endangered ungulate. *PLoS ONE* **6**:e22873.
- Jäkäläniemi, A. 2011. Narrow climate and habitat envelope affect the survival of relict populations of a northern *Arnica angustifolia*. *Environmental and Experimental Botany* **72**:415-421.
- Jimenez-Valverde, A., N. Barve, A. Lira-Noriega, S. P. Maher, Y. Nakazawa, M. Papes, J. Soberon, J. Sukumaran, and A. T. Peterson. 2011. Dominant climate influences on North American bird distributions. *Global Ecology and Biogeography* **20**:114-118.
- Kikillus, K. H., K. M. Hare, and S. Hartley. 2010. Minimizing false-negatives when predicting the potential distribution of an invasive species: a bioclimatic envelope for the red-eared slider at global and regional scales. *Animal Conservation* **13**:5-15.
- Klamt, M., R. Thompson, and J. Davis. 2011. Early response of the platypus to climate warming. *Global Change Biology* **17**:3011-3018.

-
- Kocmankova, E., M. Trnka, J. Eitzinger, M. Dubrovsky, P. Stepanek, D. Semeradova, J. Balek, P. Skalak, A. Farda, J. Juroch, and Z. Zalud. 2011. Estimating the impact of climate change on the occurrence of selected pests at a high spatial resolution: a novel approach. *Journal of Agricultural Science* **149**:185-195.
- Lundy, M., I. Montgomery, and J. Russ. 2010. Climate change-linked range expansion of Nathusius' pipistrelle bat, *Pipistrellus nathusii* (Keyserling & Blasius, 1839). *Journal of Biogeography* **37**:2232-2242.
- Maiorano, L., A. Falcucci, N. E. Zimmermann, A. Psomas, J. Pottier, D. Baisero, C. Rondinini, A. Guisan, and L. Boitani. 2011. The future of terrestrial mammals in the Mediterranean basin under climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **366**:2681-2692.
- McKenney, D. W., J. H. Pedlar, R. B. Rood, and D. Price. 2011. Revisiting projected shifts in the climate envelopes of North American trees using updated general circulation models. *Global Change Biology* **17**:2720-2730.
- Oswald, S. A., B. Huntley, Y. C. Collingham, D. J. F. Russell, B. J. Anderson, J. M. Arnold, R. W. Furness, and K. C. Hamer. 2011. Physiological effects of climate on distributions of endothermic species. *Journal of Biogeography* **38**:430-438.
- Samson, J., D. Berteaux, B. J. McGill, and M. M. Humphries. 2011. Geographic disparities and moral hazards in the predicted impacts of climate change on human populations. *Global Ecology And Biogeography* **20**:532-544.
- Sanchez-Fernandez, D., J. M. Lobo, and O. Lucia Hernandez-Manrique. 2011. Species distribution models that do not incorporate global data misrepresent potential distributions: a case study using Iberian diving beetles. *Diversity and Distributions* **17**:163-171.
- Sormunen, H., R. Virtanen, and M. Luoto. 2011. Inclusion of local environmental conditions alters high-latitude vegetation change predictions based on bioclimatic models. *Polar Biology* **34**:883-897.

6 Méthodologie de localisation des sites et scénarios d'échantillonnage

Auteurs : Pedro Peres-Neto, Jason Samson et Shubha Pandit

Affiliation : Université du Québec à Montréal, Chaire du Canada en modélisation spatiale et biodiversité

6.1 Sélection des sites de suivi

Les analyses précédentes nous ont permis de localiser les cellules de la grille couvrant le Québec où le climat futur devrait être très, moyennement ou peu semblable au climat récent. Par contre, il est probable que la biodiversité de deux cellules ayant des climats passés et futurs semblables (ou très peu semblables) ne changera pas de la même manière. Cela peut se produire si ces cellules ont des écosystèmes différents ou bien si elles sont soumises à des perturbations différentes. Nous avons développé un protocole pour faire la sélection des sites de suivi en fonction de trois types d'indices qui correspondent aux caractéristiques fondamentales des écosystèmes, à leur degré de perturbations, ainsi qu'à leur accessibilité. Ces indices peuvent être décrits comme étant de nature : 1) biophysiques, 2) perturbations et 3) facilité d'échantillonnage.

6.2 Indices biophysiques

6.2.1 Géologie et dépôts de surface

La géologie (Fig. 6.1., Tableau 6.1) et les dépôts de surface (Fig. 6.2, Tableau 6.2) laissés lors de la déglaciation structurent la biodiversité en influençant le type de communautés végétales se retrouvant dans le paysage (Prentice et al. 1992, Brown and Lomolino 1998). Les données géologiques et de dépôts de surface proviennent du cadre écologique de référence²⁷. Le cadre écologique de référence procure une représentation physique du territoire québécois dans un système hiérarchique de niveaux de perception emboîtés. Pour le projet CC-Suivi, nous avons utilisé le 3^{ième} niveau de perception représentant le Québec en 374 unités d'une superficie moyenne d'environ 4500km². Le 4^{ième} niveau de perception, ayant des polygones beaucoup plus petits (environ 400km²), n'est pas encore disponible pour l'ensemble de la province.

6.2.2 Élévation

La biodiversité est fortement influencée par les variations climatiques engendrées par l'élévation, et ce, sur des distances inférieures à la résolution des données climatiques. Le gradient thermique entre le niveau de la mer et le sommet des montagnes est fortement responsable des changements dans les communautés écologiques. De plus, des variations de précipitations peuvent survenir lorsque l'élévation change brusquement (Brown and Lomolino 1998). Les espèces peuvent plus facilement se disperser en altitude qu'en latitude afin de suivre leur climat préféré (Loarie et al. 2009, Ackerly et al. 2010). On peut donc s'attendre à ce que la biodiversité réagisse de manière

²⁷ <http://www.mddep.gouv.qc.ca/biodiversite/cadre-ecologique/index.htm>

très différente selon l'élévation des sites, mais aussi selon la rugosité du terrain, définie comme étant le niveau d'hétérogénéité du paysage en termes d'élévation.

Nous avons utilisé un modèle d'élévation numérique (MEN) créé par le centre *Earth Resources Observation and Science (EROS)*²⁸ de l'*United States Geological Survey (USGS)*. Ce modèle a une résolution de 1 km et nous avons calculé l'élévation moyenne pour chaque cellule (Fig. 6.3) ainsi que l'écart-type (représentant la rugosité) pour les 225 valeurs d'élévation (i.e. 15 km X 15 km) (Fig. 6.4).

6.2.3 *Milieux aquatiques lacustres*

Le Québec compte de nombreux lacs répartis de manière très hétérogène sur le territoire. Afin de choisir des sites qui sont similaires en termes de proportion d'eau dans les cellules de 15 km par 15 km (Fig. 6.5), nous avons utilisé les données-cadres nationales sur l'hydrographie de l'Atlas du Canada à l'échelle de 1/1 000 000 décrivant les lacs du Québec²⁹.

6.2.4 *Écosystèmes forestiers*

Les écosystèmes forestiers au Québec sont très variés et nous avons de bonnes connaissances à l'intérieur de la zone d'exploitation commerciale. Nous avons utilisé la cartographie des unités homogènes de végétation du Québec méridional³⁰ (Grondin et al. 2007) afin de décrire les écosystèmes forestiers. Étant donné que les changements climatiques risquent de perturber les écotones, c'est-à-dire les zones de transitions entre deux écosystèmes (Neilson 1993, Allen and Breshears 1998, Kullman 2002), nous avons identifié tous les écotones (Fig. 6.6) entre les 17 différentes unités homogènes de végétation (Fig. 6.7, Tableau 6.3). Les écotones sont définis comme étant les cellules où il y a plus d'une unité homogène représentée.

²⁸ http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30_info

²⁹ Téléchargé sur <http://geogratis.cgdi.gc.ca/>

³⁰ <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Grondin-Pierre/Memoire150.pdf>

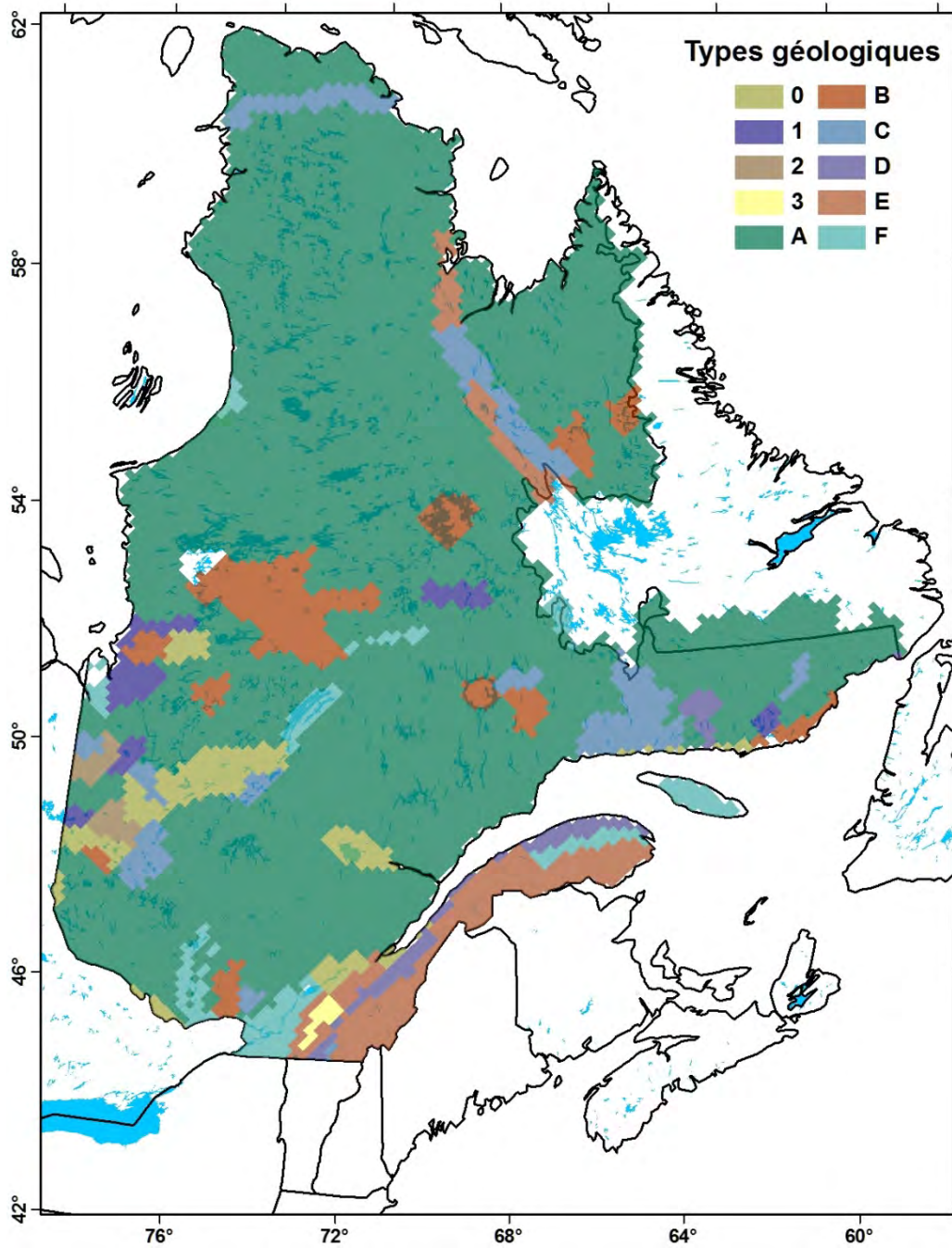


Figure 6.1. Types géologiques selon le cadre écologique de référence au 3^{ième} niveau de perception. Les données sont intégrées à la grille de 15 km de résolution. Voir Tableau 6.1 pour une description des types géologiques.

Tableau 6.1. Types géologiques selon le cadre écologique de référence.

Code	Types géologiques
A	A : Roches felsiques, intermédiaires ou gneissiques
B	B : Paragneiss
C	C : Roches mafiques ou ultra-mafiques
D	D : Roches clastiques siliceuses
E	E : Roches clastiques argileuses
F	F : Roches carbonatées

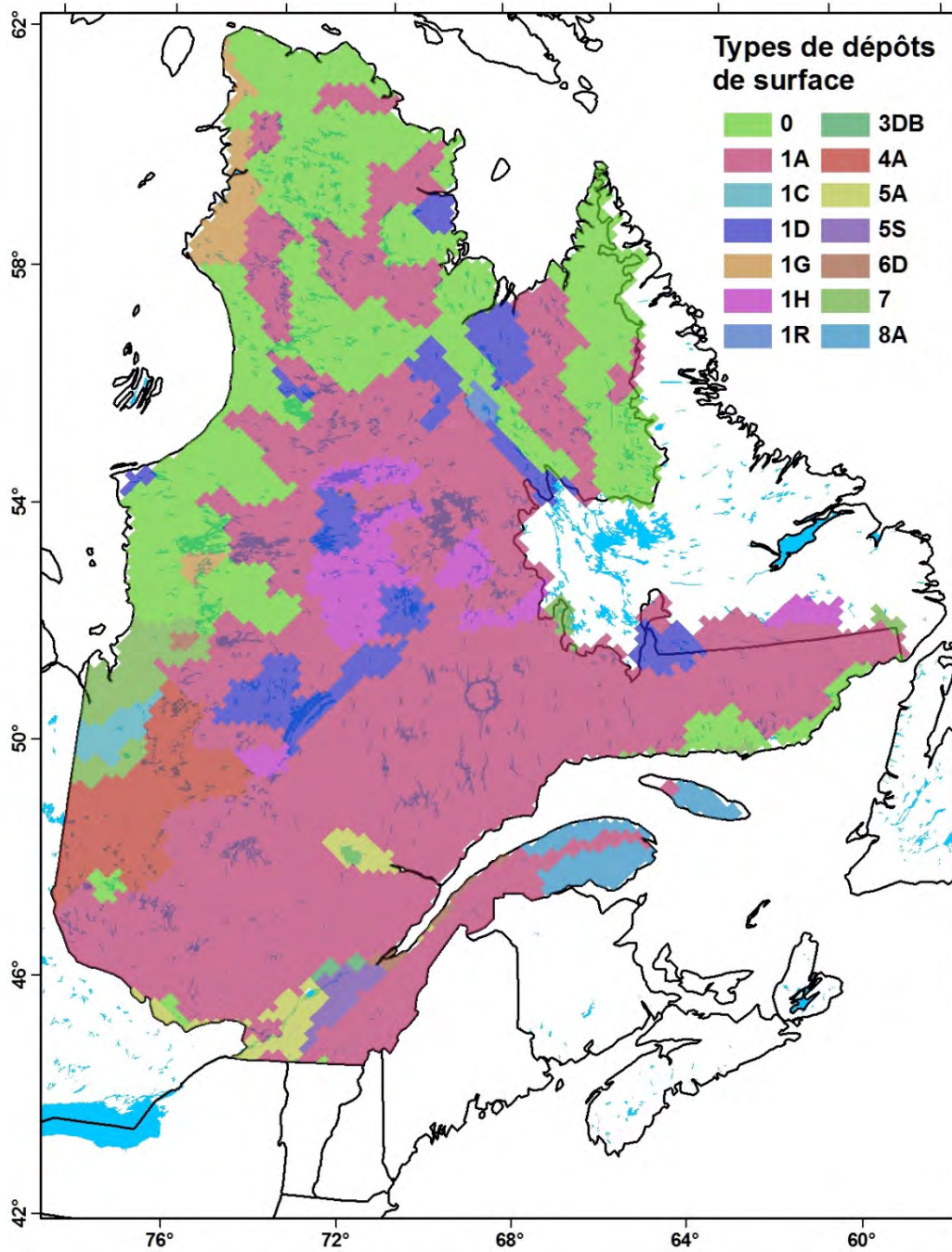


Figure 6.2. Dépôts de surface selon le cadre écologique de référence au 3^{ième} niveau de perception. Les données sont intégrées à la grille de 15 km de résolution. Voir Tableau 6.2 pour une description des dépôts de surface.

Tableau 6.2. Types de dépôts de surface selon le cadre écologique de référence.

Code	Type de dépôts de surface
8A	Altération
1CE	Moraine drumlinoïde déposé en milieu aquatique (till de Cochrane)
3DB	Alluvions deltaïques subactuelles
4A	Glacio-lacustre eau calme
5S	Glacio-marin eau agitée
6D	Littoral glacio-marin ou estuarien ancien
7	Les dépôts organiques
0	Les affleurements rocheux et placage discontinu
1D	Moraine drumlinoïde
5A	Glacio-marin eau calme
1R	Moraine de Rogen
1G	Moraine de DeGeer
1H	Moraine de décrépitude
1A	Moraine de fond sans morphologie
10AC	Marin, texture fine carbonatée = pélite carbonatée
10AS	Marin, texture fine et sableuse = pélite sableuse Marin, texture moyenne = sable fin, sable limono-argileux, sable moyen à
10S	grossier
10G	Marin, texture gravelleuse = Gravier, sable gravelleuse

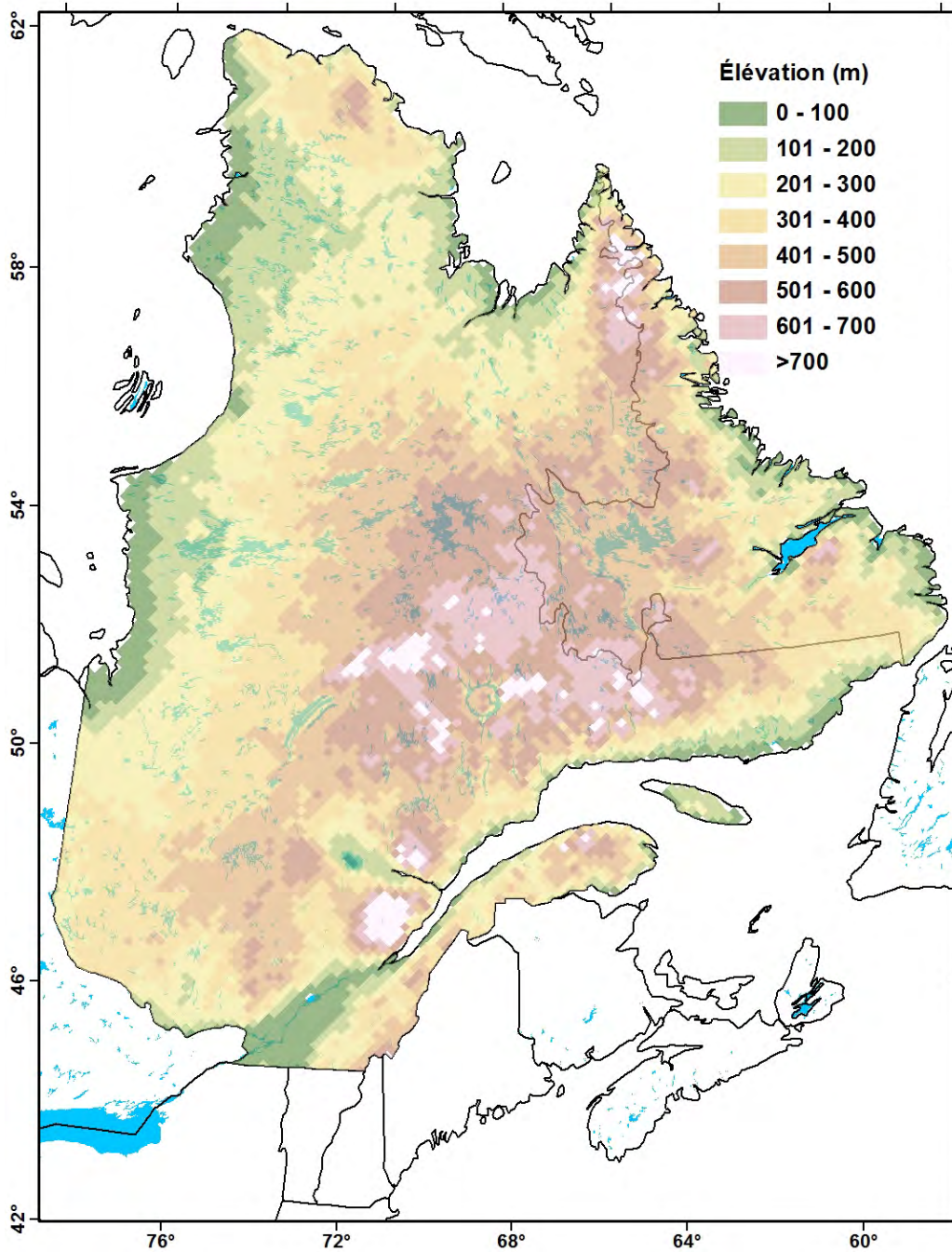


Figure 6.3. Élévation calculée par la moyenne des données EROS d'une résolution de 1 km pour chaque cellule de la grille de 15 km de résolution.

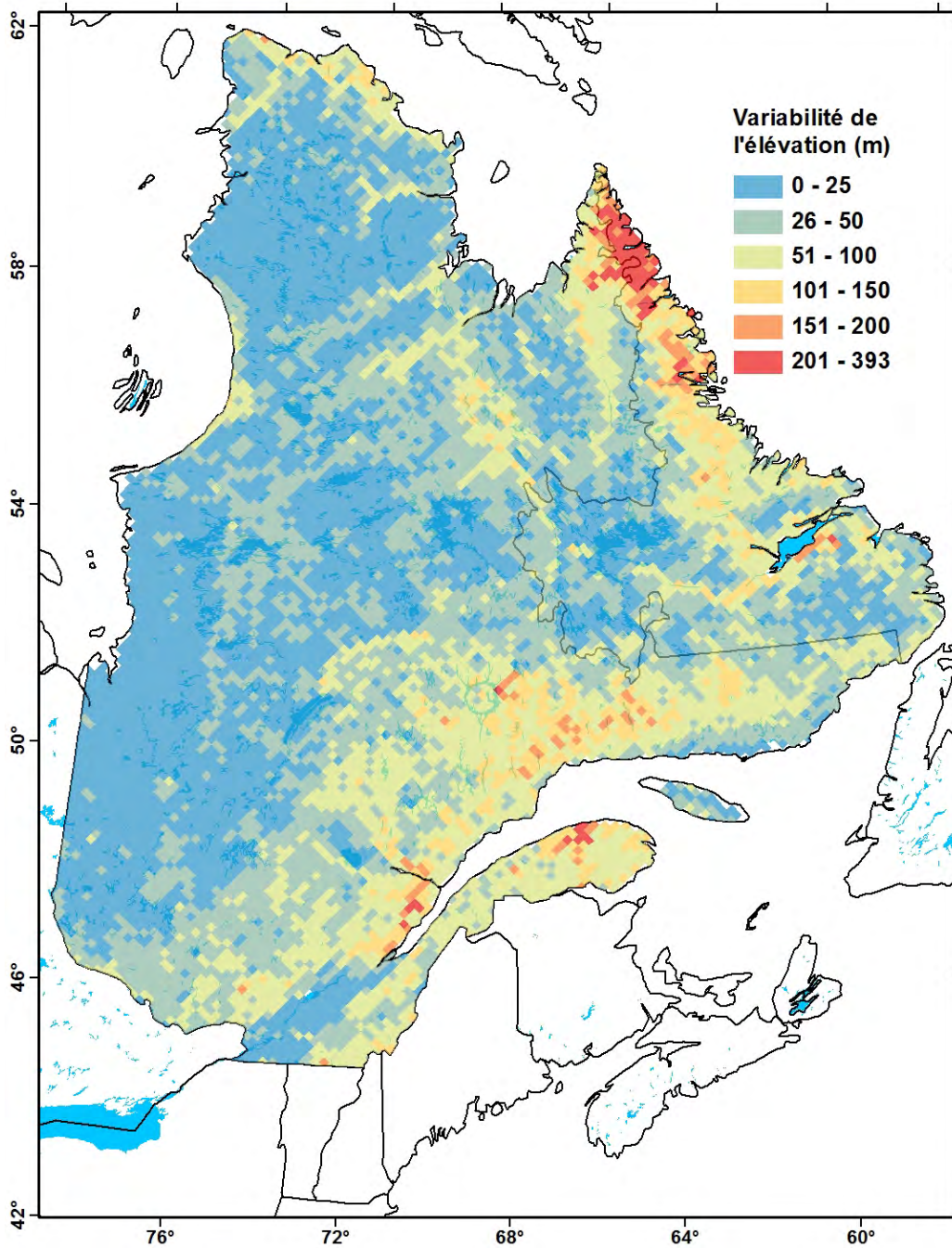


Figure 6.4. Rugosité du terrain exprimée en tant qu'écart-type des données EROS d'une résolution de 1 km pour chaque cellule de la grille de 15 km de résolution.

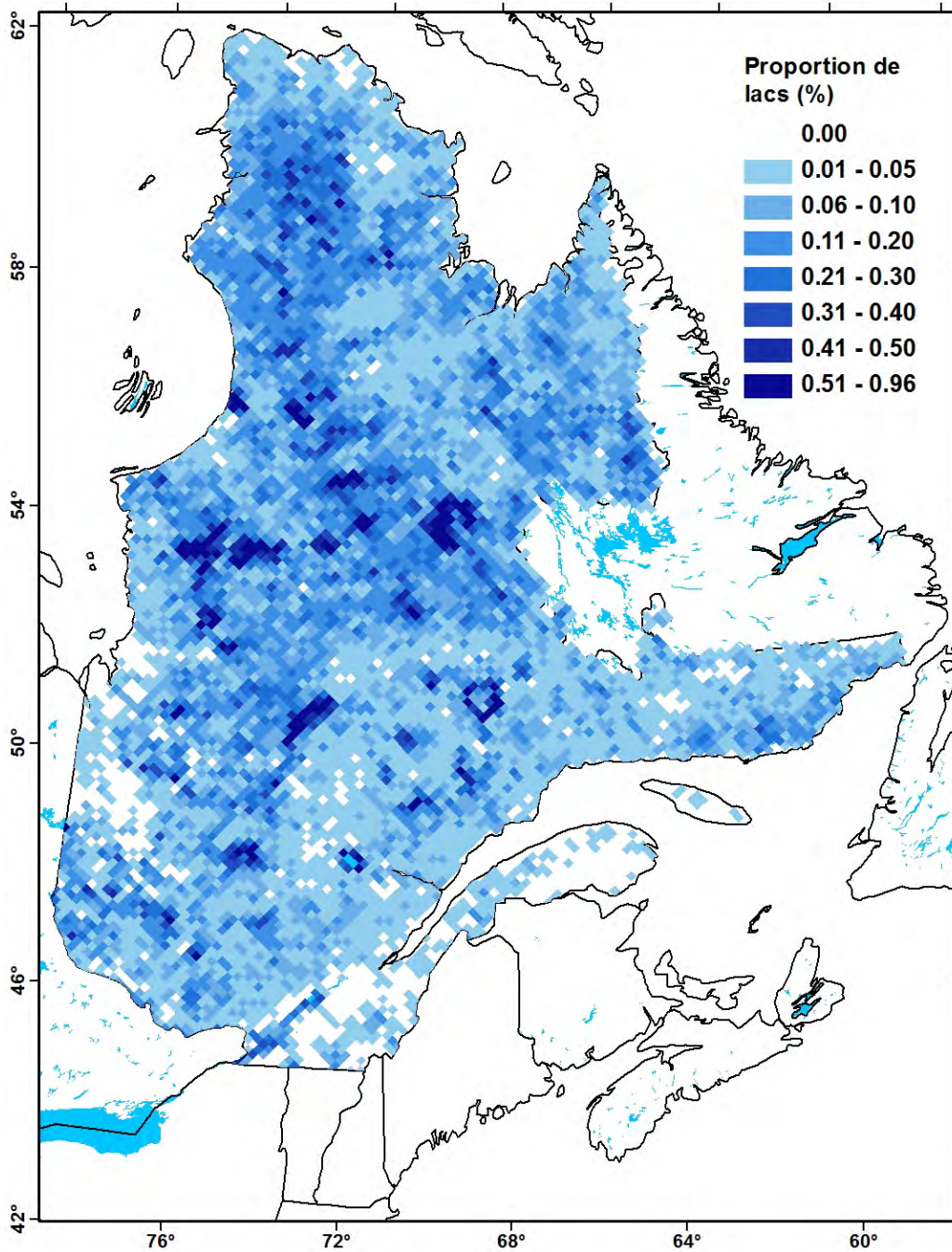


Figure 6.5. Proportion de chaque cellule de 15 km de résolution couverte par des lacs.

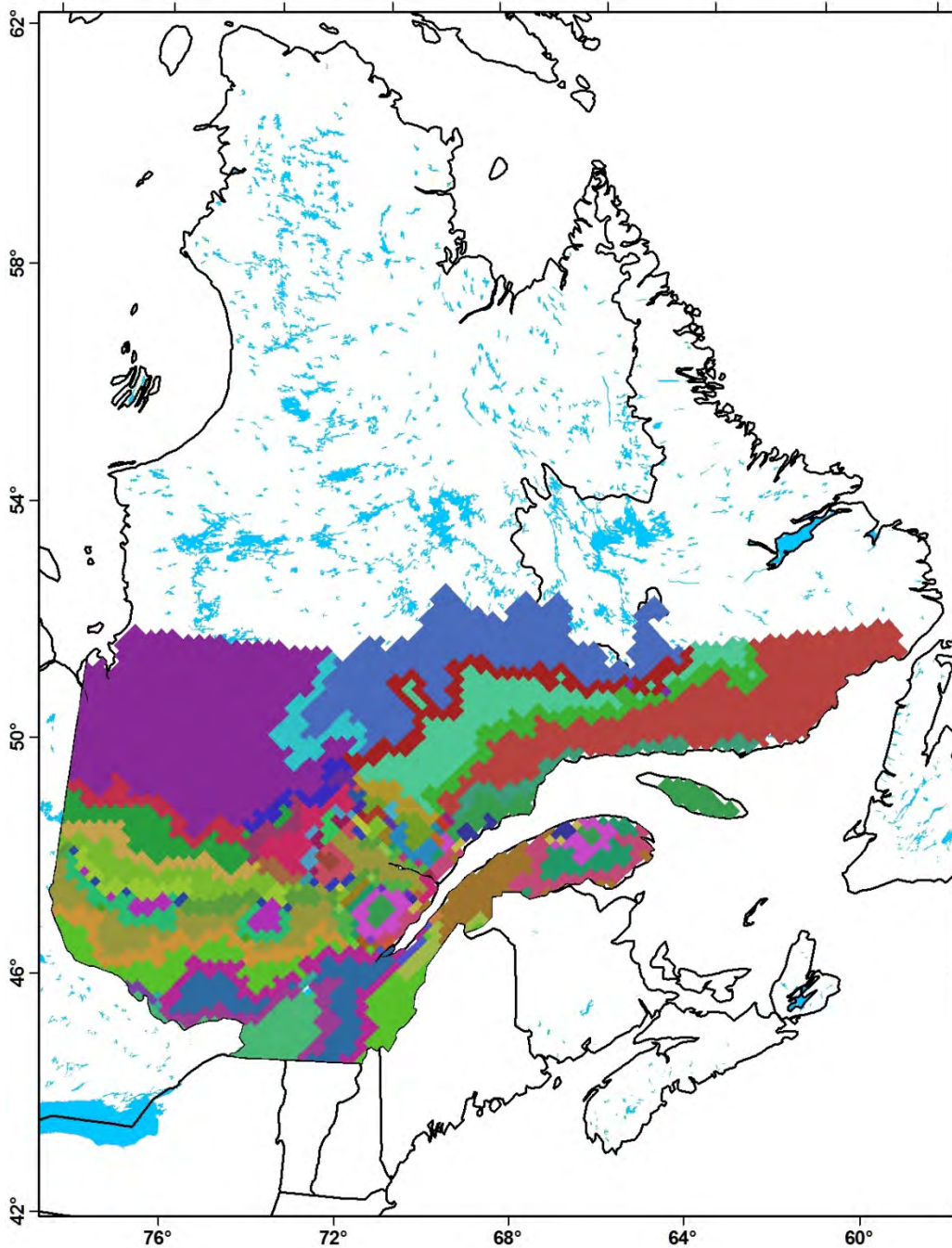


Figure 6.6. Unités homogènes de végétation du Québec méridional et zones écotonales. Les écotonales sont définies comme étant les cellules où il y a plus d'une unité homogène représentées. Voir la Figure 6.7 pour une représentation spatiale de chacune des unités homogènes sans la présence des écotonales.

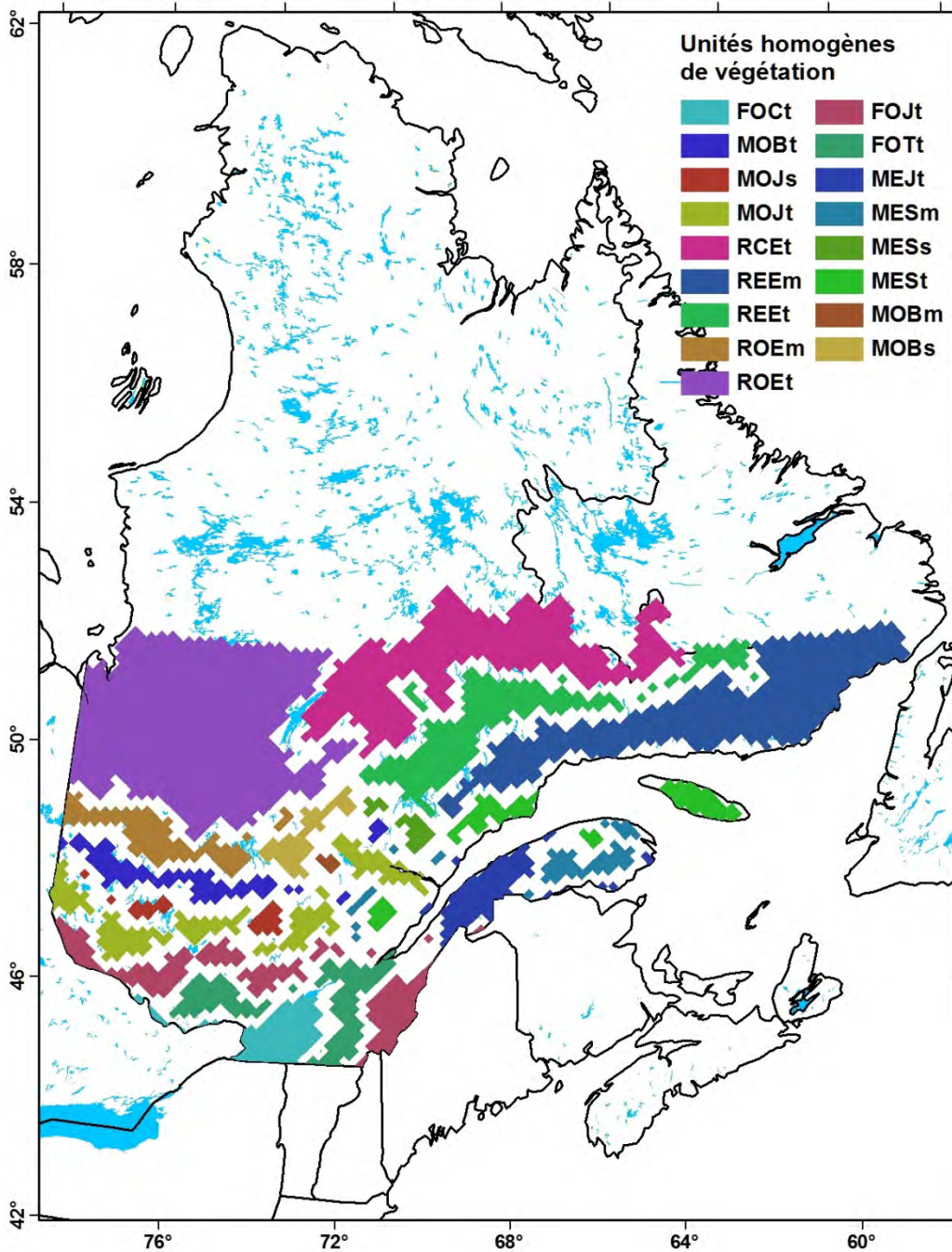


Figure. 6.7. Unités homogènes de végétation du Québec méridional sans la présence de cellules représentant des écotones. Les écotones sont définis comme étant les cellules où il y a plus d'une unité homogène représentés. Voir le Tableau 6.3 pour une description des unités homogènes.

Tableau 6.3. Unités homogènes de végétation du Québec méridional

Code	Unité homogène de la végétation
FOCt	Érable sucre et caryer cordiforme typique
FOJt	Érable sucre et bouleau jaune typique
FOTt	Érable sucre et tilleul typique
MEJt	Sapin et bouleau jaune typique
MESm	Sapin et bouleau blanc méridionale
MESs	Sapin et bouleau blanc septentrionale
MESt	Sapin et bouleau blanc typique
MOBm	Bouleau blanc et sapin méridionale
MOBs	Bouleau blanc et sapin septentrionale
MOBt	Bouleau blanc et sapin typique
MOJs	Bouleau blanc, sapin et bouleau jaune septentrionale
MOJt	Bouleau blanc, sapin et bouleau jaune typique
RCEt	Épinette noire typique
REEm	Épinette noire et sapin méridionale
REEt	Épinette noire et sapin typique
ROEm	Épinette noire et pin gris méridionale
ROEt	Épinette noire et pin gris typique

6.3 Indices de perturbations

6.3.1 Âge moyen de la forêt

Les grandes perturbations écosystémiques comme les épidémies d'insectes ravageurs, les feux de forêts, les coupes forestières et les chablis façonnent le paysage et les communautés biologiques (Attiwill 1994) de sorte que l'impact des CC sur la biodiversité puisse être masqué par de telles perturbations. Nos connaissances de ces événements perturbateurs sont le plus souvent basées sur des observations a posteriori de l'âge moyen de la forêt et du type de perturbation. Bien que le stade de succession d'un peuplement donné puisse varier en fonction du type de perturbation (Attiwill 1994), cette information n'est pas toujours disponible et nous utilisons donc seulement l'âge moyen de la forêt comme indice du stade de succession.

Nous utilisons une base de données de l'âge moyen de la forêt en Amérique du Nord créée à partir de plusieurs sources (Fig. 6.8). L'inventaire forestier national (IFN) du Canada, la Base nationale de données sur les feux de forêt du Canada (BNDFFC) ainsi que les données du senseur VEGETATION sur le satellite SPOT44. Les données d'âge sont disponibles à une résolution de 1 km. La méthodologie complète est disponible dans Pan *et coll.* (2011).

Ces perturbations étant souvent stochastiques tant dans le temps que dans l'espace, il est possible que des sites ayant des âges similaires, et donc comparables pour le programme de suivi, soient de nouveau perturbés et doivent être retirés du suivi. De plus, il va sans dire que les sites situés dans les zones d'exploitation forestières ne devront pas subir de coupes ou bien ils devront être comparés à d'autres sites ayant la même dynamique temporelle de coupes forestières.

6.3.2 Les zones agricoles

Le Québec agricole représente environ 63 000 km², soit un peu moins de 5% du territoire québécois. De plus, la production agricole est concentrée dans la vallée du St-Laurent, l'ouest de l'Abitibi-Témiscaminque ainsi qu'autour du Lac St-Jean. La sélection de sites de suivi en milieu agricole implique donc une assez forte proximité des sites et donc des CC relativement homogènes entre les sites. Cette contingence spatiale diminue le pouvoir de détection des impacts des CC sur la biodiversité.

Nous avons utilisé les données de la zone agricole (© Gouvernement du Québec) produites par la Commission de protection du territoire agricole (CPTAQ)(Fig. 6.9). Les données numériques sont à l'échelle 1 : 20 000 et sont basées sur la base de données topographiques du Québec, la compilation cadastrale, ainsi que les cartes officielles de la limite de la zone agricole.

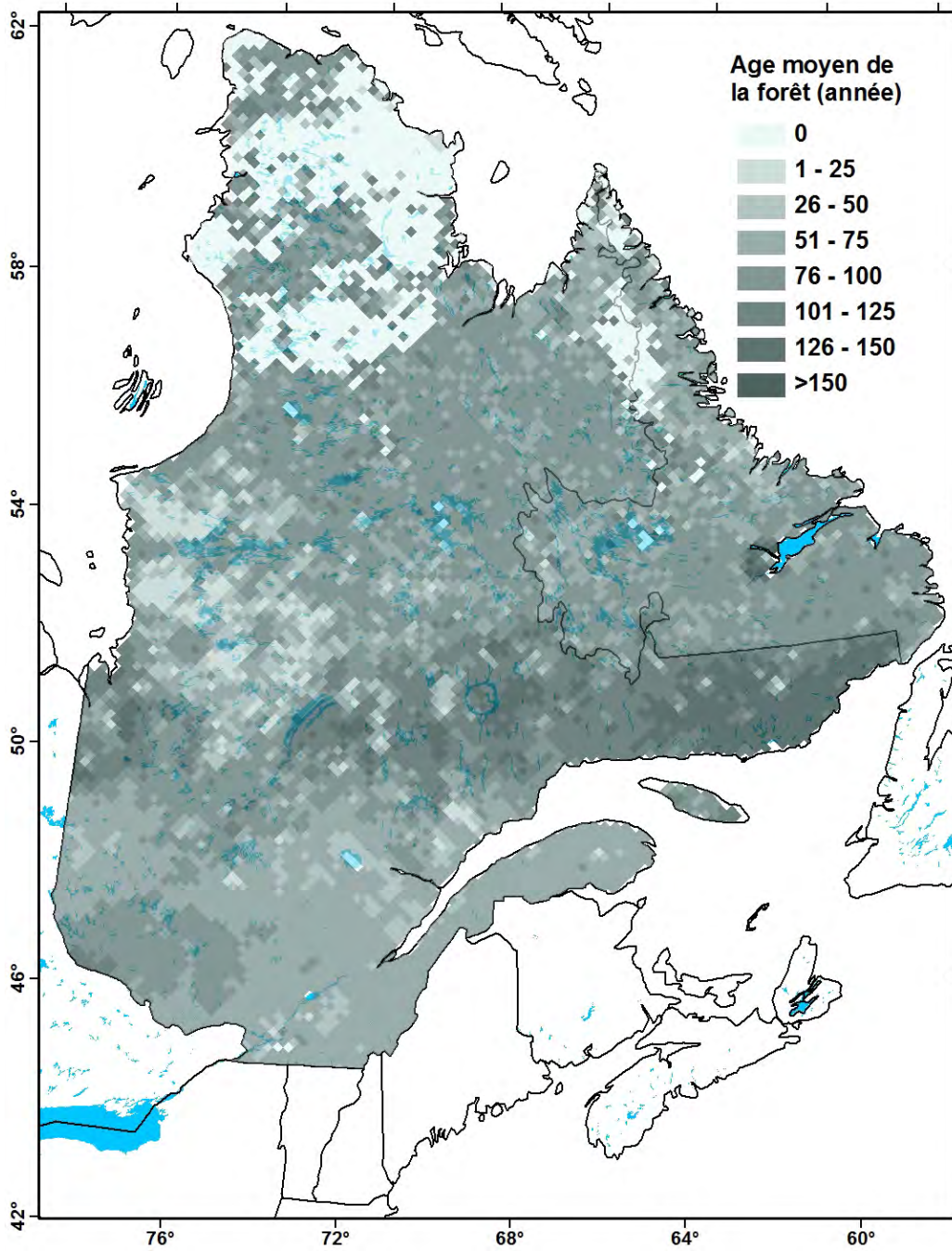


Figure. 6.8. Âge moyen de la forêt au Québec intégré à la grille de 15 km de résolution.

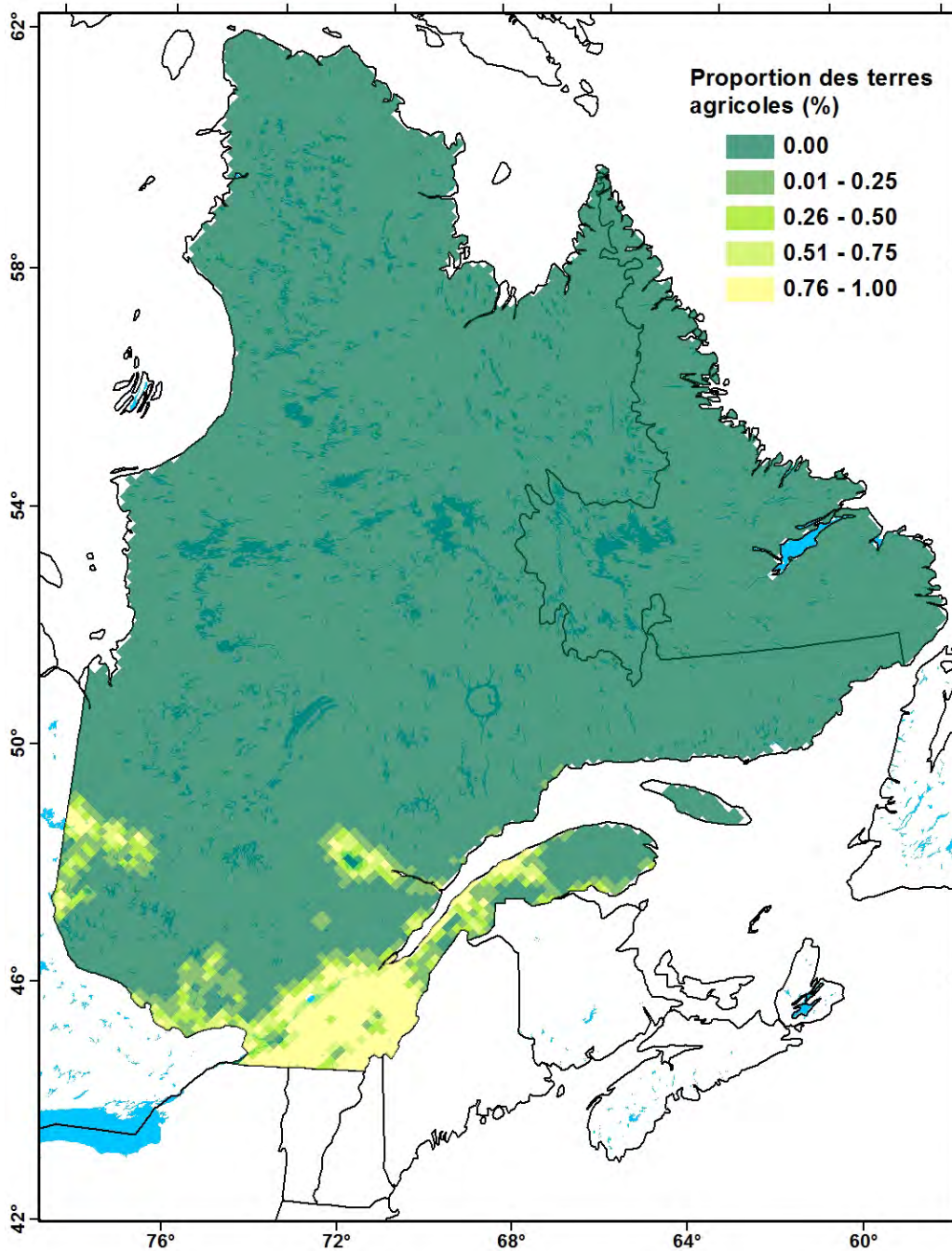


Figure. 6.9. Proportion des terres agricoles par cellule selon les données de la Commission de protection du territoire agricole (CPTAQ) (© Gouvernement du Québec). Les données sont intégrées à la grille de 15 km de résolution.

6.4 Indices de facilité à l'échantillonnage

6.4.1 *Les aires protégées*

Le suivi de la biodiversité dans un contexte de CC peut très bien s'arrimer avec les suivis déjà existants dans le réseau d'aires protégées du Québec. En se faisant, le suivi peut informer les gestionnaires et les aider à prendre des décisions informées pour leur politique de gestion des aires protégées. Nous avons utilisé les données de la couverture spatiale des aires protégées en 2012 selon le MDDEFP et nous avons calculé la proportion de chaque cellule faisant l'objet de protection (Fig. 6.10).

6.4.2 *Les placettes-échantillons permanentes*

Les placettes-échantillons permanentes du MRNF représentent un réseau de plus de 12 000 sites où sont prises des mesures sur les mêmes arbres tous les 10 ans. À l'intérieur de chaque unité d'une superficie de 400 m², chaque individu est identifié au niveau de l'espèce et plusieurs mesures de croissance et de condition physique sont faites. Ces placettes peuvent donc facilement être visitées afin de mesurer d'autres caractéristiques de la biodiversité (p.ex. des données sur la faune) afin de répondre au besoin du suivi de la biodiversité dans un contexte de CC. Nous avons calculé le nombre de placettes-échantillons permanentes dans chaque cellule de la grille (Fig. 6.11).

6.4.3 *Proximité des bureaux du MRNF*

Le MRNF comporte 78 bureaux à travers le Québec et le plan de suivi de la biodiversité sera plus efficace s'il minimise les déplacements requis pour échantillonner des sites similaires. Nous avons utilisé les adresses postales de tous les bureaux régionaux listés sur le site du MRNF afin d'estimer la distance minimale entre chaque cellule et les bureaux du MRNF (Fig. 6.12).

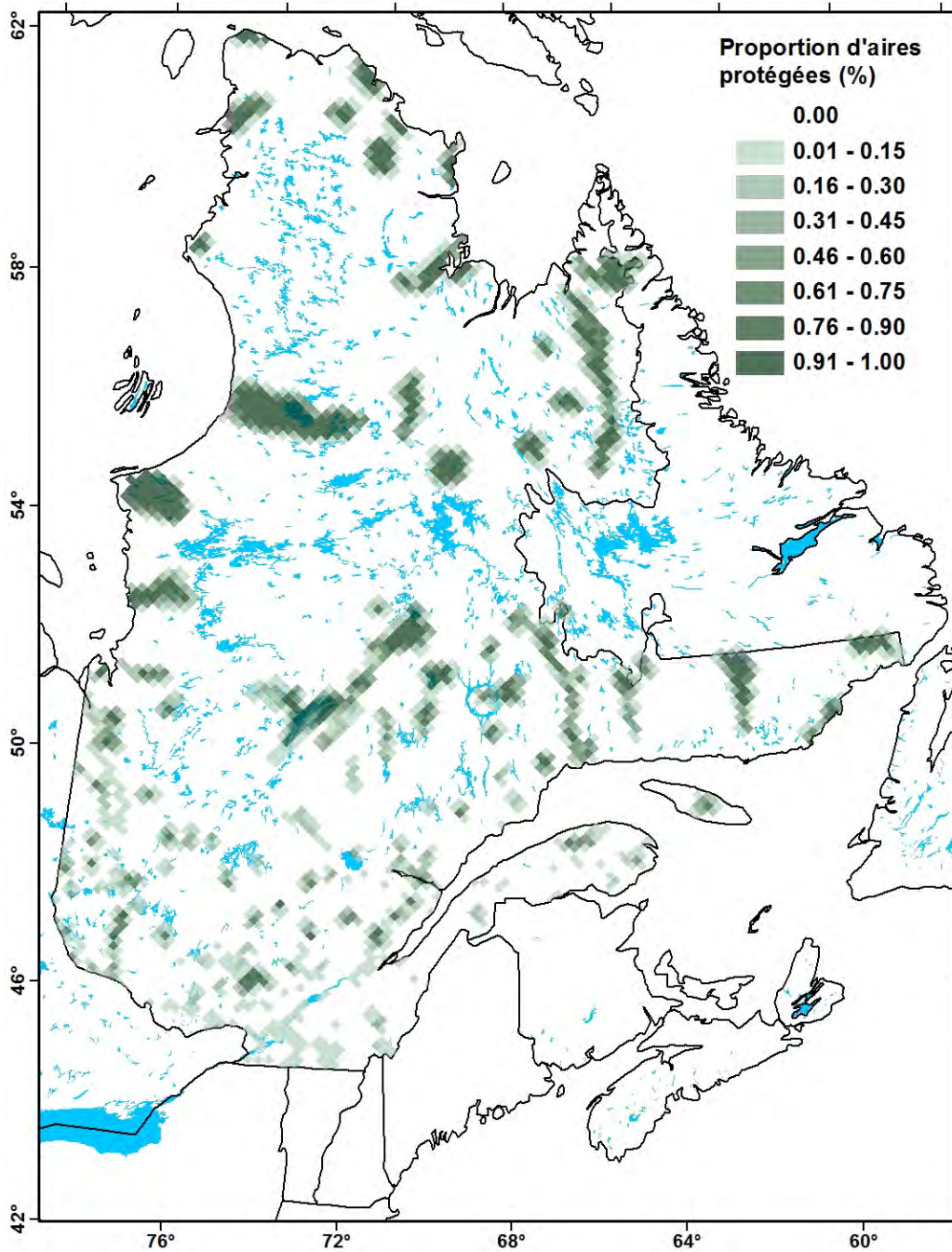


Figure 6.10. Proportion d'aires protégées dans chaque cellule de 15 km de résolution selon les données de MDDEFP.

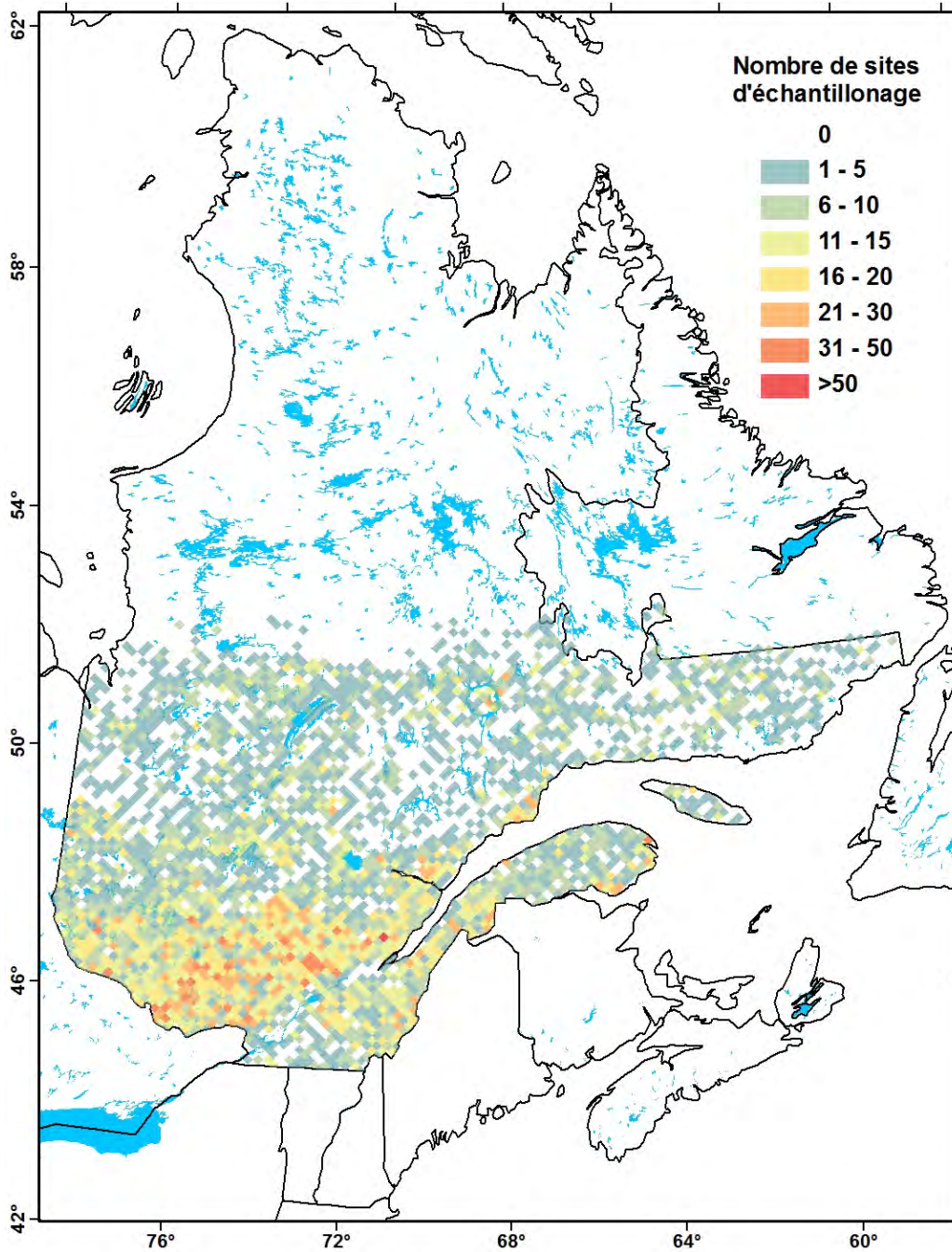


Figure 6.11. Nombre de placettes-échantillons permanents du MRNF dans chaque cellule de 15 km de résolution.

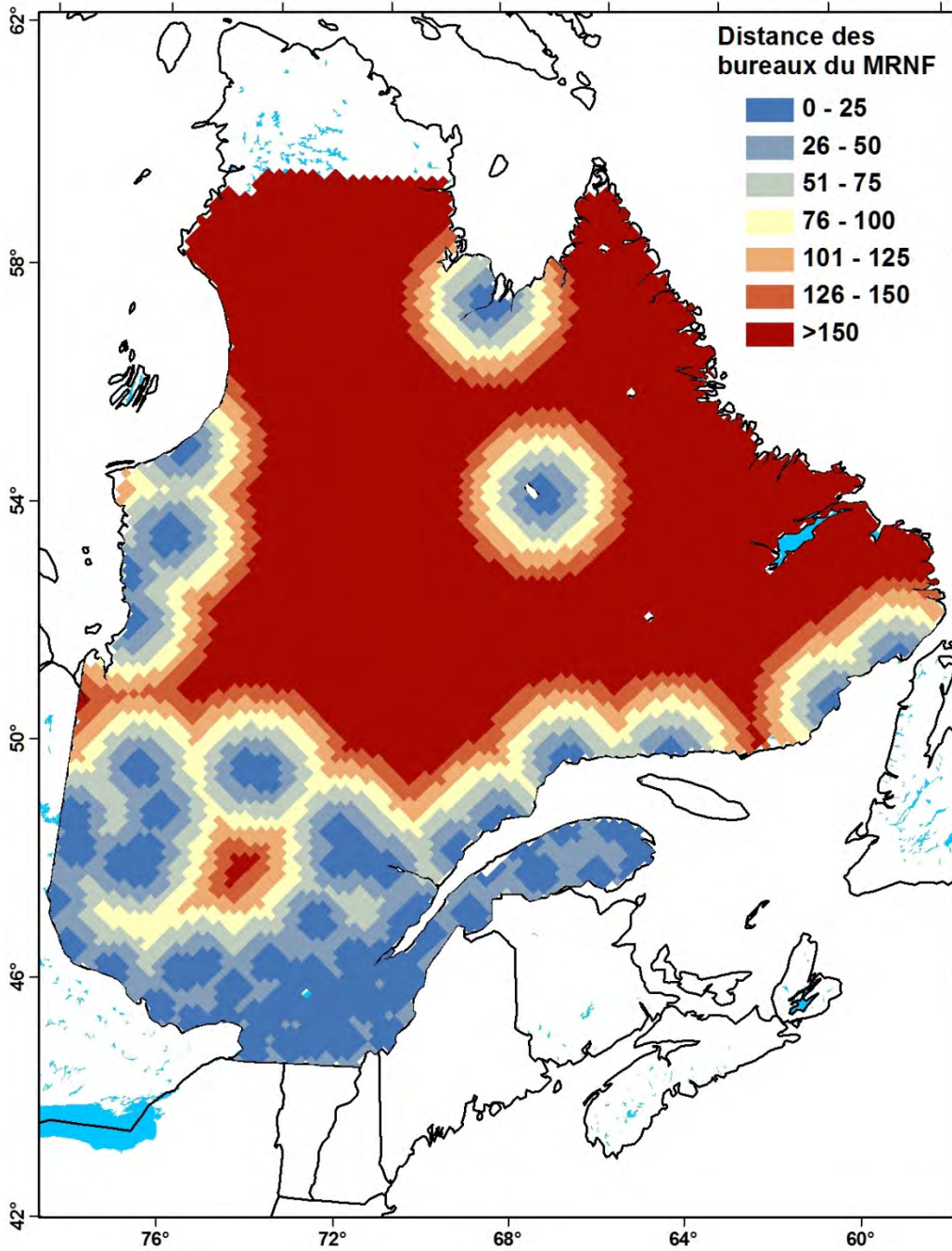


Figure 6.12. Distance minimale (en km) entre chaque cellule et un des 78 bureaux du MRNF.

6.5 Cadre décisionnel quantitatif pour la localisation de sites de suivi de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques (CC)

Grâce aux sessions de consultations et au développement de l'expertise au sein de l'équipe de recherche durant ce projet, il est devenu évident que la meilleure stratégie n'était pas de créer un seul réseau de sites de suivi de manière finale. Bien que cette décision soit en apparence contradictoire avec le mandat de ce projet, elle nous apparaît comme essentielle pour plusieurs raisons. La méthode quantitative de sélection de sites de suivi que nous proposons permet de générer plusieurs scénarios de suivi selon un éventail de critères qui se doivent d'être déterminés selon les priorités de nos partenaires lorsque le programme de suivi débutera. Le cadre décisionnel que nous proposons repose sur un outil électronique de consultation dynamique et itératif qui permet aux décideurs d'incorporer leurs connaissances sur la biodiversité afin d'obtenir une couverture spatiale du programme de suivi qui maximise les gains de connaissances en fonction de leurs priorités de suivi. Cet outil décisionnel est préférable à une approche avec un ou quelques scénarios définitifs pour deux raisons principales. Premièrement, il permet d'actualiser les scénarios d'échantillonnages en fonction de nouvelles données plus précises (p. ex. sur les CC où les modèles prédictifs sont en constante évolution). Deuxièmement, de nouvelles priorités pourront être prises en compte, comme, par exemple, des données spatialement explicites sur les services écosystémiques qui seraient pertinentes pour la sélection de sites de suivi. Ainsi, nous croyons que tant l'approche quantitative que nous avons développée que l'approche de consultation dynamique permettront d'instaurer un programme de suivi innovateur et que cette stratégie pourra être utilisée pour d'autres types programmes de suivi (p. ex. pour les espèces menacées, l'eutrophisation des milieux d'eaux douces, etc.).

Notre outil décisionnel est un logiciel de consultation qui considère plusieurs éléments pertinents pour suivre les impacts des CC sur la biodiversité tels que les scénarios de climats futurs, le type d'environnement ciblé, les perturbations anthropogéniques et naturelles, ainsi que l'effort d'échantillonnage possible. Cet outil offre à l'utilisateur trois niveaux de contrôle principaux. Premièrement, il est possible de cibler les régions avec plus ou moins de CC selon les analyses de la section 5.5. Deuxièmement, l'utilisateur peut choisir certains critères environnementaux (voir section 6.2 à 6.4) et attribuer une importance relative à chacun de ces critères selon les priorités politiques. Finalement, le nombre de sites est déterminé par l'utilisateur ce qui permet d'élaborer des scénarios réalistes dans le cadre budgétaire du programme de suivi. Le cadre dynamique de cet outil, où l'usagée indique ses priorités et obtient des cartes géographiques avec une sélection optimale de sites de suivi, permet de comparer différents scénarios et de prendre des décisions informées par les besoins et les capacités d'échantillonnage. De plus, le caractère très visuel de cet outil (il génère des cartes sans avoir besoin d'outils SIG externes) devrait faciliter l'atteinte d'un consensus entre les différents experts sur le meilleur scénario d'échantillonnage puisque les priorités de chacun ne peuvent converger parfaitement.

6.5.1 Mise à jour des données de l'outil

Puisque l'échafaudage du programme de suivi est complexe et que les connaissances sur les CC et la biodiversité s'améliorent constamment, notre outil permet de mettre à jour les données sous-jacentes à tout moment. Voici une liste non exhaustive des données qui pourraient nécessiter une

mise à jour et certaines problématiques générales en ce qui concerne la localisation géographique des sites de suivi de la biodiversité. L'outil permet aussi d'ajouter facilement d'autres facteurs qui n'ont pas été considérés dans la présente étude, mais qui peuvent être jugés pertinents par les décideurs.

1. Les modèles climatiques sont en constante évolution et le programme de suivi devrait s'assurer d'avoir les prédictions du climat futur les plus fiables. Par exemple, un modèle régional du climat avec une résolution de 15 km (au lieu de la résolution actuelle de 45 km) est en développement par le consortium Ouranos. Il serait important de garder à jour les analyses des CC du programme de suivi compte tenu de sa nature très régionale.
2. L'évolution des modèles de CC implique que le plan d'échantillonnage doit être modifié pour refléter les nouvelles prédictions climatiques. Il est possible que certaines régions deviennent ciblées comme étant à fort risque de CC sévères et, selon le financement, l'inclusion de ces régions dans le programme de suivi serait pertinente. Au contraire, certaines régions pourraient ne pas subir des CC aussi sévères que prévus et pourraient être éliminées du programme de suivi.
3. Notre outil décisionnel utilise plusieurs facteurs qui influencent la biodiversité et, bien que la plupart de ces facteurs ne devraient pas changer dans le futur, certains facteurs possèdent une incertitude qui devrait diminuer dans le futur compte tenu de la recherche en cours. Par exemple, les unités homogènes forestières (section 6.2) pourraient devenir disponibles au nord de la limite de la forêt exploitée.
4. Le nombre de régions ciblées puisqu'il est essentiellement influencé par les subventions attribuées au projet, et ces subventions peuvent être variables dans le temps.
5. Étant donné que le nombre de sites d'échantillonnage est limité par les budgets disponibles, il est possible que de nouveaux critères de priorités non prévus (p. ex. de nouvelles routes, aires protégées, territoires autochtones, programmes de suivi) forcent nos partenaires à modifier leur plan d'échantillonnage. Notre outil dynamique d'aide à la décision permet dans ce cas d'alimenter la discussion entre les décideurs et les autres acteurs, mais aussi d'utiliser les techniques de système d'informations géographiques (SIG) afin d'établir un consensus. En effet, l'utilisation de SIG et l'amalgame de plusieurs scénarios sous forme de cartes géographiques peuvent faciliter l'obtention d'un consensus entre différents acteurs.

6.5.2 Protocole quantitatif pour définir les scénarios de suivi

La complexité du protocole est énorme dû à la complexité des trois composantes principales étudiées (les CC, les aspects écosystémiques, et le nombre de cellules géographiques plus de 6000). Une telle combinaison nous offre littéralement plusieurs milliards de possibilités et, étant donné que le programme de suivi devrait être mis en place dans un avenir proche, nous devons trouver une manière d'optimiser la sélection de sites sans avoir à les calculer de manière individuelle (ce qui serait numériquement impossible d'ailleurs). Le défi était donc de développer des outils d'optimisation basés sur des algorithmes de contraintes et d'études par grappes qui réduisent le nombre de possibilités de sites d'échantillonnages tout en maximisant l'influence des critères jugés pertinents par les décideurs. Notre protocole est basé sur quelques

règles qui ont été établies lors des consultations avec les décideurs et les experts dans le cadre du projet CC-Suivi :

1. Identifier des cellules de la grille climatique où l'indice de similarité climatique (section 5.5) est faible, moyen, ou élevé. Les résultats dans ce rapport utilisent des pourcentages de 0-5%, 47.5-52.5%, et 95-100% (Figure 6.13) mais ces seuils peuvent être modifiés à la guise de l'utilisateur. Cette règle restreint le nombre de cellules de la grille climatique pour les analyses subséquentes de 6936 cellules couvrant le Québec à 1200 cellules candidates à être suivies. Il est à noter que le nombre de cellules considérées est fonction du pourcentage pour chaque catégorie de similarités climatiques (1200 cellules pour 5% par catégorie, mais 2400 cellules pour 10% par catégorie).
2. À l'intérieur de chaque classe d'indice de similarité climatique, nous choisissons des cellules selon la variabilité de différents indices écosystémiques (p. ex. prévalence agricole, type de forêt, élévation; voir section 6.2 et 6.3). Cette étape est essentielle puisque les impacts des CC seront probablement modulés par ces indices écosystémiques. Notre protocole permet donc de trouver les cellules qui vont subir différents CC tout en ayant des propriétés écosystémiques comparables. Naturellement, les écosystèmes ne sont pas parfaitement équilibrés et nous optimisons la sélection de sites pour minimiser spatialement ces biais.
3. Nos connaissances sur les indices écosystémiques sont imparfaites et certains indices sont qualitatifs alors que d'autres sont quantitatifs. De plus, leurs importances sont basées sur des jugements de valeur et des politiques. Notre protocole permet d'ajuster l'importance de chacun de ces indices en leur attribuant des poids afin d'ajuster la sélection de sites de suivi selon ces critères subjectifs. Par exemple, les aires protégées peuvent être considérées plus importantes pour le suivi que les terres agricoles. Ces décisions doivent être prises par les décideurs et sont sujettes à des modifications selon les politiques contemporaines.
4. Dans certaines régions plusieurs cellules peuvent avoir des indices écosystémiques équivalents (p. ex., les cellules 1 à 100 ont les mêmes valeurs pour la majorité des facteurs). Or, ces cellules peuvent différer à d'autres niveaux inconnus, mais importants pour la biodiversité. Afin de minimiser cette incertitude, notre protocole maximise la couverture spatiale des sites potentiels à l'intérieur d'une région avec un même indice écosystémique.
5. Le nombre de sites de suivi choisis au travers les régions est décidé par l'utilisateur ce qui se traduit par une liberté de sélection de scénarios en fonction des budgets possibles pour le programme de suivi.

6.6 Utilisation de l'outil

L'outil ne peut être décrit de manière exhaustive dans ce rapport puisqu'il comporte plusieurs composantes statistiques (p. ex. analyse de composantes principales, analyses par grappes, modèles spatiaux stochastiques et algorithmes d'optimisations). Par contre, il a été conçu dans l'environnement Matlab et les routines sont disponibles à l'annexe H qui est fournie à part du document principal. Bien que l'outil requiert beaucoup de puissance informatique, nous espérons pouvoir démontrer que son utilisation demande peu de connaissance et sommes ouvert à

développer des séances de formation sur le sujet. Ces séances seront parties prenantes du programme de transfère de technologies de la Chaire de recherche du Canada en Modélisation spatiale et Biodiversité de Pedro Peres-Neto.

6.7 Scénarios de sélections de sites de suivi

Afin de mieux comprendre l’outil proposé, nous décrivons cinq scénarios d’importances relatives des indices écosystémiques. Les résultats de ces cinq scénarios sont décrits dans les figures 6.14 à 6.18. Le premier scénario (Fig. 6.14) représente l’absence de priorité de critères non climatiques, ce qui correspond à des poids égaux pour chaque catégorie d’indices écosystémiques. Le second scénario (Fig. 6.15) donne une priorité relative à l’agriculture avec un poids 10 fois plus important que les autres indices écosystémiques. Le troisième scénario (Fig. 6.16) donne une priorité relative à la proportion de lacs avec un poids 10 fois plus important que les autres indices écosystémiques. Le quatrième scénario (Fig. 6.17) donne la priorité seulement aux aires protégées avec un poids de 1 tandis que les autres indices écosystémiques ont un poids nul. Le cinquième scénario (Fig. 6.18) donne des poids de 2 à l’âge des forêts, l’élévation et la proportion de lacs, et un poids de 1 aux aires protégées et à la rugosité du terrain.

Ces scénarios permettent de voir que l’importance des CC est priorisée avec cet outil, puisque la sélection des sites est relativement homogène à la grandeur de la province, mais qu’il est possible d’optimiser les scénarios selon les priorités écosystémiques. Ce bref exemple de scénarios possibles a seulement pour but de démontrer la versatilité de l’outil décisionnel. De plus amples analyses informées par les priorités des partenaires seront requises afin d’obtenir les sites de suivi de la biodiversité les plus pertinents dans un contexte de changements climatiques.

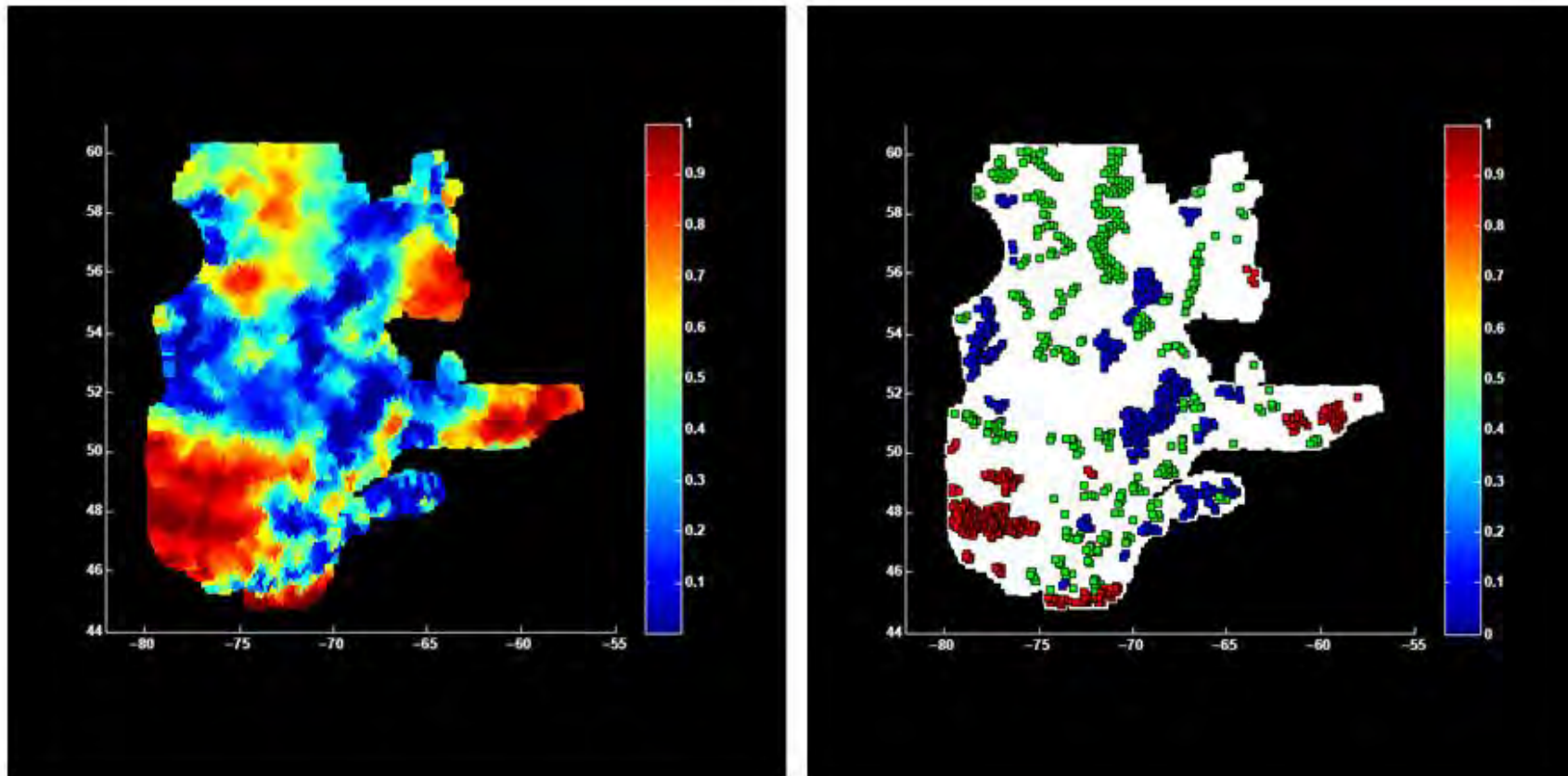


Figure 6.13. Indice de similarité climatique (à gauche) représentant les régions où le climat futur est très similaire (bleu), assez similaire (vert), ou peu similaire (rouge) au climat du passé récent. Cette figure est identique à la figure 5.42, mais elle est incluse ici pour faciliter l'interprétation du panneau de droite. Le panneau de droite représente les cellules sélectionnées comme candidates pour le suivi de la biodiversité et a le même code de couleur que le panneau de gauche. Ces cellules sont par la suite soumises à une sélection selon des critères écosystémiques pour arriver aux sites de suivi optimaux selon les CC et les priorités des décideurs.

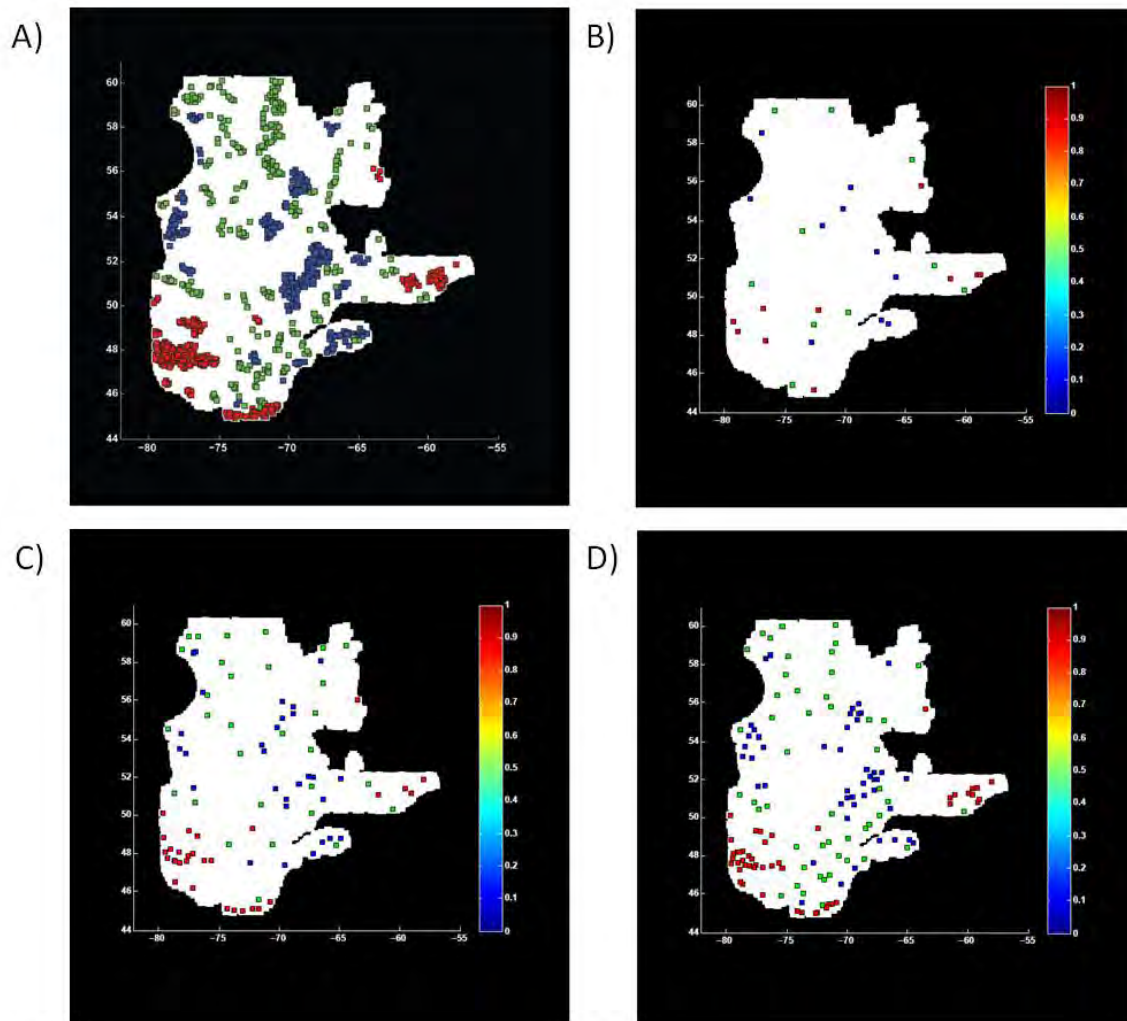


Figure 6.14. Scénario de choix de sites de suivi de la biodiversité dans un contexte de CC basé sur l'absence de priorité de critères non climatiques, ce qui correspond à des poids égaux pour chaque catégorie d'indices écosystémiques. Le panneau A) représente l'analyse en grappes des données écosystémiques, suggérant trois grandes distinctions entre les écosystèmes. Les panneaux B), C), D), représentent le choix de sites pour 10, 30, et 50 sites par indice de similarité climatique (les sites en bleu ont un grand indice de similarité climatique, les sites en vert représentent un indice moyen et les sites en rouge un faible indice de similarité climatique).

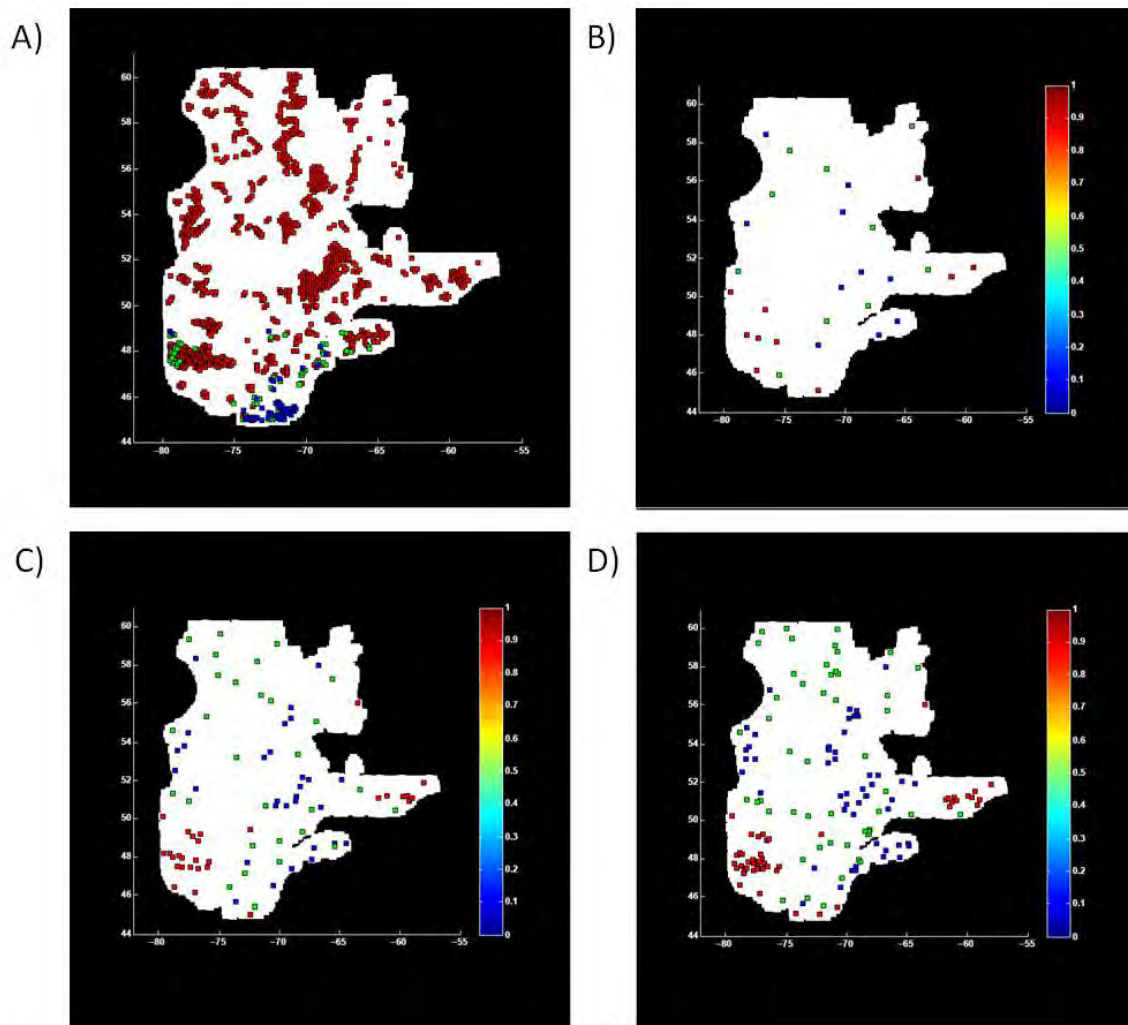


Figure 6.15. Scénario de choix de sites de suivi de la biodiversité dans un contexte de CC basé sur une priorité relative à l'agriculture avec un poids 10 fois plus important que les autres indices écosystémiques. Le panneau A) représente l'analyse en grappes des données écosystémiques, suggérant trois grandes distinctions entre les écosystèmes. Les panneaux B), C), D), représentent le choix de sites pour 10, 30, et 50 sites par indice de similarité climatique (les sites en bleu ont un grand indice de similarité climatique, les sites en vert représentent un indice moyen et les sites en rouge un faible indice de similarité climatique).

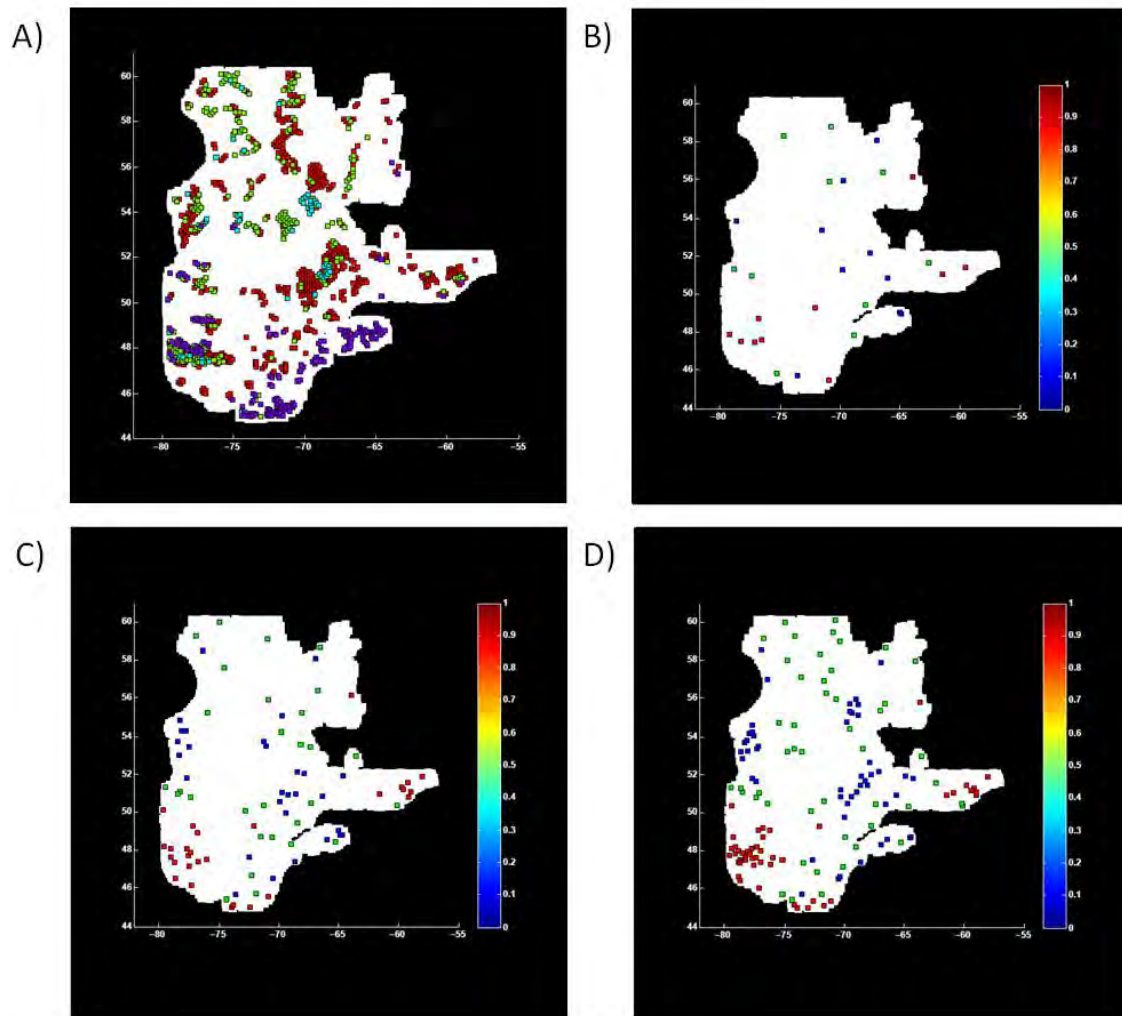


Figure 6.16. Scénario de choix de sites de suivi de la biodiversité dans un contexte de CC basé sur une priorité relative à la proportion de lacs avec un poids 10 fois plus important que les autres indices écosystémiques. Le panneau A) représente l'analyse en grappes des données écosystémiques, suggérant quatre grandes distinctions entre les écosystèmes. Les panneaux B), C), D), représentent le choix de sites pour 10, 30, et 50 sites par indice de similarité climatique (les sites en bleu ont un grand indice de similarité climatique, les sites en vert représentent un indice moyen et les sites en rouge un faible indice de similarité climatique).

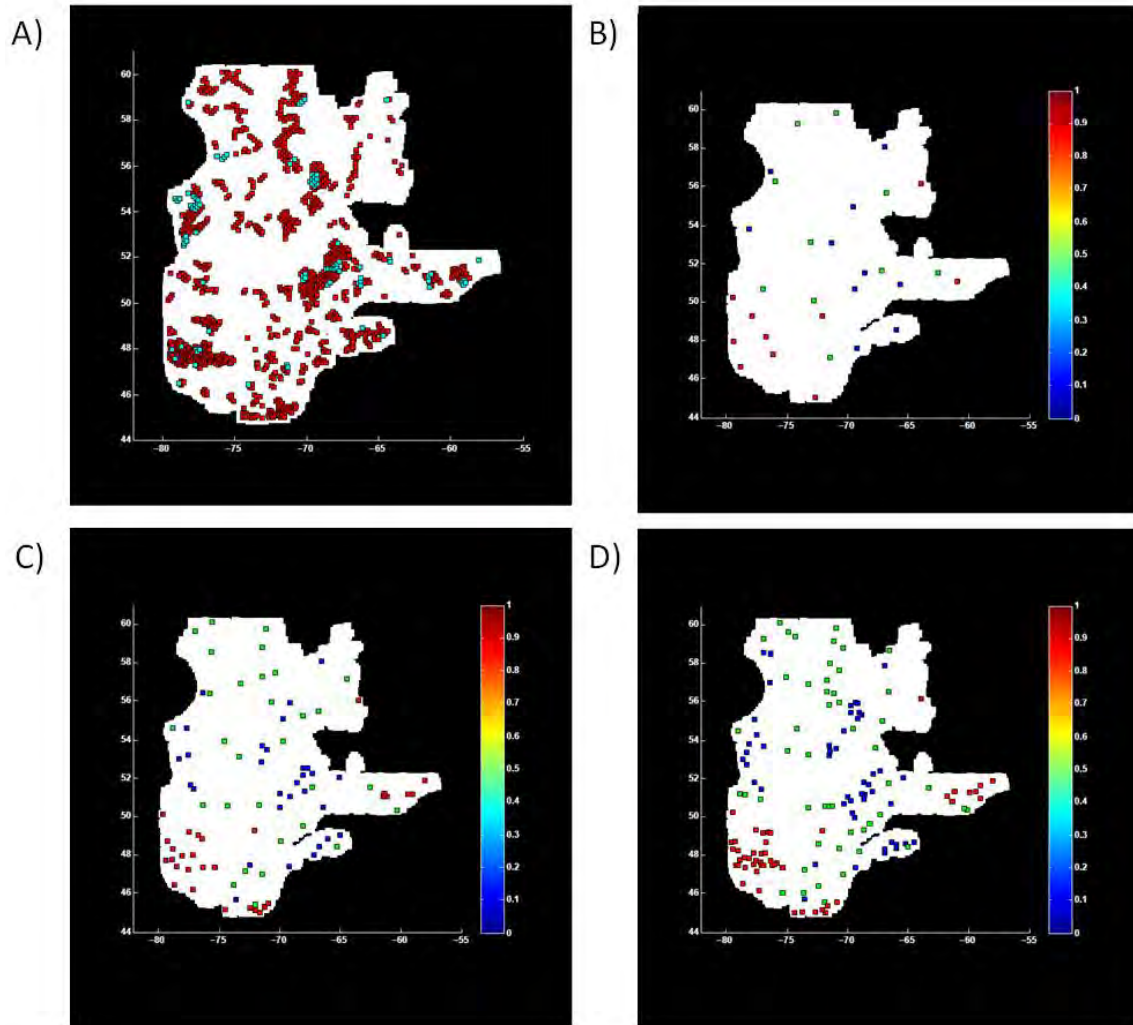


Figure 6.17. Scénario de choix de sites de suivi de la biodiversité dans un contexte de CC qui donne la priorité seulement aux aires protégées avec un poids de 1 tandis que les autres indices écosystémiques ont un poids nul. Le panneau A) représente l'analyse en grappes des données écosystémiques, suggérant deux grandes distinctions entre les écosystèmes. Les panneaux B), C), D), représentent le choix de sites pour 10, 30, et 50 sites par indice de similarité climatique (les sites en bleu ont un grand indice de similarité climatique, les sites en vert représentent un indice moyen et les sites en rouge un faible indice de similarité climatique).

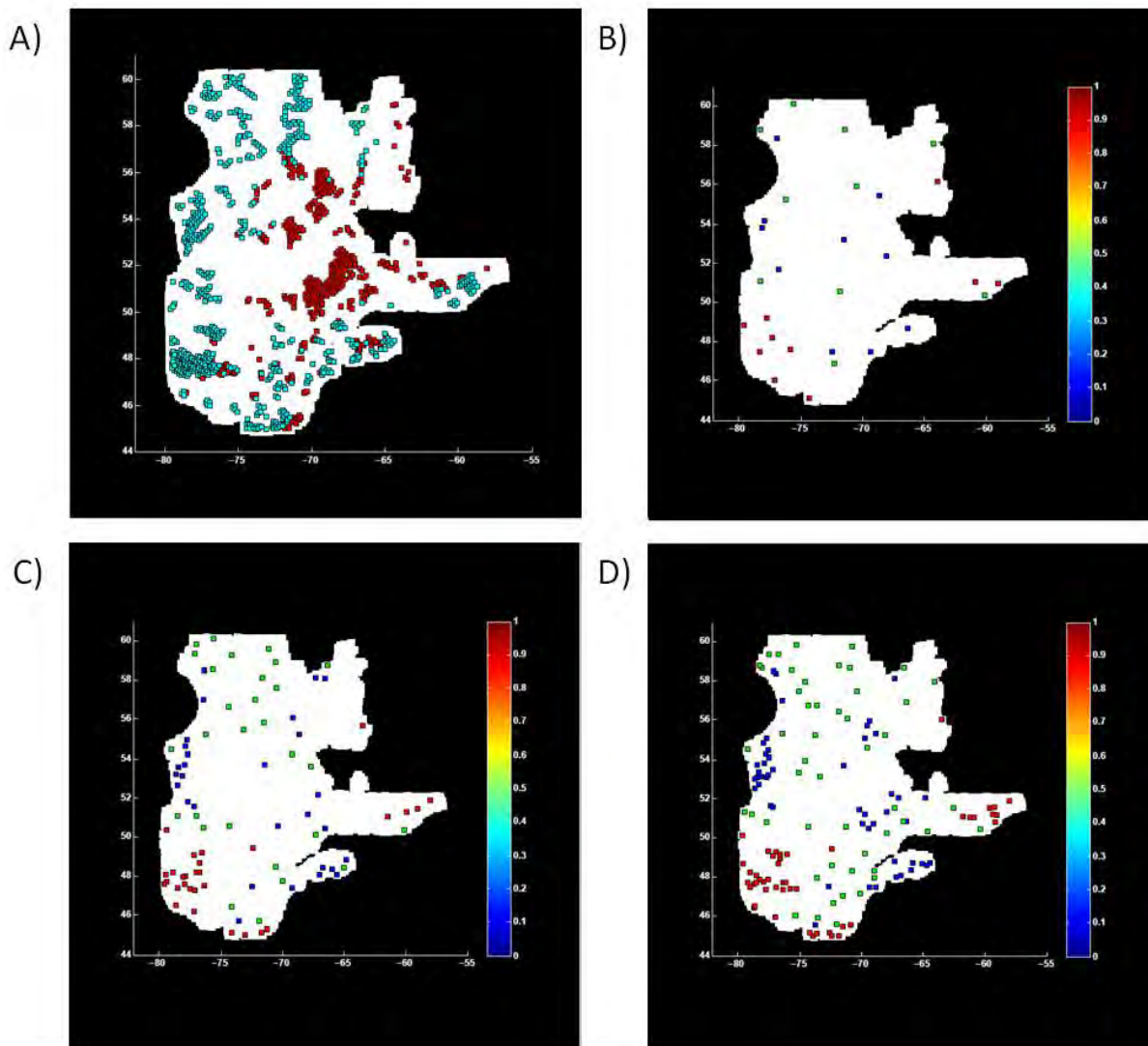


Figure 6.18. Scénario de choix de sites de suivi de la biodiversité dans un contexte de CC avec des poids de 2 à l'âge des forêts, l'élévation et la proportion de lacs et un poids de 1 aux aires protégées et à la rugosité du terrain. Le panneau A) représente l'analyse en grappes des données écosystémiques, suggérant deux grandes distinctions entre les écosystèmes. Les panneaux B), C), D), représentent le choix de sites pour 10, 30, et 50 sites par indice de similarité climatique (les sites en bleu ont un grand indice de similarité climatique, les sites en vert représentent un indice moyen et les sites en rouge un faible indice de similarité climatique).

6.8 Références

- Ackerly, D. D., S. R. Loarie, W. K. Cornwell, S. B. Weiss, H. Hamilton, R. Branciforte, and N. J. B. Kraft. 2010. The geography of climate change: implications for conservation biogeography. *Diversity and Distributions* **16**:476-487.
- Allen, C. D. and D. D. Breshears. 1998. Drought-induced shift of a forest-woodland ecotone: Rapid landscape response to climate variation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **95**:14839-14842.
- Attiwill, P. M. 1994. The disturbance of forest ecosystems: the ecological basis for conservative management. *Forest Ecology and Management* **63**:247-300.
- Brown, J. H. and M. V. Lomolino. 1998. *Biogeography*. Sinauer Associates, Inc., Sybderland, MA.
- Grondin, P., J. Noël, and D. Hotte. 2007. L'intégration de la végétation et de ses variables explicatives à des fins de classification et de cartographie d'unités homogènes du Québec méridional. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière.
- Kullman, L. 2002. Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. *Journal of Ecology* **90**:68-77.
- Loarie, S. R., P. B. Duffy, H. Hamilton, G. P. Asner, C. B. Field, and D. D. Ackerly. 2009. The velocity of climate change. *Nature* **462**:1052-1055.
- Neilson, R. P. 1993. Transient ecotone response to climatic change - some conceptual and modeling approaches. *Ecological Applications* **3**:385-395.
- Pan, Y., J. M. Chen, R. Birdsey, K. McCullough, L. He, and F. Deng. 2011. Age structure and disturbance legacy of North American forests. *Biogeosciences* **8**:715-732.
- Prentice, I. C., W. Cramer, S. P. Harrison, R. Leemans, R. A. Monserud, and A. M. Solomon. 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography* **19**:117-134.

7 Analyses spatio-temporelles des données de biodiversité

Auteurs : Frédéric Boivin et Pedro Peres-Neto

Affiliation : Université du Québec à Montréal, Chaire du Canada en modélisation spatiale et biodiversité

Cet article sera soumis pour publication dans la revue *Ecological Applications*.

7.1 Abstract

Numerous biodiversity monitoring programs are being put in place or are already well-established worldwide producing a large amount of spatio-temporal data. While the last decade of ecological research has produced a wealth of new statistical methods to threat the kind of spatio-temporal biodiversity data produce by such monitoring programs, no coherent framework making these development readily available to data managers and practitioners has been produced. In this paper, we propose a framework based on these advances. We describe all steps necessary to transform the raw data (species, environmental variables, sites location, time of sample) into practical response and predictor matrices. We explain how to confront these matrices to detect trends in community structure and link these trends to their underlying cause. We present several visualisations and interpretation tools and provide extensive discussion on a number of statistical aspects that need to be taken into consideration when analysing large spatio-temporal biodiversity data. Examples of output produced by the framework are shown using simulated spatio-temporal biodiversity data. We feel that this framework will help practitioners and data managers as well as scientists in their task of extracting reliable and extensive information from monitoring data.

Keywords: Biodiversity monitoring, spatial analysis, temporal analysis, β -diversity, numbers equivalent, communities.

Annexe A Questions et méta-questions

Introduction

Les métras questions ont été formulées par trois groupes de cinq participants à la rencontre CC-Suivi du 27 janvier 2011 à l'UQÀM. Chaque groupe s'est basé sur une section des 136 questions reçues par courriel avant la rencontre et 6 questions supplémentaires non incluses dans le document original. Le groupe 1 (G1) avait les questions 1 à 47, le groupe 2 (G2) les questions 48 à 92 et le groupe 3 (G3) les questions 93 à 141 (il y avait 13a et 13b, 15a et 15b et pas de question 22). Les questions avaient au préalable été divisées en 14 grandes catégories par Frédéric Boivin (FB). Les catégories et les questions correspondantes étaient :

1. Choix des espèces à suivre (Q1 à Q13a)
2. Synergie et interaction avec les autres changements (Q13b à Q16)
3. Dynamique générale des espèces (Q17 à Q32)
4. Écosystèmes et fonctions écosystémiques (Q33 à Q47)
5. Milieux humides (marais, tourbières et milieux riverains) (Q48 à Q58)
6. Milieux aquatiques (eaux douces) (Q59 à Q75)
7. Milieux aquatiques (eaux salées) (Q76 à Q78)
8. Forêt (Q79 à Q92)
9. Milieux nordiques (Q93 à Q106)
10. Agriculture (Q107 à Q109)
11. Migration et aires de répartition (Q110 à Q123)
12. Espèces envahissantes et ravageuses (Q124 à Q129)
13. Aires protégées et parcs (Q130 à Q132)
14. Méthodologie du suivi (Q133 à Q136)
15. Questions formulées après le classement (Q137 à Q141)

Questions enlevées : 88, 98

Questions non classées initialement et classées par FB : 6, 8, 14, 19, 23, 37, 41, 54, 55, 76, 87, 88, 90, 107, 111, 112, 113, 114, 115, 119, 120, 121, 122, 127, 131, 134, 141

Initialement, 45 métras questions ont été formulées par les 3 groupes. Cependant, 28 questions n'étaient pas incluses dans les métras questions ce qui a mené à la création de 7 nouvelles métras questions par FB pour un total de 52 métras questions. En retravaillant les métras questions, une a été divisée en 2, 13 ont été éliminées après avoir été fusionnées ou incluses dans d'autres métras questions pour un total final de 40 métras questions.

Participants (en ordre alphabétique)

Isabelle Aubin – Service Canadien des Forêts
Simon Barrette – Groupe Hémisphère
Gaétanne Boisseau – Consultante en environnement
Frédéric Boivin – Université du Québec à Montréal
Robert Bradley – Université de Sherbrooke
Pierre Brunel – Institut québécois de la biodiversité (IQBIO)
Stéphane Campeau – Université du Québec à Trois-Rivières
François Caron – Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune
Geneviève Corfa – Hydro-Québec
Yohann Dubois – Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune
Andrew Gonzalez – Université McGill
Marie-Hélène Greffard – Université du Québec à Montréal
Frédéric Guichard – Université McGill
Jochen Jaeger – Université Concordia
Jacques Jutras – Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune
Guillaume Larocque – Centre de la Science de la Biodiversité du Québec
Jessica Levine - Centre de la Science de la Biodiversité du Québec
Benoît Limoges – Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
Kim Marineau – Consultante en environnement
Christian Messier – Université du Québec à Montréal
Lyne Pelletier – Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
Pedro Peres-Neto – Université du Québec à Montréal
Catherine Périé – Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune
Raphaël Proulx – Université du Québec à Trois-Rivières
Anouk Simard – Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune
Robert Siron – Ouranos
Laura Timms – Université McGill
Jonathan Verreault – Université du Québec à Montréal

Quelques définitions

Résilience : La capacité d'un système à subir des perturbations tout en maintenant essentiellement les mêmes fonctions, structures, rétroactions et ainsi, une même identité (Walker et al. 2006).

Fonctionnement d'un écosystème: Le fonctionnement d'un écosystème réfère aux propriétés et aux processus d'un écosystème (Costanza et al. 1997).

Services écosystémiques : Les services écosystémiques sont les bénéfiques que les populations humaines retirent, directement ou indirectement, du fonctionnement des écosystèmes (Costanza et al. 1997).

Les questions originales fournies par les participants par courriels avant la rencontre

Choix des espèces à suivre

Q1 : Quel est le meilleur taxon ou espèce pour mesurer les changements dans les écosystèmes à court terme?

Q2 : Quels sont les groupes taxonomiques les plus importants à suivre (p. ex. menacés ou autres)?

Q3 : Quelles sont les espèces sensibles aux changements climatiques et qui sont suffisamment abondantes pour être suivies à long terme?

Q4 : Est-ce que certaines espèces pourraient être des espèces parapluie, capable d'être indicatrices de changements de biodiversité pour l'ensemble des communautés?

Q5 : Est-ce nécessaire de suivre une espèce qui ait une distribution étendue ou de suivre différentes espèces dans différents secteurs?

Q6 : Quels sont les espèces qui vont bénéficier des CC et pourront possiblement nuire aux autres?

Q7 : Devons-nous mettre des efforts spéciaux pour suivre les espèces « emblématiques »?

Q8 : Quels sont les groupes taxonomiques qui devraient être considérés en priorité par le suivi de la biodiversité, dans un contexte de CC ?

Q9 : What are the spatial patterns of covariation in the distribution of presence/absence and abundance of key organismal groups? How do they vary with scale?

Q10: Comment choisir les espèces parapluie / des espèces 'cheval de Troie' pour protéger beaucoup d'autres espèces incluant les espèces gluantes ou désagréables ? Et quels espèces-phare/parapluie utiliser?

Q11 : Are species responses to subtle climatic changes easier to identify and/or increasingly reliable (i.e. significant) with assessments taken at decreasing taxonomic levels (i.e. macroinvertebrates rather than birds)?

Q12: Quel type d'espèces forment les meilleurs indicateurs?

Q13a: Selon les connaissances scientifiques actuelles, quel groupe taxonomique (i.e. mammifères, oiseaux, reptiles, amphibiens, poissons, insectes, plantes) est-il le plus susceptible de répondre directement et rapidement en terme numérique ou comportemental à des modifications du climat (température et précipitations) à l'échelle du Québec? Ceux-ci peuvent-ils être ordonnés du plus au moins sensible face à ces changements?

Synergie et interaction avec les autres changements

Q13b : Comment faire le lien entre les problèmes liés aux CC et les autres enjeux anthropiques?

Q14: De quelle façon les changements climatiques moduleront-ils d'autres facteurs de stress physiologique (anthropique, environnemental, etc.) chez les espèces occupant les maillons supérieurs de la chaîne alimentaire (ex. oiseaux)?

Q15a : Quels sont les cas documentés d'effets synergiques des facteurs de stress (incluant les changements climatiques) ayant une incidence sur la biodiversité?

Q15b : En quoi l'influence des CC et des activités de gestion sur les communautés végétales affecte l'abondance et la composition spécifique d'un groupe taxonomique donné (p. ex., oiseaux)?

Q16 : Comment discriminer les effets des changements climatiques des facteurs confondants comme les effets de la pollution anthropiques sur les milieux aquatiques?

Dynamique générale des espèces

Q17 : Comment les changements climatiques vont-ils modifier les cycles et traits bioécologiques des espèces aquatiques? Par exemple, les espèces qui ont une faible capacité de dispersion risquent-elles l'extinction?

Q18 : Est-ce que la plasticité génétique d'une espèce « x » est suffisante pour qu'elles se maintiennent en place et s'adapte sans avoir à migrer?

Q19 : What is the rate of population extinction? Can we establish this for several key organismal groups (e.g. birds, mammals)?

Q20 : Quel est le changement dans la composition des espèces au sein des parcelles échantillons ? Est-ce que le nombre d'espèces (espèces suivies) présentes dans une parcelle augmente ou diminue ? Est-ce qu'il y a un patron constant entre les parcelles (p. ex. 8 parcelle sur 10 diminue) ? Est-ce que le patron est différent entre les parcelles situées dans des aires protégées vs non-protégées?

Q21 : Comment est-il possible de savoir si les changements mesurés vont au-delà de la variabilité naturelle? Et, quelle sorte de suivi permettrait de déclencher une alarme lorsque des changements dans les populations ou dans les écosystèmes vont au-delà de la variabilité naturelle et sont préoccupants?

Q23 : With increases in climate change events (i.e. increases in temperature and wind and water displacement), what is the ratio of species immigration to emigration (or extinction) within a specified land area, under a defined temporal scale? Can this ratio be used as a tool to quantify climate change dynamics?

Q24 : Quelles sont les espèces qui seraient devenues moins abondantes, et d'autres, plus abondantes, en raison des changements climatiques?

Q25 : Est-ce que la santé des populations va changer suite aux changements climatiques? et quel est le meilleur moyen de mesurer la santé des populations : p. ex. la condition corporelle, le taux de reproduction, accroissement démographique, densité?

Q26 : Comment les changements climatiques vont affecter les espèces en péril et comment différencier les effets des CC des effets de pertes d'habitats.

Q27: Est-ce que les espèces dépendantes des conditions d'humidité et de température seront plus affectées que celles qui ne le sont pas ou qui le sont moins? Ex. salmonidés, végétaux qui ont besoin d'une étape de froid pour la germination, ouverture des cônes de pin à la chaleur, etc.

Q28 : Est-ce que des seuils de changements importants dans la composition des communautés peuvent être identifiés avant coup?

Q29 : Est-ce qu'il y aura des changements dans l'utilisation des habitats par les espèces?

Q30 : Quelles sont les espèces (oiseaux, poissons) chez lesquelles on a observé une phénologie printanière plus hâtive?

Q31 : Quelles espèces ont vu leur aire de répartition migrer vers le nord en raison des changements climatiques?

Q32 : Est-ce que l'aire de répartition de certaines espèces d'amphibiens et de reptiles s'est étendue vers le nord?

Écosystèmes et fonctions écosystémiques

Q33 : Would an increase in temperature trigger cascading events such that (Qc) communities would exhibit increases in productivity, and in turn withhold the capacity for greater diversity? How would this change ecosystem function?

Q34: Comment les services écosystémiques (ex. productivité, filtration d'eau) seront-ils affectés par les changements climatiques.

Q35 : Comment évolue la productivité (primaire, secondaire, etc.) des écosystèmes inclus dans les parcelles échantillons ? La productivité pourrait être mesurée par l'abondance de groupes taxonomiques pertinents et qui sont facilement capturables ou quantifiables.

Q36 : Doit-on accepter les changements d'espèces et seulement tenter de conserver les fonctions?

Q37 : Quels fonctions des écosystèmes sont les plus importantes au Québec et quels organismes sont les plus responsables des fonctions des écosystèmes?

Q38: À quelle(s) échelle(s) spatiale(s) les fluctuations de biodiversité sont-elles associées à des fluctuations des fonctions écosystémiques?

Q39: Dans le contexte où la planification et l'établissement des aires protégées ou de conservation se font actuellement sans égard à leur pertinence ou pérennité « climatique », quels facteurs devons-nous mesurer (taille, structure, intégrité, biodiversité, connectivité) pour évaluer la résilience ou la capacité d'adaptation des écosystèmes et des fonctions (ou services) écologiques qu'ils procurent face aux changements climatiques?

Q40 : Est-ce que les écosystèmes déjà perturbés par les activités humaines seront plus affectés par les changements climatiques que les écosystèmes plus intègres qui semblent plus résilients aux perturbations en général par leur complexité écologique ou leur diversité?

Q41 : Quels sont les meilleurs indicateurs de changements dans les écosystèmes causés par les changements climatiques?

Q42 : À partir de quel point peut-on encore récupérer un habitat, ou jusqu'à où un habitat peut être dégradé avant que l'habitat soit détruit. Est-ce qu'il y a des 'points of no return' ou 'tipping points'?

Q43 : Est-ce que certains écosystèmes semblent plus susceptibles à être affectés rapidement par les changements climatiques que d'autres? Peut-on les identifier au préalable?

Q44 : Quels sont les écosystèmes les plus à risques d'être affectés par les CC au QC (e.g. tourbières, ruisseau)?

Q45 : Quel est le changement dans la composition (en pourcentage ou superficie) des types d'habitats (p. ex. marais, marécage, peuplements forestiers, champs agricole culture annuelle, champs agricole culture pérennes) dans une parcelle (superficie en centaine d'hectares)?

Q46: Quels sont les conditions préalables des écosystèmes qui modifieront leur résilience? Superficie, types de substrats, dégradation des rives, diversité des espèces, etc.

Q47 : Existe-t-il des écorégions, régions naturelles, bassins versants, plus vulnérables aux CC? J : Ces régions devront faire l'objet de mesures particulières d'adaptation, comme un plus grand pourcentage d'aires protégées, des corridors écologiques ou autres mesures.

Milieux humides (marais, tourbières et milieux riverains)

Q48 : Quel sera l'impact des changements climatiques sur la composition des communautés végétales et l'aire de répartition des espèces reliées aux milieux humides?

Q49 : Quel sera l'impact des changements climatiques sur les processus biogéochimiques, la qualité des eaux et la productivité des milieux humides?

Q50 : Quel sera l'impact des changements climatiques sur le régime hydrique du fleuve St-Laurent et des Grands Lacs?

Q51 : Comment est-ce que les changements climatiques vont influencer la répartition, l'abondance et la composition des milieux humides du Québec?

Q52: a) Quels facteurs locaux et régionaux influencent les fluctuations intra- et inter-annuelles de la température ambiante sur les berges des lacs et cours d'eau, b) quel est l'importance relative de ces facteurs sur la phénologie (croissance et floraison) des communautés végétales riveraines et c) quel est l'effet net de la diversité en espèces sur la stabilisation temporelle des patrons phénologiques?

Q53 : Quelle est l'impact des changements climatiques sur la croissance et décomposition des sphaignes dans 1) les tourbières et 2) les forêts boréales?

Q54 : Quelles espèces ou communautés végétales et animales sont directement touchées par les répercussions des changements climatiques sur les vastes tourbières des régions boréale et sub-arctique du nord du Québec?

Q55 : Quel sera l'impact des espèces exotiques envahissantes végétales sur les milieux humides et les espèces végétales indigènes?

Q56 : Quels seront les impacts de la diminution de la magnitude des crues printanières et ceux des fluctuations saisonnières des niveaux d'eau dans les rivières suite au réchauffement climatique sur l'abondance et la composition spécifiques des espèces inféodées aux milieux humides ripariens (plaines alluviales et lits mineurs) au Québec méridional ?

Q57 : Comment les changements dans la répartition et la composition des milieux humides influencera t'elle les populations d'oiseaux migrateurs (abondance, composition des communautés)?

Q58 : La persistance des petits milieux humides ou des milieux humides temporaires ou saisonniers sera telle affectée par les changements climatiques?

Milieux aquatiques (eaux douces)

Q59 : Est-ce que le réseau de suivi de la santé du benthos du MDDEP (ISB; indice de santé du benthos) peut servir de référentiel pour le suivi de la biodiversité en lien avec les changements climatiques? Comment ce réseau de suivi de la santé du benthos pourrait faire partie de façon intégrante du réseau de suivi de la biodiversité?

Q60 : Comment les changements climatiques vont-ils influencer la dispersion des espèces piscicoles?

Q61 : Quels seront les changements dans la répartition spatiale des taxons de macroinvertébrés benthiques (MIB) en lien avec les changements climatiques?

Q62 : Quels sont les seuils de tolérance biologique des poissons d'eau froide (p. ex. salmonidés) à un réchauffement des températures dans leur habitat?

Q63 : Les impacts des variations de niveaux des rivières seront-ils amplifiés en aval des réservoirs et barrages de type inversion?

Q64 : Est-ce qu'une diminution de la durée de la présence des glaces lacustres et fluviales réduire la disponibilité de l'habitat d'eau froide pour les espèces d'eau froide telles que le touladi?

Q65 : Comment les CC influenceront-ils les insectes aquatiques?

Q66 : Quelles sont les effets de changements de communautés terrestres sur les communautés aquatiques des bassins versants associés?

Q67 : In QC, is freshwater diversity a robust indicator of the terrestrial biodiversity found in its respective catchment area.

Q68: Quel sera l'impact des changements climatiques sur les diatomées envahissantes de type *Didymosphenia*?

Q69: Quel sera l'impact des changements climatiques sur la diversité et la structure des communautés de diatomées des cours d'eau?

Q70 : Les changements climatiques peuvent-ils contribuer à accélérer l'eutrophisation des lacs et ainsi affecter la diversité des macrophytes?

Q71 : Existe-t-il des refuges thermiques pour les espèces aquatiques dans toutes les écorégions du Québec et particulièrement dans les basses terres du Saint-Laurent et sont-ils accessibles? Si non, est-il possible d'envisager des transferts d'espèces inter bassin avec toutes les conséquences qui en découlent (compétition, introduction de parasites et de maladie etc.)? Comment identifier les espèces aquatiques qui auront besoin de migration assistée?

Q72 : Des stations d'échantillonnage devraient-elles être placées dans les refuges thermiques pour le suivi des poissons, des macroinvertébrés et autres organismes aquatiques

Q73: Quel sera l'impact des changements climatiques sur la surveillance biologique des cours d'eau?

Q74 : Est-ce que les changements climatiques auront un effet sur la phénologie des insectes aquatiques et est-ce que cela affectera la survie des oiseaux migrateurs juvéniles?

Q75: Quelles influences auront les CC sur la composition des communautés de poisson?

Milieus aquatiques (eaux salées)

Q76 : A-t-on détecté des signes anormaux chez les mollusques et crustacés de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent conséquemment à l'acidification des eaux de cette région?

Q77: Comment évoluent les populations de plancton au Québec?

Q78: Est-il possible d'intégrer les écosystèmes marins côtiers à un plan unique de suivi de la biodiversité Québécoise?

Forêt

Q79: Quelle sera l'évolution de la productivité semencière des principales espèces d'arbre composant la forêt boréale québécoise dans le contexte des changements climatiques?

Q80 : Quels sont les impacts des changements climatiques et de l'aménagement forestier sur l'abondance et fréquence des plantes à mobilité réduite?

Q81 : Comment les CC influenceront-ils les communautés d'insectes phyllophages et la répartition des espèces?

Q82 : Est-ce que l'exploitation forestière permet aux communautés forestières de s'adapter plus rapidement aux changements climatiques?

Q83 : Comment les CC modifieront-ils les communautés de coléoptères forestiers?

Q84 : Comment les CC influenceront-ils la pédofaune et la microflore du sol et les processus de décomposition de la matière organique qui régulent les sols forestiers?

Q85 : Quelle est l'impact des changements climatiques et de l'aménagement forestier sur l'abondance des hépatiques, plus spécifiquement sur l'abondance de *Bazzania trilobata* dans la forêt mixte et feuillue et l'abondance de *Ptilidium ciliare* dans la forêt coniférienne?

Q86: Comment les changements climatiques vont changer la sévérité des feux de forêt au Québec, et quels seront les conséquences sur la composition des communautés végétales?

Q87 : How is soil fertility (i.e. the services obtained from insects, decomposers, and nutrient fixing species) of the greater northern QC region affected by increasing temperatures?

Q88 : Cultiver la forêt, est-ce incompatible avec le maintien de la biodiversité?

Q89 : Comment le suivi pourra servir pour la certification forestière ou autre?

Q90 : Comment évolue l'aire de répartition du cerf de Virginie, du raton laveur et du porc-épic en réponse aux changements climatiques?

Q91 : En tant que population animale dont l'aire de répartition est confinée à un petit territoire situé en altitude, comment évolue la population de caribou de la Gaspésie ainsi que son habitat?

Q92 : Pourrait-on suivre l'évolution (dispersion et abondance relative) d'un grand nombre d'insectes, oiseaux et petits mammifères en utilisant l'inventaire forestier comme base d'analyse?

Milieus nordiques

Q93: Quelle est l'influence des cycles climatiques locaux et globaux sur la condition corporelle, le succès reproducteur, la survie, l'aire de répartition et la phénologie de reproduction et de migration des espèces d'oiseaux nichant en milieu boréal et arctique?

Q94 : Est-ce que les sols se modifieront suffisamment pour accueillir de nouvelles espèces en milieu nordiques?

Q95 : Observe-t-on des changements dans l'abondance des petits mammifères (campagnol, lemming, lièvre) dans le nord du Québec en raison des effets des changements climatiques (hivers plus doux, modifications de l'habitat), et en conséquence, pouvant se répercuter sur toute la chaîne alimentaire?

Q96 : Comment évolue la phénologie des espèces migratrices utilisant l'arctique québécois durant leur cycle de vie?

Q97: Quelle sera l'influence des changements climatiques sur les cycles de micromammifères en forêt boréale et en Arctique ainsi que sur le réseau alimentaire dépendant de ces cycles (mammifères, rapaces, etc.)?

Q98: Comment évolue le pergélisol dans le grand nord québécois?

Q99 : Comment les écosystèmes côtiers nordiques répondront-ils aux changements du climat et à l'augmentation de l'activité industrielle si la réduction du couvert de glace augmente l'activité humaine dans la région?

Q100: Comment les changements climatiques changeront l'empreinte humaine dans les zones nordiques, et quels en seront les répercussions sur la perte ou l'envahissement d'espèces clés ? Le cas du vers de terre.

Q101 : Comment évoluent les populations et la condition physique des ours blancs dans le Nord québécois?

Q102 : Dans le nord québécois, est-ce qu'une élévation de la température combinée à la dégradation (fonte) du pergélisol crée de nouvelles conditions favorables à la croissance d'arbustes?

Q103 : Observe-t-on une diminution de l'abondance du lichen dans le nord du Québec conséquemment au dégel du pergélisol?

Q104 : Y a-t-il un déplacement vers le nord de la limite des arbres au Québec?

Q105 : Y a-t-il des changements notables dans la croissance et la densité des arbres à la limite nord de leur aire de répartition?

Q106 : Est-ce que les routes de migration du caribou toundrique sont modifiées en raison d'une réduction dans la durée de la présence des glaces lacustres et fluviales?

Agriculture

Q107 : Est-ce que les herbacées, arbustes et arbres choisis présentement supporteront bien les changements climatiques prévus ? Est-ce qu'il faut dès maintenant préconiser d'autres espèces pour la plantation ou restauration dans l'agroenvironnement ?

Q108 : Quel est l'impact des activités de l'agriculture biologique et agriculture traditionnelle (industrielle) sur la biodiversité dans l'agroenvironnement ? Et quel est l'impact des activités du récréotourisme dans cet environnement ? À quel point les changements climatiques font-ils modifier la qualité des habitats dans l'agroenvironnement?

Q109 : Qu'est-ce qu'il se passe avec la biodiversité dans le milieu agricole industriel sans amélioration des pratiques actuelles, i.e. pas de bandes riveraines, etc., en relation avec les changements climatiques ? Est-ce qu'elle continue à se dégrader due à la persistance de pollution diffuse/ponctuelle et autres facteurs de stress ? Ou est-ce qu'il y aura un shift d'espèces et le nombre d'espèces / biodiversité reste semblable?

Migration et aires de répartitions

Q110: Est-ce que les corridors écologiques joueront leur rôle dans la dispersion des espèces face aux changements climatiques?

Q111 : Est-ce que les barrières naturelles et anthropiques vont empêcher les espèces de migrer?

Q112: Quelles sont les vitesses de dispersion des végétaux ainsi que les distances de déplacement à chaque saison?

Q113: Quelle est l'influence des changements climatiques régionaux et globaux sur la condition corporelle, le succès reproducteur, la survie et la phénologie de reproduction et de migration des espèces (ou d'une espèce « x »)?

Q114 : Combien et quelles espèces native de région frontalière (Ontario, Etats-Unis, Nouveau-Brunswick) s'étaleront au Québec?

Q115 : Parmi les groupes taxonomiques affectés par les changements climatiques, quel groupe est probablement le moins contraint par la connectivité des habitats, de façon à pouvoir modifier rapidement sa distribution en fonction des changements climatiques?

Q116 : Est-ce que la vitesse de migration des espèces est suffisantes pour suivre la vitesse des changements climatiques?

Q117 : Quel sera l'impact des changements climatiques sur l'échéancier de migration des oiseaux migrants ainsi que sur leur patron spatial de migration?

Q118 : Quel est le seuil d'altération des forêts en termes de fragmentation (densité routière; % de perturbation totale – naturelle et anthropique) au delà duquel la migration des espèces animales devient presque impossible?

Q119 : Les espèces strictement aquatiques vont-elles réussir à changer de bassin versant (BV) à la limite nord de leur bassin via des milieux humides communs à deux bassins?

Q120 : Il a été démontré que les espèces animales et végétales remontent lentement vers le nord, sans doute sous l'effet du réchauffement climatique. Conséquemment, le maintien de certaines espèces au sud de leur aire de répartition est-il une utopie? Doit-on s'attendre à un déplacement général vers le nord?

Q121 : Peut-on se prémunir contre l'invasion <naturelle> (exclure les introductions volontaires ou accidentelles) ou doit-on les considérer comme des situations de co-évolution inévitables et sans recours?

Q122 : When animals immigrate as a response to climate change, do they colonized the next suitable environment or do they bypass a suitable environment for another located at a greater distance? Which species would express this behavior and which would not?

Q123 : Do increases in wind and water movement (i.e. storms, flooding) affect dispersion and diffusion such that fluctuations in landscape structure can be detected between a more homogeneous form (when perturbation is weak) and a more heterogeneous form (when perturbation is strong)?

Espèces envahissantes et ravageuses

Q124 : Quelles sont les espèces envahissantes qui se sont propagées (ou qui sont susceptibles de se propager) au Québec en raison des changements climatiques?

Q125 : Les changements climatiques ouvrent-ils une porte aux plantes aquatiques exotiques envahissantes (PAEE) dans les lacs et cours d'eau du Québec?

Q126 : Comment les CC modifieront-ils les risques associés aux insectes ravageurs des forêts, ceux dont les épidémies peuvent modifier en profondeur la biodiversité des écosystèmes?

Q127 : Comment les changements climatiques affecteront-ils les cycles de la tordeuses des bourgeons d'épinettes (TBE) et des autres insectes ravageurs ?

Q128 : Comment évolue le nombre et l'intensité des perturbations naturelles (insectes ravageurs, sécheresse, etc.) au sein des parcelles échantillon.

Q129: Comment évolue la prolifération d'espèces de plantes exotiques et invasives adaptées à des conditions climatiques plus clémentes qu'au Québec?

Aires protégées et parcs

Q130 : Est-ce que le réseau d'aires protégées facilitera les flux migratoires des espèces pour répondre aux changements du climat (protection des couloirs de dispersion, connectivité entre les habitats)?

Q131 : Est-ce que les espèces peuvent être maintenue viable dans les parcs et les aires protégées sans agir activement?

Q132 : Le réseau d'aires protégées protégera-t-il adéquatement la biodiversité dans le contexte des CC?

Méthodologie du suivi

Q133 : Est-ce que les méthodologies retenues pour le suivi biodiversité pourraient être normalisées?

Q134 : Ces méthodologies pourront-elles être utilisées dans le suivi de l'état de l'intégrité biologique?

Q135: Quels indicateurs de la diversité animale et végétale sont indépendants d'une classification taxonomique des individus?

Q136 : Quel est le changement dans l'occupation des sites par une espèce donnée à l'échelle du Québec? Est-ce que l'aire de répartition change lorsqu'on analyse l'occupation des parcelles? Quels sont les tendances par groupes d'espèces suivies.

Questions reçues après l'échéance

Q137 : How does landscape fragmentation by roads and other transportation infrastructure, in combination with climate change, affect the abundance and distribution of native species? (Jochen Jaeger)

Q139 : How does urban sprawl, in combination with climate change, affect the abundance and distribution of native species? (Jochen Jaeger)

Q141 : En supposant que des organismes compétents établissent, dans certaines régions ou MRC du Québec, des objectifs de biodiversité (exemple : maintenir la présence de gros gibier (original et cerf de Virginie) dans les tourbières de Lanoraie) : - quelles sont les éléments ou une méthodologie qui pourraient permettre d'évaluer si un objectif est réaliste à long terme, dans le contexte des changements climatiques? (Réjean Dumas)

Q142: Comment les CC vont influencer l'intégrité écologique des aires protégées? (Benoît Limoges)

Q143: Comment les aires protégées contribuent au maintien de l'intégrité écologique du grand écosystème auquel elles rattachent et comment cela va être affecté par les changements climatiques? (Benoît Limoges)

Q144: Comment les aires protégées vont réussir à maintenir la biodiversité dans un contexte de CC? (Benoît Limoges)

Q145: Est-il possible de prédire ou modéliser quelles espèces sont les plus à risque de disparaître dans le futur? (Benoît Limoges)

Q146: Est-il possible de prédire ou modéliser comment va évoluer la biodiversité, plus particulièrement les espèces menacées? (Benoît Limoges)

Q147: Est-il possible de prédire ou modéliser quels écosystèmes vont disparaître à cause des CC? (Benoît Limoges)

Les métaguestions créées lors de la rencontre

Entre parenthèses G « x » indique le groupe qui a formulé la question, « - FB » indique que la formulation a été modifiée par FB et « (FB) » indique des métaguestions ajoutées par FB principalement dû aux questions non classées initialement.

M1 (G1 - FB) : Quels critères sont importants pour la sélection des taxons ou espèces devant être ciblés par un suivi de la biodiversité en fonction des CC (ex. vulnérabilité, rapidité de réponse, valeur emblématique, rareté...)? Q : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13a, 14, 24, 26, 27, 37

M2 (G1 - FB): Quelles sont les synergies entre les changements climatiques (CC) et les autres facteurs anthropiques (par ex. fragmentation du paysage, destruction d'habitats, pollution agricole, etc.) qui pourraient avoir le plus d'impact sur la biodiversité? Q : 13b, 15a, 15b, 26, 40, 63, 80, 82, 85, 108, 109, 137, 139

M3 (G1) : Comment discriminer l'effet des CC de celui des autres facteurs anthropiques? Q : 16

M7 (G1 - FB) : Est-ce que les CC provoquent des changements de biodiversité différents dans les aires protégées? (Inclus M44) Q : 20

M8 (G1) : Comment les traits écologiques (ex. phénologie, production de graines ou d'œuf) des espèces changent en fonction des CC? (Inclus M4 et M30) Q : 17, 30, 74, 93, 96, 113

M9 (G1 - FB) : Est-ce que la plasticité phénotypique des espèces/individus confère une résilience aux CC? Q : 18

M10 (G1) : Comment la santé des individus est affectée par les CC? Q : 25

M11 (G1) : Existe-il des signes précurseurs de changements dans la biodiversité en vertu des CC? (inclus M17) Q : 21, 28, 42

M12 (G1) : Est-ce qu'il y a des comportements chez les individus induits par les CC qui sont susceptibles d'affecter la biodiversité? Q : 29

M13 (G1) : Quels sont les écosystèmes les plus sensibles au CC? Q : 43, 44

M14 (G1) : Comment les services écologiques (ex. purification de l'eau, production primaire, aliments, etc..) générés par la biodiversité sont-ils affectés par les CC? (Inclus M15, M22 et M48) Q : 33, 34, 35, 36, 37, 38, 87, 107

M16 (G1 - FB) : Est-ce que les CC affectent la résilience des écosystèmes? Q : 39, 40, 46

M20 (G1) : Existe-t-il de la variabilité spatiale dans l'effet des CC sur la biodiversité? Q : 47

M24 (G2) : Comment les CC influencent le fonctionnement des milieux humides (productivité, décomposition...)? Q : 49, 52b, 53a

M25 (G2) : Comment les CC affectent la dynamique des populations, la répartition, l'abondance, la composition des espèces et communautés des milieux humides? (Inclus M5 et M6) Q : 19, 20, 48, 51, 52c, 54, 56, 57

M26 (G2) : Comment les CC affectent la dynamique des populations, la répartition, l'abondance, la composition des espèces et communautés des milieux aquatiques d'eau douce? (Inclus M5 et M6) Q : 19, 20, 61, 65, 69, 70, 75, 77

M27 (G2) : Comment les CC influencent le fonctionnement des milieux aquatiques d'eau douce (productivité, décomposition...)? Q : 70, 74

M28 (G2) : Comment les CC affectent la dispersion des espèces d'eau froide confinées aux écosystèmes aquatiques? Q : 60, 62, 64, 71, 72

M29 (G2) : Comment les changements aux bassins versant (écosystèmes terrestres), causés par les CC (ex. forêt mixte à forêt feuillue), influencent la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques d'eau douce? Q : 66, 67

M31 (G2) : Comment intégrer les réseaux de suivi existant? Q : 59, 73, 92, 134

M32 (G2 - FB) : Comment les CC affectent la dynamique des populations, la répartition, l'abondance, la composition des espèces et communautés des milieux forestiers? (Inclus M5 et M6) Q : 6, 19, 80, 81, 83, 85, 90, 91

M33 (G2) : Comment les CC influencent le fonctionnement des milieux forestiers (productivité, décomposition...)? Q : 79, 84, 85, 86

M34 (G2) : Comment le suivi pourrait servir à la certification forestière? Q : 89

M35 (G2) : Intègre-t-on le milieu marin dans le suivi? Q : 78

M36a (G2) : Comment les CC et l'acidification qui l'accompagne affectent la dynamique des populations, la répartition, l'abondance, la composition des espèces et communautés des milieux marins? (Inclus M5, M6 et M46, une subdivision de M36 afin de suivre le format des différents écosystèmes) Q : 19, 20, 76, 78

M36b (G2) : Comment les CC et l'acidification qui l'accompagne affectent le fonctionnement (ex. productivité, décomposition...) des milieux marins? (Inclus M5, M6 et M46, une subdivision de M36 afin de suivre le format des différents écosystèmes) Q : 19, 20, 76, 78

M37 (G3 - FB) : Comment les CC affectent la répartition, l'abondance, la composition des espèces et communautés des milieux nordiques? (Inclus M5 et M6) Q : 19, 20, 54, 93, 95, 96, 97, 101, 103, 104, 105, 106

M38 (G3) : Comment les CC affectent le fonctionnement (ex. productivité, décomposition) des écosystèmes nordiques? Q : 94, 95, 97, 102, 105

M39 (G3) : Comment la biodiversité est affectée par les activités humaines modifiées par les CC (ex. expansion vers le nord)? Q : 99, 100

M40 (G3 - FB) : Comment les CC affectent les comportements des espèces (ex : hibernation, migration)? Q : 57, 74, 93, 96, 117

M41 (G3) : Comment les CC affectent l'aire de répartition des espèces? (Inclus M5) Q : 19, 23, 31, 32, 47, 104, 110, 111, 114, 116, 118, 120, 122, 123, 136

M42 (G3) : Comment les CC influencent les espèces exotiques envahissantes? Q : 55, 68, 124, 125, 129, 138, 140

M43 (G3) : Comment les CC influencent les cycles des perturbations naturelles (ex. tordeuse des bourgeons d'épinette, feu...)? Q : 86, 126, 127, 128

M44 (G3) : Le réseau d'aires protégées protège-t-il adéquatement la biodiversité dans le contexte des CC? Q : 39, 130, 132

M45 (G3) : Quels critères sont importants pour la sélection des méthodes pour faire le suivi des effets des CC sur la biodiversité? (ex. normalisation, effort d'échantillonnage, etc.) Q : 23, 41, 133, 135, 141

M47 (FB) : Devons-nous laisser la biodiversité changer suite aux CC ou agir activement pour maintenir les espèces actuelles en place? Q : 36, 120, 121, 131

M49 (FB) : Doit-on aider les espèces à migrer? Q : 71

M50 (FB) : Quels effets ont les barrières physiques et anthropiques (ex. zone agricole, non-connectivité des bassins versants) sur le déplacement des espèces du aux CC? Q : 106, 111, 119

M51 (FB) : Quelles sont les vitesses de déplacement des organismes qui suivent les conditions climatiques qui leur sont propices? Q : 112, 115

M52 (FB) : Comment la répartition des écosystèmes (milieux humides, forêts feuillues, etc.) est modifiée par les CC? Q : 45, 50, 52, 58

Références

- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, and M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* **387**:253-260.
- Walker, B., L. Gunderson, A. Kinzig, C. Folke, S. Carpenter, and L. Schultz. 2006. A handful of heuristics and some propositions for understanding resilience in social-ecological systems. *Ecology and Society* **11**:13.

Annexe B Questionnaire du sondage

Auteurs : Frédéric Boivin¹, Anouk Simard², Jessica Levine³ et Pedro Peres-Neto¹

Affiliation : ¹Université du Québec à Montréal, Chaire du Canada en modélisation spatiale et biodiversité, ²Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, ³Centre pour la Science de la Biodiversité du Québec

Introduction et questionnaire fourni aux participants.

Introduction du questionnaire

Dans le cadre du plan d'action du Québec sur les changements climatiques, le gouvernement cherche à concevoir et à mettre en place un programme qui permettrait de suivre les effets des changements climatiques sur la biodiversité des écosystèmes d'eau douce et terrestres. Le but d'un tel programme de suivi est de générer de l'information qui pourra être utilisée afin d'aider au processus de décisions reliées à la conservation et à l'aménagement.

Une équipe de recherche du département de biologie l'Université du Québec à Montréal (UQÀM) aide à concevoir le programme de suivi (des détails sur le [site du projet](#)). Créer ce programme nécessite de prendre des décisions difficiles à propos de ce qui doit être mesuré, de même que quand, comment et où cela doit être fait afin de détecter les changements dans la biodiversité causés par les changements climatiques. L'objectif de ce sondage est d'identifier les priorités d'une variété de québécois associés à des organismes ayant des intérêts directs ou indirects avec la biodiversité.

Vos réponses permettront d'aider l'équipe de recherche, et par le fait même le gouvernement du Québec, à définir les caractéristiques de ce programme de suivi de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques au Québec.

Veillez noter : La participation à ce sondage est anonyme. Les données récoltées par ce sondage seront conservées de façon sécuritaire et accessibles seulement aux membres de l'équipe de recherche. Les résultats des réponses au sondage seront présentés d'une façon qui ne compromettra pas la confidentialité des répondants.

Ce sondage devrait vous prendre entre dix et vingt minutes à compléter.

Le questionnaire

Partie un: Information sur le participant

1. Dans quelles ville ou village habitez-vous?

-menu déroulant-

2. Depuis combien d'années résidez-vous au Québec?

- Moins de 5
- 5-9
- 10-19
- 20-29
- 30-39
- 40-49
- 50 ou plus

Avez-vous vécu au Québec toute votre vie?

- Oui
- Non

3. Pour quel type d'organisme travaillez-vous?

- Gouvernement du Québec ou du Canada
- Gouvernement régional ou municipal
- Université ou institution de recherche
- CÉGÈP
- Étudiant
- Consultant
- Industrie (Énergie, mine, forêt, tourisme, etc...)
- ONG
- Agriculture ou aquaculture
- Travailleur autonome
- Autre: _____

4. Quel est votre titre professionnel? (Exemples: agriculteur, technicien, professeur, planificateur)

5. **Dans quel domaine travaillez-vous présentement?** (*Exemples: biologie, finance*)

6. **Si applicable, quel est le domaine de votre dernier diplôme?** (*Exemples: géographie, économie, droit*)

7. **Quel est votre sexe?**

Homme

Femme

8. **Quel est votre âge?**

Moins de 20

20-29

30-39

40-49

50-59

60 ou plus

9. **Quel est le niveau de votre diplôme le plus élevé?**

Secondaire

CÉGEP

Université - Baccalauréat

Université - Maîtrise

Université - Doctorat

Études professionnelles (DEP)

Autre: _____

Partie deux: Priorités de suivi

Alors que vous répondrez aux douze questions suivantes, gardez en tête que les ressources à investir pour un suivi de la biodiversité sont limitées et qu'il est impossible de suivre *toutes* les variables pour *toutes* les espèces dans *tous* les écosystèmes du Québec. Dans ce sondage, nous avons restreint les choix de réponses possibles afin de pouvoir identifier vos priorités dans une perspective de contraintes. Chaque question inclut un espace pour vos commentaires si vous désirez en émettre. Nous vous invitons à répondre au sondage en vous basant sur vos opinions personnelles plutôt que sur les besoins ou priorités de votre employeur ou association.

1. Dans quelle (s) région(s) géographique(s) du Québec pensez-vous que devraient être concentrés les efforts de suivi de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques ?

a) Nord au Sud: S'il vous plait, choisissez une option.

- Nord
- Centre
- Sud
- Je ne crois pas qu'il devrait y avoir une priorité (toutes les régions sont également importantes).

b) Est en Ouest : S'il vous plait, choisissez une option.

- Est
- Centre
- Ouest
- Je ne crois pas qu'il devrait y avoir une priorité (toutes les régions sont également importantes).

2. D'après vous, quels types d'écosystèmes devraient être priorisés lors d'un suivi de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques? S'il vous plait, choisissez une ou deux options.

- Milieux humides
- Milieux urbains
- Lacs et rivières
- Milieux agricoles
- Forêts

3. À votre avis, quel type de zones, en vertu de leur niveau d'impact humain, devrait être priorisé lors d'un programme de suivi de la biodiversité dans un contexte de changement climatique? S'il vous plait, choisissez une option.

- Aucun impact (vierge)

-
- Niveau d'impact faible
 - Niveau d'impact modéré
 - Niveau d'impact élevé

4. Il est attendu que les changements climatiques et les autres activités humaines auront un impact plus important sur la biodiversité si leurs effets agissent simultanément (effets synergiques) plutôt que séparément. **Advenant qu'il y ait un suivi de la biodiversité dans les zones avec des impacts humains, d'après vous, quel(s) type(s) d'activité devrai(en)t prioritairement être suivi(s)? S'il vous plaît, choisissez une ou deux options.**

- Exploitation minière
- Urbanisation
- Agriculture
- Tourisme
- Industrie
- Foresterie
- Production énergétique (par exemple: éolienne, hydro-électrique)
- Autre: _____

5. **À votre avis, est-ce que le programme de suivi de la biodiversité devrait se concentrer sur la prise de données au niveau des espèces, telles que l'abondance et la distribution, ou au niveau des processus écosystémiques, telles que la productivité et la décomposition? S'il vous plaît, choisissez une option.**

Note: En concentrant le suivi au niveau des espèces, des changements dans les processus écosystémiques importants pour les humains pourraient ne pas être détectés. En concentrant le suivi au niveau des processus écosystémiques, des changements ou des pertes d'espèces pourraient ne pas être détectés s'ils ne causent pas d'impacts détectables sur ces processus.

- Espèces
- Processus écosystémiques

6. **Quel(s) type(s) d'espèces pensez-vous que le programme de suivi de la biodiversité devrait prioriser? S'il vous plaît, choisissez une ou deux options même si vous avez choisi les processus écosystémiques à la question #5.**

- Espèces désignées vulnérable ou menacées / espèces à statut précaire (*Exemples: tortue des bois, Grive de Bicknell*)
- Espèces rares, mais pas en danger ou menacées (*Exemples: la plante carnivore sarracénie pourpre, la libellule « cordulie de Robert »*)
- Espèces communes (*Exemples: Crapeau d'Amérique, Chardonneret jaune*)
- Espèces sauvages à importance économique (*Exemples: saumon de l'Atlantique, érable à sucre*)
- Espèces rendant d'importants services écologiques (*Exemples: moules d'eau douce, bourdons*)

-
- Espèces emblématiques (*Exemples: caribou, oies des neige*)
 - Espèces envahissantes et/ou nuisibles (*Exemples: vecteurs de maladies, moules zébrées*)
 - Autres: _____

7. **Croyez-vous que les efforts de suivi de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques devraient être concentrés sur des espèces avec une distribution étendue au Québec ou, au contraire, une distribution restreinte (p. ex. spécifiques à une région donnée)? S'il vous plaît, choisissez une option, même si vous avez priorisé les processus écosystémiques à la question #5.**

- Espèces avec une distribution géographique étendue
- Espèces avec une distribution géographique restreinte

8. **Pensez-vous que le programme de suivi de la biodiversité devrait inclure plus de sites avec moins de données récoltées par site ou moins de sites avec plus de données collectées par site? S'il vous plaît, choisissez une option.**

Note : Avec un nombre élevé de sites, il y aurait de plus grandes chances de détecter des changements locaux (en raison d'une meilleure couverture spatiale), mais moins de chances de détecter des changements mineurs (en raison d'un échantillonnage moins approfondi par site). Avec moins de sites, il y aurait au contraire plus de chances de détecter des changements mineurs, mais moins de chances de détecter des changements locaux.

- Plus de sites et moins de données par site
- Moins de sites et plus de données par site

9. **Pour chaque site du suivi de la biodiversité, croyez-vous que les efforts devraient être concentrés pour mesurer un grand nombre de variables différentes, mais pour un nombre restreint d'espèces, ou, au contraire, un nombre restreint de variables, mais pour un grand nombre d'espèces ? S'il vous plaît, choisissez une option.**

Note: Avec un grand nombre de données pour un petit nombre d'espèces, il y aurait de meilleures chances de comprendre les causes des changements affectant certaines espèces, mais les changements ne pourraient être détectés que pour ce petit nombre d'espèces choisies. Avec moins de données par espèces, mais plus d'espèces, il y aurait une chance plus élevée de détecter des changements qui affectent seulement quelques espèces, mais il y aurait moins d'opportunités de comprendre les raisons de ces changements.

- Plus de données par espèce pour un plus petit nombre d'espèces
- Moins de données par espèce pour un plus grand nombre d'espèces

10. **À votre avis, est-ce que le programme de suivi devrait être conçu de façon à générer principalement des signaux d'alarme (indications claires que des changements dans la biodiversité causés par les changements climatiques ont lieu) ou des connaissances scientifiques (indications sur la façon dont la biodiversité est affectée par les changements climatiques)? S'il vous plaît, choisissez une option.**

Note: Une approche basée sur les signaux d'alarme serait probablement générée plus rapidement et permettrait ainsi des réponses plus rapides, mais contribuerait moins à une compréhension scientifique des changements. Une approche basée sur une augmentation des connaissances scientifiques prendrait significativement plus de temps, mais serait plus complète et les connaissances plus facilement transférables à d'autres situations.

- Générer des signaux d'alarme
- Générer des connaissances scientifiques

11. Croyez-vous que des spécimens devraient être euthanasiés et placés dans des collections scientifiques pour être utilisés dans des recherches futures lorsque de meilleures technologies ou de plus grandes ressources seront disponibles pour les analyser? S'il vous plaît, choisissez une option.

- Oui
- Non
- Je n'ai pas d'opinion à ce sujet.

12. Seriez-vous prêt à consacrer une demi-journée par année, ou plus, de votre temps personnel pour participer à la collecte de données, en tant que citoyen, dans le cadre d'un programme de suivi de la biodiversité relié aux changements climatiques? S'il vous plaît, choisissez une option.

Note: Vous ne serez pas contacté si vous répondez « oui ». Cette question est strictement pour le sondage.

- Oui
- Non
- Je ne suis pas certain.

Annexe C Rencontre d'experts sur les indicateurs de biodiversité

Résumé de la rencontre

Une rencontre de deux jours a eu lieu à Québec les 17 et 18 avril 2011. Cette rencontre a réuni des experts des principaux groupes taxonomiques pour le Québec. Lors de la rencontre, les participants ont été séparés en groupes de travail en fonction de leurs expertises liées à des groupes taxonomiques. Les participants pour chacun des groupes étaient les suivants.

Habitats

Bert Klein – MRNF (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune)
Pierre Larue – MRNF
Cécile Albert – McGill
Steeve Garceau – MRNF

Plantes

Jocelyn Gosselin – MRNF
Catherine Perrier – DRF (Direction de la Recherche Forestière)
Nancy Hébert – MDDEP (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs)
Monique Poulin – Laval
Frédéric Boivin – UQÀM (Université du Québec à Montréal)

Champignons et insectes

Christian Hébert – SCF (Service canadien des forêts)
Conrad Cloutier – Laval
Jean-André Fortin – Laval
Louis Bernier – Laval
Jean Bérubé – SCF
Nathalie Desrosiers - MRNF

Vertébrés terrestres

Anouk Simard –MRNF
Jacques Jutras – MRNF
Yohann Dubois – MRNF
Daniel Fortin – Laval
Gilles Lupien – MRNF
Pierre Blanchette – MRNF
Yanick Gendreau – UQÀR (Université du Québec à Rimouski)

Invertébrés aquatiques et phytoplancton

Mélanie Desrosiers – MDDEP
Marie Lionard – Laval
Rebekah Kipp – McGill

Julie Moisan – MDDEP
Lyne Pelletier – MDDEP
Mathieu Cusson – UQÀC (Université du Québec à Chicoutimi)

Poisson

Pedro Peres-Neto – UQÀM
Yves Paradis – MRNF
Yvon Richard – MDDEP
Frédéric Lecompte – MRNF

Ici-bas ce trouvent les réponses des groupes pour 13 questions qui leurs a été soumises ainsi que les commentaires recueillis lors des retours sur les questions à la fin de chacune des deux journées de rencontre. La plupart des éléments avancés par le groupe des habitats ont été inclus dans les sections sur les organismes qu'ils concernaient ou dans la rubrique générale, car c'était une façon plus claire de présenter leurs interventions.

1. Déterminer les taxons (espèces ou taxons supérieurs) ou autres indicateurs (variables d'habitat [p.ex : productivité]) sensibles aux changements climatiques pour les différents groupes taxonomiques majeurs en fonction de différentes catégories :

Taxons économiquement importants

- Champignons comestibles.
- Pollinisateurs (principalement insectes).
- Les mousses dans les milieux humides.
- Les macroinvertébrés aquatiques.
- Beaucoup d'espèces de poissons (particulièrement les salmonidés).
- Les cervidés.
- Mammifères marins.
- Les petits mammifères.
- Gibier et animaux à fourrure en général.
- Poissons pour la pêche commerciale et sportive.

Taxons menacés ou vulnérables

- Les milieux humides et arctiques sont les milieux les moins protégés et ceux qui devraient être les plus affectés.
- Unionidé et moules en général (dû aux pertes d'habitat).
- Voir la liste des espèces menacées du MRNF.
- Chauve-souris.
- Les oiseaux limicoles sont déjà affectés (bécassine rousse). Le pluvier kilideer en déclin dû au changement de pratique agricole.
- Les oiseaux insectivores aériens sont en déclin (martinet – hirondelle) en lien avec les changements survenant au niveau des insectes.

Taxons rendant d'importants services écologiques (précisez le(s) service(s))

- Organismes des sols (décomposition et recyclage des nutriments).

-
- Champignons mycorrhiziens, en particulier les Glomales qui comptent seulement 200 espèces dans le monde pour toutes les endomycorhizes.
 - Champignons pathogènes.
 - Pollinisateurs.
 - Insectes prédateurs et parasitoïdes (contrôle des pestes).
 - Espèces exploitées pour la chasse, pêche, fourrure, cueillette, etc...
 - Amphipode (maillon important des chaînes alimentaires).

Taxons emblématiques

- Papillons diurnes et grands papillons de nuit (ex. sphynx, cecropia).
- Coccinelles.
- Fleuve/Toundra/Érablière.
- Ours polaire.

Peste, maladie ou espèces exotiques

- Les parasites des oiseaux, des petits mammifères et des amphibiens.
- Champignons et insectes ravageurs.
- Champignon causant la maladie du museau blanc chez les chauves-souris.
- Les champignons causant des maladies chez les anoues.
- Tordeuse des bourgeons de l'épinette.
- Coccinelle asiatique.
- Pucerons.
- Moustiques et autres insectes piqueurs.
- Dendroctone du pin.
- Agrile du frêne.
- Certaines EEE sont actuellement limitées par la longueur de la saison de croissance et pourraient profiter des CC :
 - Laitue d'eau, *Pistia stratiotes*, limité par la température, observée dans les jardins, reproduction non documentée.
 - Jacinthe d'eau, *Eichhornia crassipes*, limité par la température, observée à chaque année, reproduction non documentée.
 - Hydrille verticillé, *Hydrilla verticillata*.
 - Renouée japonaise, *Fallopia japonica*, viabilité des graines et limite nordique de sa répartition.
 - Roseau commun, *Phragmites australis*, limite de la répartition nordique.
 - Châtaigne d'eau, *Trapa natans*, limité au sud du Québec.
 - Tamarix, limité par les hivers, présent dans les provinces des Prairies.
 - Kudzu, limité par les hivers, mais survit dans le sud de l'Ontario.
 - Dompte-venin de Russie, *Cynanchum rossicum*, répartition et impacts peu connus.
 - Dompte-venin noir, *Cynanchum louiseae*, répartition et impacts peu connus.
- Cyanobactéries.
- Dinoflagellés, particulièrement *Alexandrium tamarense* dans le fleuve. Ils peuvent causer d'importantes fleurs d'eau toxiques.
- Moules zébrés et les autres moules exotiques (*corbicula*) migrant vers le nord.
- Écrevisse.
- Le crotale des bois et l'opossum à la frontière sud.

2. Déterminer les caractéristiques de votre groupe taxonomique ou variable d'habitat devant répondre le plus rapidement aux changements climatiques (ex., comportement, abondance, taille, reproduction, caractéristiques d'habitat) et les indicateurs pour les mesurer :

Éléments généraux

- Phénologie des espèces devrait être dans les premiers éléments à changer.
- Ensuite, les proportions (équitabilité) des organismes vont changer avant la richesse, mais ça nécessite des données d'abondance et plusieurs événements cycliques peuvent confondre les analyses.
- La diversité.
- Limites nordiques et sud des espèces en générales devraient changer.
- La résilience des écosystèmes va être affectée, mais c'est difficile à mesurer.
- Le ratio carbone-azote et la stœchiométrie des écosystèmes en général avec des impacts inconnus.
- La *quasi-absence* d'aires protégées de grandes superficies en forêt boréale et le peu d'habitats intacts rendent difficiles d'isoler le phénomène des CC par rapport aux autres intrants sur les organismes boréaux.
- L'apparition de nouvelles espèces provenant d'autres territoires qui peuvent influencer les communautés locales.

Habitats

- Quantité et la taille des mares dans les milieux humides.
- Le taux d'humidité des milieux humides (peu être estimé *via* imagerie radar – travaux de Monique Bernier - ULaval).
- Température de l'eau et lien avec oxygénation, les petits cours d'eau seront particulièrement affectés par l'augmentation de la température.
- Les pertes d'habitat. Par exemple, disparition de cours d'eau de tête et de ruisseau temporaire.
- Certains des habitats sont plus vulnérables : petits cours d'eau, petits étangs, lacs peu profonds. Ces habitats sont plus sensibles au réchauffement, aux crues éclairées et à la sécheresse
- Le niveau d'eau et la vitesse des courants.
- Les changements des précipitations pourraient altérer les apports en carbone organique dissout dans les cours d'eau.
- Les changements d'apport en carbone organique et les changements de température vont affecter la stratification et le développement de l'hypoxie estival et hivernal. Ceci devrait particulièrement affecter les petits lacs de moins de 10ha.
- Couverture nivale hivernale.
- Température hivernale et survie des organismes.
- Pédogénèse et modification des sols.
- Les changements de thermoclines et de distributions thermiques dans les lacs et rivières

Plantes

- Phénologie (voir *Plantwatch* – programme canadien).

-
- Aoutement – moment de l’arrêt de la croissance.
 - Moment du début de la sénescence des arbres.
 - Pour les EEE, des changements dans la reproduction. Par exemple, la reproduction sexuée devenant possible avec l’augmentation des températures.
 - Vitesse de croissance.
 - Succès de germination des graines.
 - Proportion des groupes fonctionnels dans les milieux humides.
 - Production sirop d’érable, les dates de début et de fin.
 - Pic d’herbe à poux (disponible par les services de santé publique).
 - Forme des arbres dans le nord, par exemple de kromultz à ériger pour les épinettes.
 - Régénération des annuelles et plantes printanières en milieu forestier, date d’émergence et de mort.

Champignons et insectes

- Phénologie (ex. stade ailé des pucerons).
- Date d’émergence printanière.
- Date d’émergence des stades ailés.
- Étudier intensivement les organismes des sols.
- Composition des communautés de champignons mycorrhiziens et de champignons endophytes vivants à l’intérieur des différents organes des plantes et des autres organismes.
- Synchronisation insectes-plantes pour la pollinisation et l’herbivorie.

Vertébrés terrestres

- Phénologie des oiseaux. Par exemple, les dates de migration et les dates de pontes. Elles ont déjà changé pour certains (parulines), mais ne touchent pas encore les oiseaux aux longues migrations.
- Le moment des crues et des coups d'eau et les sécheresses ont une grande influence sur les reptiles et amphibiens (anoures et salamandres). Par exemple, les forts débits et inondations des ruisseaux (salamandre de ruisseaux; Lowe 2012 Salamandre pourpre ÉU) et des rivières (site de ponte de tortue en bordure des rivières; Tortue-molle rivière au Brochet Lac Champlain) peuvent influencer la survie et la reproduction.
- L’augmentation de la température de l’eau des ruisseaux pourrait diminuer la quantité d’oxygène et affecter les stades larvaires des salamandres. Hypothèse à vérifier.
- La synchronicité l’apparition et la disparition des étangs temporaires suite à la fonte des neiges et la reproduction des amphibiens pourrait être affectée.
- Apparition de maladies avec l’augmentation de la température (p. ex. chytride chez les amphibiens).
- Pour les tortues, il y a moins de problèmes évidents, mais c'est dur à suivre.
- Les changements dans la condition corporelle (par exemple, le gras de fesse pour le cerf) précurseur aux changements d'abondance.
- Pour les animaux à fourrure, noter les dates de changement de la fourrure, la qualité de la bourre.
- Calculer les hormones de stress dans les fèces et les poils.
- Reproduction : fertilité, fécondité, période de reproduction, survie des jeunes.
- Le ratio masse/volume et changement de taille dans le gradient nord/sud.
- Les charges parasitaires des organismes.

Invertébrés aquatiques et phytoplanctons

- La sensibilité des organismes va dépendre de leur préférence thermique, de débit et de niveau d'eau et des variations de leur habitat à ces niveaux.
- Les macroinvertébrés sont déjà très utilisés pour les suivis en lien avec les cc et les autres perturbations.
- Le ratio entre macroinvertébrés d'eau froide vs d'eau chaude dans les communautés.
- En général, il y a peu de connaissances sur les amphipodes et les cc. Les caractéristiques les plus importantes à suivre sont le pH, l'oxygène dissous, la biomasse des microalgues benthiques et la charge détritique (p. ex., détritiques de feuilles de plantes terrestres). L'étude des genres *Gammarus* et *Hyaella* serait probablement à privilégier.
 - Il est à noter que les amphipodes du complexe *Hyaella azteca* sont souvent utilisés lors des tests écotoxicologiques visant à évaluer la qualité de l'eau. Hors cette espèce est maintenant subdivisée en plusieurs et il serait important de répertorier ce complexe d'espèces au Québec et les effets du CC sur celui-ci.
- Débalancement de la composition élémentaire (C, N, P) entre les amphipodes et leurs sources de nourriture pourrait les affecter.
- Le phytoplancton est principalement influencé par la température et le brassage, deux éléments susceptibles de changer.
- La biomasse des phytoplanctons, l'intensité et la fréquence des fleurs d'eau causées par les dinoflagellés et les cyanobactéries. Les blooms de cyanobactéries toxiques peuvent affecter tous les autres organismes des milieux aquatiques et des animaux se nourrissant dans ces plans d'eau.
- La vitesse de croissance.
- Le nombre de « portées » par année (voltinisme).
- Les modes de locomotion et d'alimentation.
- Les grands inconnus sont les stades dormants des espèces aquatiques. Ces stades renferment une grande diversité génétique endormie qui pourrait se réveiller avec les cc.
- Dans une étude anglaise, les odonates ont eu la plus grande expansion nordique suivie par les coléoptères et les poissons.

Poissons

- Le polymorphisme pourrait varier (moins d'un morphe au profit d'un autre) dû aux changements dans les conditions environnementales. Ceci peut avoir un grand effet sur la démographie des espèces.
- Les poissons vont utiliser les rivières à l'axe nord-sud pour migrer, mais ceux habitant des rivières d'axes est-ouest auront de la difficulté à survivre si leur environnement thermique change de façon importante. Suivre des rivières suivant ces deux axes serait intéressant.
- Changement dans l'utilisation spatiale des poissons des lacs en fonction des variations de température horizontaux et verticaux de l'habitat.
- Changement de distribution de la taille et de la phénologie des poissons de lacs.

3. Déterminer les méthodologies d'échantillonnage de ces taxons et indicateurs (temporelle, spatiale, etc.) dans le cadre d'un programme de suivi :

Éléments généraux

- Établir des sites avec différents niveaux d'échantillonnage (extensif et intensif).
- Suivi hiérarchique – du paysage (satellite/photo aérienne) à des parcelles à l'intérieur de sites
- Suivre les réseaux trophiques.
- Faut-il se soucier des sous-espèces? De la variabilité génétique?
- On doit établir des postes de taxonomistes permanents qui offriraient également des formations.
- En général, les EEE et les espèces provenant du sud vont envahir les milieux ouverts et perturbés en premier, il serait important d'en inclure dans le réseau.
- Il faut des indicateurs différents pour les différentes échelles.
- Favoriser une approche écosystémique avec les gradients nord-sud et est-ouest et se concentrer dans les écotones. Pour ce faire, il est intéressant de se baser sur la séré écologique du Québec.
- Le suivi devrait être fait dans des milieux perturbés et dans des milieux protégés.

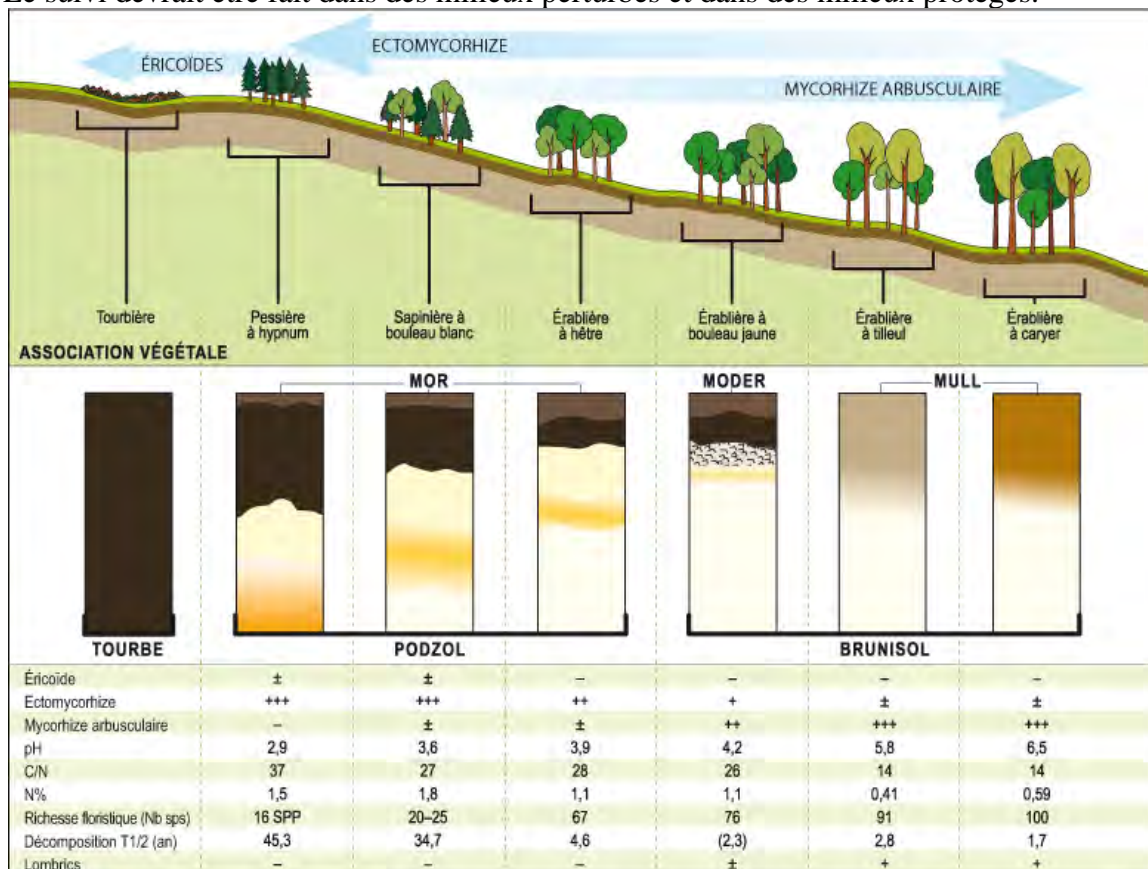


Figure 5.1 – Sère écologique allant de la vallée du Saint-Laurent vers les sommets de la chaîne montagneuse des Laurentides. Les forêts feuillues à mycorhizes arbusculaires occupent les sols alluvionnaires en basse altitude; elles ont été en grande partie remplacées par des cultures agricoles. Les forêts conifériennes à ectomycorhizes occupent les sols plus grossiers, en altitude.

- Source: J. André Fortin, Université Laval

Habitats

- Inventaire *via* imagerie satellite.
- Il y a des problèmes de détection des petits milieux humides en milieu forestier.

-
- Évolution de l'utilisation des sols.
 - En premier, il faudrait regarder si les écosystèmes fonctionnent bien, et appuyer ces mesures en suivant certains organismes.
 - Il faudrait des profils verticaux et horizontaux physico-chimiques de lacs, particulièrement en fin d'été pour détecter l'importance des zones d'époxé.
 - La couleur des lacs peut être mesurée par télédétection afin de déterminer la quantité de carbone dissout dans l'eau. Des travaux sont en cours sur le sujet à l'UdM et à l'UQÀM.
 - Il faut mesurer les caractéristiques des bassins versants, particulièrement l'importance des terres humides afin de lier cette information aux quantités de carbone organique dissout.

Plantes

- Les mousses dans les milieux humides (influencées par chaleurs) – leurs proportions respectives peuvent facilement être étudiées dans les tourbières ombrotrophes, mais l'identification à l'espèce est difficile. La modification de leurs proportions est indicatrice de changement hydrique. La relation entre les proportions des plantes vasculaires et des mousses est également indicatrices de changements.
- La coalescence des mares (diminution du couvert végétal en tourbière) est également indicatrice de changement (voir travail de S.Payette [Laval] sur le sujet).
- Il faudra faire des choix dans les types de milieux humides échantillonnés – ombrotrophe vs minérotrophe.
- Afin de déterminer la localisation des sites, on peut se fier en partie sur les cartes écoforestières, et ce, même pour les milieux humides. Auparavant, il y avait des problèmes pour ces dernières, cependant dans les nouvelles cartes écoforestières les milieux humides seront spécifiés dans l'un de 10 types possibles. C'est déjà commencé pour les cartes qui ont été renouvelées lors des 3 dernières années et sera complété d'ici environ 10 ans.
- Éléments à prendre en considération pour choisir la localisation des sites pour les inventaires en milieux forestiers : cartographie des cc, espèces dominantes des peuplements, type de dépôts, inclure les différents types écologiques et des écotones, échantillonner des milieux protégés et d'autres perturbés.
- Utiliser la télédétection. Par exemple, le NDVI peut permettre d'observer les changements majeurs.
- Pour les plantes, le dénombrement d'individu est possible pour les arbres et semis. Pour les autres groupes, le pourcentage de recouvrement ou des données de présence – absence doivent être mis de l'avant.
- Échantillonnages de graines afin d'évaluer la viabilité, spécialement des EEE pour lesquels on ne croit pas qu'elles produisent des graines viables.
- Suivi des banques de graines.
- Identifier les arbres sur les sites forestiers et les remesurer à chaque visite.
- Récolter des feuilles afin de vérifier la composition en organismes endophytes pourrait être intéressant si les techniques de métagénomiques sont utilisées.

Champignons et insectes

- Les données d'abondance relatives peuvent être obtenues facilement pour les insectes.
- Divers types de trappes à insectes peuvent être utilisées et des protocoles fiables existent. Par exemple, des pièges lumineux, des pièges à suction, des trappes au sol. Elles apportent des données quantitatives.

-
- Calculer le nombre de cadavres de pollinisateurs et/ou d'éphémères le long des routes.
 - Les lombrics peuvent être mesurés en utilisant une batterie d'automobile (technique non létal).
 - Noter les dates d'émergence des insectes au printemps. Cependant, pour la phénologie des insectes, les pièges doivent être visités toutes les semaines. (couteux – mais données quantitatives)
 - Pour les grands ravageurs forestiers (TBE, dendroctone de l'épinette) : suivi par imagerie satellite.
 - Pour les champignons c'est surtout la métagénomique qui est utilisée pour identifier les espèces et déterminer les abondances relatives. Nouvelle technique en pleine expansion qui se sert de l'ADN du sol. Également, l'utilisation du bar-coding peut être très utile.
 - Suivi de la fructification des champignons (nécessite l'ajout de mesures d'humidité du sol).
 - L'augmentation de la teneur en CO₂ peut avoir un grand impact sur le système végétatif des champignons aériens. Les principaux champignons aériens sont des pathogènes foliaires.
 - Dénombrement des spores de glomales dans les sols.
 - Calculer la surface foliaire nécrosée par les maladies.
 - Pour les deux groupes, des mesures abiotiques du sol sont nécessaires pour les analyses.
 - Mesurer la vitesse de décomposition dans les sols à l'aide de « litter bag » et de languette de bois afin d'estimer l'activité microbienne.

Vertébrés terrestres

- Pour les vertébrés terrestres, les réseaux de suivi actuels captent les signaux généraux, il faudrait ajouter des suivis pour certains groupes tels les micromammifères, les anoures et quelques oiseaux.
- Ça prend des données environnementales locales pour certains petits organismes. Par exemple, la pente et le substrat peuvent être importants pour certaines espèces (ex. : campagnol des rochers). Ces paramètres de microhabitats sont difficiles à obtenir à l'aide des outils cartographiques disponibles. Une visite de terrain est souvent nécessaire pour juger de la valeur d'un habitat de cette espèce.
- Pour les milieux terrestres, on peut regarder principalement les espèces indicatrices. Par exemple, pour les oiseaux en suivant 30 espèces, on sait ce qui arrive aux autres.
- Il est souvent difficile de prouver l'absence pour ces organismes. Surtout pour les espèces avec de grands territoires bougeant beaucoup.
- Il est possible d'utiliser des stations d'écoute fixes qui mesurent plusieurs espèces à la fois, de façon automatique. Environ 1000\$ par appareil.
- Le suivi doit être dynamique en fonction de l'habitat, car les sites de mise bas et les étangs temporaires bougent dans le temps pour certains de ces organismes.
- Mesurer les niveaux et les coups d'eau, ils ont un impact indirect sur les anoures et les tortues pour la ponte. Les stations de niveau d'eau du Centre d'expertise hydrique peuvent permettre de mesurer la récurrence et l'importance des coups d'eau (inondations) des ruisseaux et rivières. À l'inverse, l'état des communautés de salamandres indique si le régime hydrique est bon et celui des grenouilles l'état de l'hydropériode.
- Pour les salamandres, comme les adultes sont difficiles à observer, récolter les masses d'œufs pourrait être un indicateur. L'identification de l'espèce peut facilement se faire avec des outils génétiques.

-
- Pour les salamandres, les techniques de recherche active sur le bord des ruisseaux sont à favoriser. Leurs populations sont plus stables que les anoues, mais il y a un biais de recherche. Ça prend du grillage et du bardeau et ça nécessite de l'entretien). Cette technique est plus complexe dans le nord et pour les ruisseaux temporaires. L'efficacité varie en fonction du type de salamandre.
 - Pour les anoues, il vaut mieux cibler les espèces avec des cycles de vie rapides.
 - Pour les anoues, des cotes d'abondance peuvent être obtenues par l'écoute des chants. La date des écoutes doit être notée. La méthode existe et est standardisée avec des périodes préétablies par espèce. Le suivi des espèces abondantes (p. ex. rainette crucifère, grenouille des bois) pourrait être un bon indicateur des changements de la dynamique des écosystèmes « étangs temporaires ». Leurs chants rendent ces espèces faciles à suivre.
 - Le suivi acoustique automatisé est possible pour les chants d'oiseaux, de chauve-souris et d'anoues. C'est d'ailleurs commencé pour les anoues à Trois-Rivières. Par contre, il y a du chevauchement dans les cris de certaines espèces de chauves-souris.
 - Des méthodes standardisées pour l'écoute des cris de chauve-souris existent également.
 - Pour les oiseaux, décompte des individus aux chants (point d'écoute/effort) ou visuellement.
 - Pour certaines espèces comme les mésanges, il est possible de les appeler et d'écouter les réponses.
 - Le décompte visuel pour l'oie des neiges comporte des erreurs alors que c'est plutôt bon pour les rapaces.
 - Le baguage d'oiseaux est complexe et couteux. C'est fait à Tadoussac et à l'arboretum Morgan de l'université McGill.
 - Pour les micromammifères, les amphibiens et les reptiles, les suivis doivent être à long terme, car les populations sont cycliques ou ont des dynamiques en dents de scie.
 - Il serait possible de regarder les données provenant du trappage pour les animaux à fourrure. Il serait également possible de prendre des échantillons de poils de ces animaux pour calculer par exemple la qualité de la bourre. Une très grande proportion de toutes les peaux est vendue à la même place (Sudbury, Ontario) avec leur provenance inscrite. Y aller pour récolter les données est envisageable. Cependant, il y a des biais en fonction du marché. C'est difficile à analyser.
 - Ça prend des permis pour suivre les petits mammifères (Permis SEG).
 - Pour les mammifères, si des lignes de pièges et de trappes sont utilisées, celles-ci doivent être visitées régulièrement pour éviter la mort des individus. Il faut noter l'effort de piégeage et corriger pour certains biais.
 - Piège à poil et test d'ADN sur les poils pour identifier les espèces.
 - ADN pour l'inventaire de petits mammifères sans capture (maîtrise de Véronique Cloutier).
 - Voir le protocole révisé pour les inventaires de micromammifères : Par l'Équipe biodiversité et maladie de la faune, Direction de l'expertise sur la faune et des habitats, Faune Québec, 2011, en révision.
 - Les techniques de capture - marquage - recapture.
 - Des caméras en forêt pour détecter la présence des grands mammifères.
 - Les traces de broutement par les lièvres.
 - Identification des fèces (p. ex. crottin de lièvres).
 - Les pièges à fosse avec dérivation.

-
- L'utilisation des données de carcasses récoltées sur le bord des routes.
 - Noter le gras de fesse pour les cervidés aux stations d'enregistrements de chasse. On peut y suivre d'autres éléments de conditions corporelles également.

Invertébrés aquatiques et phytoplanctons

- Il devrait y avoir des stations fixes pour documenter les changements accompagnés d'études ponctuelles à des endroits où les changements semblent plus importants ou pour y surveiller des éléments spécifiques.
- Pour le phytoplancton, il est important de tenir compte des degrés jours et de l'importance et de la fonte du couvert de glace pour confronter la structure des communautés. Cette information est moins importante pour les macroinvertébrés benthiques (MIB). En fait, le mieux est de connaître la succession annuelle de la communauté pour déterminer les moments où échantillonner. Le bon moment diffère d'un endroit à l'autre. Il faudra vérifier dans le temps si ces cycles demeurent identiques.
- Utiliser la structure taxonomique et fonctionnelle pour décrire les communautés.
- Pour le cas d'un suivi des communautés de MIB, l'identification au genre semble suffisante. De nombreuses études utilisent ce niveau d'identification (Stamp et al. 2010; U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 2011).
- Pour les MIB, il faut échantillonner minimum une fois par an :
 - Idéalement, échantillonner au printemps et à l'automne (favoriser l'automne si seulement une fois).
 - Il y a habituellement une stabilité interannuelle, mais une grande variabilité saisonnière.
 - Il y a possibilité d'utiliser les degrés jours pour déterminer la période d'échantillonnage d'une année à l'autre.
 - Il faut éviter les données de présence/absence et favoriser les données d'abondance.
- Pour les MIB, plusieurs taxons ont des préférences thermiques. Les EPT - Ephemeroptera, Plecoptera et Trichoptera - (ou autres) sténothermes (faible tolérance aux variations thermiques) d'eau froide offrent une avenue intéressante et plusieurs travaillent sur ce trait biologique pour rendre compte des CC. Les métriques utilisées fréquemment peuvent être adaptées pour les rendre sensibles aux changements climatiques : EPT cold /EPT tot, EPT warm/ EPT tot, EPTcold, %OCH (Hamilton et al. 2010, Lawrence et al. 2010). Une liste de taxons avec leur préférence à l'eau froide ou chaude peut être trouvée dans Stamp et al. (2010).
- Pour les MIB, il faut des stations positionnées de préférence dans les habitats vulnérables aux changements climatiques, i.e petits cours d'eau et dans les régions où l'augmentation des températures et/ou les changements dans les précipitations seront marqués. Besoin de nombreuses variables d'habitat, d'utilisation du territoire. Calcul de variables (métriques), indices multimétriques, traits biologiques. Comparaison des indices, métriques ou traits entre les années. Analyse multivariée, variation spatiale et temporelle.
- Plusieurs auteurs parlent du groupe EPT (éphéméroptère, plécoptère et trichoptère) qui est déjà reconnu pour sa sensibilité à la pollution organique et à la modification de l'habitat. Les taxons d'eau froide semblent avoir une tolérance aux variations de température plus étroite que les taxons d'eau chaude. L'EPA (2011) a établi une liste de taxons indicateurs d'eau froide pour la Caroline du Nord; 20 taxons/32 sont des EPT

(genre). Une liste de taxons d'eau chaude est également fournie ainsi qu'une liste de température optimum.

- Déterminer la variabilité naturelle des débits selon les classes WET, NORMAL, DRY (si nécessaire) et établir les relations avec le benthos. Pour cela, il est nécessaire d'avoir plusieurs années de données benthos, précipitations et température.
- MIB, D'autres traits influenceront l'adaptation aux CC : Mode alimentaire -avantage aux généralistes, résilience à l'assèchement, Mode de locomotion - facilité à se déplacer, Émergence : Cycle court avantaagé, Préférence au courant (rhéophilie), voltinisme, l'occurrence dans la dérive, dispersion des femelles (Poff et al. 2010; Lawrence et al. 2010).
- Cinq paramètres servent à décrire les espèces sensibles aux impacts des CC (Hering et al. 2009). 1. endémisme 2.préférence pour les conditions printanières 3. préférence pour les températures froides 4. Courte période d'émergence 5. Alimentation restreinte.
- Pour les MIB : Les protocoles sont différents selon les habitats aquatiques échantillonnés et non selon les régions. Par exemple petits cours d'eau à substrat grossier, petits cours d'eau à substrat meuble, lacs, milieux humides...
- Pour le phytoplancton, l'idéal est trois fois par année : printemps – été (préférée) – automne.
- Ces groupes sont reconnus comme des très bons indicateurs de pollutions et de perturbations en général.
- Il faut échantillonner le matin ou à un moment standardisé.
- Plusieurs protocoles éprouvés existent pour ces organismes. Différents indicateurs peuvent être utilisés : Chlorophylle a et b, production de biomasse, croissance des populations, production secondaire
- La méthode d'échantillonnage pour le phytoplancton la plus répandue est un suivi par analyses microscopiques. Cette méthode est dispendieuse (car nécessitant une personne formée à l'identification des espèces) et longue, mais elle est aussi très précise et permet d'avoir des données de la composition de la communauté jusqu'à l'espèce.
- Il existe aussi des sondes de Chlorophylle a (pour estimer la biomasse totale de phytoplancton) ou des sondes de phycobilines (pour estimer l'abondance des cyanobactéries) qui fonctionnent comme des sondes YSI.
- La télédétection fonctionne bien pour le suivi de la biomasse totale (Chla) et donc pour la détection des blooms de surface. Pour ce qui est des lacs, la seule limite est la résolution des images et donc la taille du lac.
- Un suivi des paramètres physique peut être facilement réalisé en plaçant une sonde dans le lac qui enregistre en continu la concentration en Chlorophylle a.
- Le barcoding est prometteur et en développement, mais ce n'est pas au point. Le problème est que nous n'avons pas encore une bonne banque de référence pour les espèces.
- Pour le périphyton, on peut utiliser des biofilms.
- On pourrait ajuster la résolution du niveau taxonomique en fonction de la réponse appréhendée. Par exemple, une résolution plus fine pour certains taxons (cyanobactéries). Pour les cyanobactéries, une identification au genre est déjà un très bon indicateur.
- Le phytoplancton peut plus facilement être suivi dans les grandes rivières et les lacs.
- Pour l'identification du phytoplancton, on compte en général de 1 à 2 jours pour un échantillon selon la diversité et la quantité de détrit.

-
- Les champignons aquatiques sont très importants, mais très peu connus. Il pourrait peut-être être suivi par l'ADN environnemental. On devrait associer de la recherche à cet élément.

Poissons

- Impact des prises sur la survie des populations. Les filets maillant tuent beaucoup de poissons. Ça pourrait avoir un impact dans les petits lacs si les mesures sont faites aux 2 ans. Techniques de pêche environnementale : ADN, pêche électrique.
- Deux sortes de réseau de suivi, un plus exhaustif avec estimation d'abondance et accompagné du suivi d'autres types d'organismes (30 lacs). Un autre avec seulement présence/absence, mais sur plus de lacs (90 lacs).
- Les lacs et les rivières, des techniques différentes (fillets maillants versus pêche électrique).
- La façon standard est d'utiliser la présence / absence. Il est très difficile d'estimer l'abondance des poissons.
- Pour les espèces commerciales, des suivis plus détaillés avec la distribution d'âge et taille sont envisageables.
- Possibilité de choisir de petits lacs avec les affluents et de mesurer les refuges thermiques.
- Pour les réseaux fluviaux, il faudrait choisir des bassins versants qui sont jugés plus importants. Cependant, nous pensons que ce serait une tâche très difficile et que le programme devrait se concentrer sur les lacs où les populations et les espèces seront plus sensibles.
- On peut utiliser l'ADN environnemental pour repérer les espèces rares dans les lacs.
- Les plus gros problèmes pour les poissons sont les modifications de la thermocline. Les poissons d'eau froide vont de plus en plus chercher des refuges thermiques dans les milieux anoxiques et utiliser les rivières. Il faudrait des systèmes de sondes thermiques (60\$ chaque et environ 40 par lac) pour faire ces suivis.
- Pour les rivières du Québec méridional où la conductivité des eaux est élevée, la pêche à l'électricité est la moins sélective et donne donc la meilleure image de la composition spécifique des communautés piscicoles.
- Pour les rivières nordiques où la conductivité est naturellement faible, la pêche aux filets maillants est la plus appropriée.
- Une mesure par année à la fin de la période estivale/début de la période automnale est habituellement suffisante pour donner une bonne représentativité de la composition de la communauté piscicole. À cette période les espèces sont distribuées uniformément alors qu'au printemps et à l'automne, leur distribution est plus hétérogène, car plusieurs sont sur leurs aires de frai.
- Suivre l'évolution du gel et du dégel des lacs (par photos aériennes).

4. Déterminer les connaissances taxonomiques de la province pour les différents groupes :

Éléments généraux

- Manque de connaissance sur les réseaux trophiques pour les différents écosystèmes.

Plantes

-
- Pour les arbres et la majorité des arbustes, il y a peu d'espèces et c'est facile.
 - L'expertise en herbacées est à former. En milieu forestier c'est plutôt facile, mais ça se complique en milieu agroforestier et en milieu ouvert.
 - Dans les milieux humides, pour les mousses et sphaignes, le mieux pouvant être fait au terrain est d'identifier aux sous-groupes, car sinon il y aura beaucoup de risques d'erreur. Des cours pour les plantes des milieux humides peuvent être donnés par l'atelier du CSBQ sur les milieux humides. L'expertise pour les mousses et sphaignes existe, mais elle est rare. Il est plus réaliste de se contenter des groupes fonctionnels.
 - Dans les milieux humides, c'est également facile pour les arbustes de type éricacée.

Champignons et insectes

- Il y a de nombreux et excellents mycologues amateurs pouvant collaborer. Cependant, il y a seulement quelques chercheurs au Québec. Ils utilisent surtout l'ADN pour l'identification.
- Insectes, bonnes expertises pour certains groupes (ex. lépidoptères) alors que pour d'autres, très peu d'expertise disponible (ex. pucerons où 2-3 personnes s'y connaissent vraiment).
- Araignée – très bonne expertise.
- Diptères – très bonne expertise.
- Microarthropodes du sol, faible expertise, mais ils pourraient peut-être être échantillonnés à l'aide du barcoding.
- Coléoptères – excellentes expertises.
- Insectes pollinisateurs – bonnes expertises.
- Lépidoptères – très bonne expertise

Vertébrés terrestres

- Il y a assez d'expertise pour les amphibiens, les reptiles, les oiseaux, les mammifères (un peu moins pour les micromammifères).
- Les chauves-souris sont les plus problématiques avec seulement 5 à 6 spécialistes.
- Pour les oiseaux, il y a une grande différence de capacité entre les observateurs, car 90% des données proviennent de 10% des observations.
- Micromammifères : Avec un peu de formation, on peut identifier de nombreuses espèces sur le terrain surtout chez les rongeurs. Les identifications en laboratoires demandent un peu plus de connaissances, mais se font quand même relativement rapidement pour du personnel habitué à cette tâche. Les individus appartenant au genre *Peromyscus* demandent des tests d'ADN.

Invertébrés aquatiques et phytoplanctons

- Il est relativement aisé d'identifier au genre, mais c'est parfois au niveau de l'espèce que c'est intéressant et c'est beaucoup plus difficile.
- Nombre de taxonomistes limités. De plus, beaucoup des taxonomistes de ces groupes se dirigent vers la retraite. On pourrait se servir de ce genre de suivi comme levier pour promouvoir la taxonomie.
- Il y aurait un besoin de formation pour les deux, car il y a un nombre insuffisant de personnes qualifiées.
- Il y aurait un besoin de laboratoire permanent.
- Il y a la possibilité de contrats à des externes.

-
- L'identification sur le terrain n'est pas possible.
 - 2-3 jours/échantillon pour le tri et identification (300 à 1000\$)

Poissons

- Très bonne connaissance.

5. Déterminer quelles sont les mesures déjà prises par d'autres groupes :

Éléments généraux

- CDPNQ (centre de données sur le patrimoine naturel du Québec). Enregistrement de données d'occurrence d'espèces menacées, EEE, essaye d'intégrer les informations provenant des études d'impacts.

Habitats

- Joachen Jaeger (Université de Concordia) – indice de fragmentation du territoire appliqué au Québec.
- Dans les paysages fragmentés : les corridors et la connectivité – Jeff Cardille (UdM).

Plantes

- Cinq programmes de suivi forestier du MRNF (hormis pour les coupes, aucun n'inclut de sites fortement anthropisés):
 1. Les placettes échantillons temporaires : 200 000 placettes visitées une fois avec des mesures d'arbres par classe de diamètre.
 2. Programme d'inventaire écoforestier (permanent). 12 000 sites. Dénombrement par espèces et taille pour toutes les espèces avec la capacité de dépasser 4m. Ceci représente un noyau central de site déjà protégé. Il faut regarder la structure spatiale des sites, mais ce programme pourrait servir de colonne vertébrale au futur programme de suivi. Il faudrait ajouter la régénération au sol et les herbacées.
 3. Points d'observations écologiques (1986-2000) – inventaires avec recouvrement en espèces végétales, sphaignes, mousses, lichens, régénération des arbres. 28 000 sites. Données de sols (épaisseur des horizons, pH, types de dépôts, couleur de l'horizon). Temporaire, visité une fois chaque. Au sud du 52^e parallèle.
 4. Inventaire forestier national (Canada) – 70 placettes au Québec, inclus débris ligneux.
 5. Suivi des effets réels : 1990 – plusieurs centaines de sites avec des mesures en forêts non traitées vs traités afin de voir les effets des traitements sylvicoles aux 5 ans. Jean-Pierre Saucier à la DRF s'occupe de ce programme de suivi.
- Base de données de tourbières déjà mesurées au moins une fois : environ 5000 quadrats de différentes tailles répertoriés une fois, grand gradient nord-sud. Données sur les espèces et les conditions physico-chimiques (M. Poulin).
- Suivi des plantes exotiques envahissantes des milieux humides du Saint-Laurent dans le cadre du Plan d'action Saint-Laurent. Le suivi était sous la responsabilité d'Environnement Canada jusqu'en 2010. Il est maintenant sous la responsabilité du MDDEP, (Isabelle Simard, coord. EEE, 418.521.3907, poste 4417 isabelle.simard@mddep.gouv.qc.ca).
- Des réseaux de détection sont en développement dans le cadre du plan d'action sur les EEE du MDDEP, même contact.

Champignons et insectes

- Myco-Québec : Roland Labbé 17 000 photos, 2 200 espèces.
- Société internationale pour la conservation des champignons (avec l'IUCN).
- Les associations d'entomologistes amateurs reçoivent beaucoup d'information.
- Les différents ministères possèdent de larges banques de données sur les insectes.
- Entomofaune du Québec (André Francoeur), 300 000 fourmis, base de données du SIGEB.
- AEAQ – base de données sur les papillons.
- MRNF et RIMA – données historiques sur les insectes et les maladies des arbres de 1936 à aujourd'hui.

Vertébrés terrestres

- Carnet du trappeur - Origine de la récolte des trappeurs pour les animaux à fourrure.
- La base ÉPOQ (Étude des populations d'oiseaux du Québec, oiseaux).
- SOS-POP, pour les espèces d'oiseaux menacées.
- La base BBS (breeding bird survey, oiseaux).
- L'Atlas des oiseaux nicheurs.
- Steeve Cumming, une banque de données pan canadien sur les oiseaux, National boreal bird habitat modeling project. Inventaire des canards de la forêt boréale.
- Banque de données pan canadien sur les oiseaux, National boreal bird habitat modeling project (Steeve Cumming). Inventaire des canards de la forêt boréale (Marcel Darveau).
-
- Suivi des rapaces à Tadoussac et au Bic.
- Inventaire des canards de la forêt boréale.
- Réseau chirops (15 routes), un réseau de route d'écoute standardisé pour les chauves-souris.
- Atlas des amphibiens et des reptiles.
- Il y a un réseau de suivi des salamandres aux USA utilisant des planchettes.
- Le suivi des anoues (40 routes) depuis 1993, mais ça ne couvre pas toute la province.
- Le problème de tous ces réseaux est qu'ils ont des données de présence et non d'absence.
- Banque de données des animaux à fourrure.
- Banque de données sur la grande faune.
- Peu de données sur les micromammifères : la banque de données sur les micromammifères gérée par le MRNF est la plus grande source d'information.

Invertébrés aquatiques et phytoplanctons

- Il existe plusieurs indices d'intégrité biotique basés sur ces organismes et ils sont mesurés régulièrement.
- Les macroinvertébrés sont inventoriés pour la pollution organique agricole.
- Le MDDEP fait un suivi du benthos depuis 2010. 11 sites sont suivis annuellement. Le réseau de suivi des MIB amorcé en 2010 à la DSÉE du MDDEP est constitué de 11 stations sentinelles avec l'ajout de 20 nouvelles stations rotatives à chaque année pendant 4 ans. Jusqu'à présent 154 stations situées dans des cours d'eau « marchable » ont été documentées. La méthodologie utilisée est standardisée et publiée.
- Le centre d'étude nordique a des stations d'échantillonnage dans le Nord du Québec et le MDDEP dans le sud. C'est facile à échantillonner.

-
- Banque de données d'écrevisses et de moules de Jean Dubbé. C'est plutôt anecdotique...

Poissons

- Réseau de suivi ichtyologique du Québec.

6. Déterminer le niveau de réalisme de faire le suivi de ces indicateurs :

Éléments généraux

- Coût élevé dans le nord.
- Problème de suivre les espèces rares, car elles sont peu fréquentes! Si on les détecte, elles n'étaient pas nécessairement absentes avant et si non détectées, elles ne sont pas nécessairement absentes.

Plantes

- Tourbières forestières difficiles à suivre, de nombreux types de communautés.
- En milieu forestier, plusieurs inventaires déjà en cours donc très réaliste.

Champignons et insectes

- 90% des espèces sont des champignons ou des insectes, donc il serait gênant de s'en priver...
- Avec les avancées en métagénomique, il est d'en plus réaliste, simple et efficace de suivre ces organismes. Souvent une visite suffit.
- Pour les indicateurs nécessitant plusieurs visites par année, c'est réaliste si on le fait sur une partie des sites choisis stratégiquement. Par exemple, suivre plusieurs types d'organismes + fructifications des champignons + humidité du sol.

Vertébrés terrestres

- Pour les tortues, c'est dur à suivre et peu réaliste.
- Pour les anoues, le réalisme dépend du nombre de stations. Ce qui est limitant est que la période de mesures est de 2 semaines. On peut laisser des microphones pour enregistrer les chants.
- Pour les salamandres, l'équipement n'est pas cher, mais ça demande beaucoup de mains d'œuvre. La période permettant l'échantillonnage est assez grande.
- Les oiseaux, c'est réaliste, mais ça demande beaucoup de temps. Par exemple, ça prend 20 heures de recherche de nidification dans une parcelle (de quelle taille?) pour tout trouver.
- Pour les mammifères et les chauves-souris, c'est faisable, mais plus complexe.
- Pour les micromammifères, il faut suivre longtemps dû à la présence de cycles dans la population. Ces derniers sont cependant importants, car ils sont un maillon important de la chaîne alimentaire et influencés par les niveaux de neige. Ça demande du temps faire les inventaires. Une possibilité est de suivre en se basant sur leurs fèces.

Invertébrés aquatiques et phytoplanctons

- Aucun problème de faire le suivi à grande échelle.
- Il semble plus réaliste de faire le suivi en lac et grande rivière.
- On peut impliquer les citoyens pour l'échantillonnage.

-
- L'échantillonnage est facile et a peu d'impact sur les organismes.
 - Les amphipodes peuvent être identifiés aisément à l'aide de clés, à l'espèce. Dans le cas de *Hyalella azteca*, qui est un complexe d'espèces, les techniques moléculaires peuvent s'avérer nécessaires si l'on veut obtenir des informations sur les différents haplotypes. C'est rapide et peu coûteux.

Poissons

- C'est réaliste, mais il faut prendre en compte les problèmes possibles de contamination par l'utilisation de matériel dans différents lacs. Il faudra compter le temps de nettoyage dans les estimations de temps.

7. Déterminer si les effets des CC sur ces taxons et variables d'habitats vont varier en fonction de différents types de milieux :

Éléments généraux

- Dans les milieux ouverts, les espèces du sud en migration devraient avoir plus de facilité à s'établir. Ce sont également des endroits où les EEE sont favorisées.

Plantes

- Les CC seront plus favorable aux feuillus qu'aux résineux. Cependant, les feuillus pourraient avoir des problèmes vers le nord causé par les différences de composition des sols.

Vertébrés terrestres

- Les dates de suivi vont varier du nord au sud, mais les mêmes méthodes devraient être utilisées.

Invertébrés aquatiques et phytoplanctons

- Oui, l'effet sera très important, par exemple en lac et en ruisseau l'effet risque d'être totalement différent.
- Il est essentiel de prendre beaucoup de mesures d'habitat. Par exemple, température de l'air et de l'eau, le débit.
- Les méthodes d'échantillonnage ne devraient pas changer du nord au sud, mais changer en fonction des milieux (lac et en ruisseau). Les espèces seront différentes.

9. Déterminer si des modifications majeures sont attendues au niveau des interactions entre ces taxons et d'autres organismes présents dans leur milieu :

Éléments généraux

- Migration des espèces du sud qui vont entrer en compétition avec les espèces présentes à l'heure actuelle.

Plantes

- Changements des interactions compétitives entre plantes.
- Changements des interactions avec les pollinisateurs et les ravageurs.

Champignons et insectes

- Certainement. Par exemple, la carie blanche sera favorisée dans le sud ou les températures plus chaudes au détriment des caries brunes. Ceci pourrait s'accompagner d'un changement d'essence et de productivité.
- Autre exemple : Telemus, un parasitoïde s'attaquant à l'arpenteur de la pruche. Il s'attaque aux œufs très tôt au printemps (4C et +). La fenêtre thermique peut favoriser l'ennemi naturel ou le ravageur, dépendant du synchronisme.

Vertébrés terrestres

- Il risque d'y avoir de nombreux bris d'équilibre que l'on connaît à l'heure actuelle.
- Les relations entre les anoues et les champignons vont changer.
- Les relations prédateurs-proies vont changer. Par exemple, l'augmentation du cerf va mener à l'augmentation des coyotes, un compétiteur pour le loup.
- Il va y hybridation entre les coyotes et les loups.
- En lien avec les coupes forestières, le cerf devrait être favorisé par rapport à l'original.
- Les urubus vont augmenter leurs répartitions et possiblement affecter les cerfs.
- Les symbioses peuvent changer.
- De nouvelles interactions avec les pathogènes (champignons et parasites, par exemple les tiques).
- Il y aura des pertes de synchronicités entre les proies et les prédateurs (par exemple, émergence des insectes et l'activité des oiseaux et chauves-souris insectivores).
- Quand il pleut, l'odeur se propage plus et les oiseaux au sol sont plus faciles à détecter par les prédateurs. S'il y a un changement dans les régimes de précipitations, ça peut donc affecter ces organismes.

Invertébrés aquatiques et phytoplanctons

- Des modifications des chaînes trophiques sont probables.
- Il y aura certainement des changements, mais c'est difficile à isoler et observer.
- S'il y a des changements au niveau des phytoplanctons, l'effet sera rapide sur le zooplancton.

Poissons

- Des modification des traits de histoire de vie tels que la croissance et la reproduction, et d'autres activités telles que l'évitement des prédateurs et l'alimentation.
- Des changements du moment de la reproduction et de la taille des portées.
- Le facteur chimique principal affectant les communautés de poissons est le niveau d'oxygène dissous qui sera affecté par les changements de température.
- Des réductions périodiques des niveaux d'oxygène dissous contribuent à la disparition d'espèces prédatrices comme le brochet et l'achigan alors que les espèces de proies peuvent être relativement épargnées.
- Espèces d'eau froide seront à risque tandis que l'aire de répartition des espèces avec des préférences pour des eaux plus chaudes va probablement augmenter et exercer des pressions supplémentaires aux communautés locales de poissons.

10. Déterminer si des services écosystémiques fournis par ces taxons pourraient être affectés par les changements climatiques :

Plantes

- Dans les milieux humides, si les sécheresses s'accumulent, des problèmes pourraient survenir – par exemple, moins d'accumulation de carbone.
- La productivité ligneuse devrait continuer, mais la façon dont vont évoluer les processus de décomposition pourrait avoir un grand impact.

Champignons et insectes

- Vitesse de décomposition dans les sols et litières pourraient changer.
- Changements possibles de la composition des communautés de champignons ectomycorhiziens avec des effets imprévisibles sur les services qu'ils fournissent.

Vertébrés terrestres

- Toutes les espèces récoltées risquent de changer. Peut-être qu'au total, rien ne va changer, mais par espèce, il y aura des changements.
- La chasse pourrait augmenter s'il y a plus de cervidés.
- La pollinisation, la dissémination des graines et le contrôle des insectes par les oiseaux pourraient être affectés.
- La prédation sur les graines et les champignons par les petits mammifères pourrait changer, mais c'est dur à mesurer et à prévoir.
- Les écureuils réussissent parfois à manger 90% des graines, alors si ça augmente ça pourrait avoir un effet important.
- Le contrôle naturel de la TBE par le pic gros bec et la paruline tigrée pourrait être affecté s'il y a changement dans la synchronie.
- Le lien entre les chiroptères et le contrôle des communautés d'arthropode est moins bien compris, mais est sans doute important et pourrait changer.
- La biomasse des salamandres forestières (et des amphibiens en général) est plus grande que celle des mammifères et leur lien à la productivité des écosystèmes est peu connu. Possible changement à ce niveau également.
- Pour les micromammifères, modification dans la consommation et dissémination de graines qui pourrait avoir des incidences sur l'évolution des diverses strates végétales.

Invertébrés aquatiques et phytoplanctons

- Il y aura des changements de taux de reproduction qui influenceront sur plusieurs éléments importants des écosystèmes.
- Il est cependant difficile de prédire la directionnalité des changements (effets négatifs ou positifs) et des synergies qui auront lieu.
- Ils sont la nourriture de beaucoup d'organismes supérieurs, s'ils changent, les autres organismes changeront également. Suivre leurs biomasses et compositions est donc essentiel.

Poissons

- Pêches commerciales et sportives

11. Déterminer les principales autres sources d'impacts affectant ces groupes taxonomiques :

Éléments généraux

- Développement du nord va être une pression importante.
- Les routes dans le nord vont favoriser les EEE.
- Tendances à rapprocher les centres agricoles des milieux urbains, moins d'agriculture en région?
- Dans le sud, pressions des routes et des milieux urbains sur les milieux humides.
- Synergies entre les cc et les EEE.
- Pour le milieu aquatique, le déboisement des berges (par les feux, insectes et activités forestières) aura des effets combinés avec les cc.
- Pollution par les pesticides dans milieux agricoles de cultures intensives. Pollution atmosphérique (mercure dans les réseaux hydriques).

Plantes

- Les feux devraient augmenter.
- Tendances pour les insectes ravageurs et autres maladies difficiles à prévoir.
- Foresterie, activités sylvicoles et urbanisation vont continuer à détruire et fragmenter les territoires réduisant le pool génétique et les couloirs de migration.

Champignons et insectes

- Les cc vont être importants dans le sud où les habitats sont déjà soumis aux pressions anthropiques.
- Changement de l'architecture en milieux urbains, revégétalisation pour la santé publique. Va favoriser différents types d'organismes.
- Richesse spécifique devrait augmenter avec les cc, mais diminuer avec les EEE.

Vertébrés terrestres

- En forêt boréale, les cycles de feu affectent les petits mammifères.
- La perte d'habitat (par exemple dû au drainage) causé par l'agriculture, la foresterie et l'urbanisation. La foresterie demeure le problème numéro un pour l'instant.
- La pollution, principalement les pluies acides
- La coextraction, c'est-à-dire, 2-3 espèces associées qui disparaissent avec l'espèce connue.
- La fragmentation du territoire qui va limiter la capacité des espèces à migrer.
- Maladie : chytride (champignon) qui cause le déclin des amphibiens au sud.

Invertébrés aquatiques et phytoplanctons

- Acidification des cours d'eau aura un effet sur les organismes à coquille.
- Dans l'estuaire, il y aura une modification du régime des glaces et de tempête qui va avoir un impact également.
- Il sera difficile de séparer les effets des cc des autres impacts selon les stations et le statut de protection. Cela va dépendre du nombre de covariables mesurées.
- L'urbanisation, agriculture et l'industrie ont déjà de grands impacts.
- Les pertes d'habitat, la modification des débits, la contamination organique, la pollution et l'eutrophisation risquent d'interagir de différentes façons avec les cc.
- Besoin de stations protégées des autres gradients de perturbation!
- Les MIB intègrent les effets cumulatifs et synergiques des perturbations physiques, biologiques et chimiques des cours d'eau, ce qui permet d'évaluer les répercussions

réelles de la pollution et de l'altération des habitats aquatiques et riverains sur les écosystèmes. Ils sont souvent employés comme indicateurs de la santé des écosystèmes aquatiques.

Poissons

- Il y aura des effets combinés avec le mercure.
- La pêche, il faudra échantillonner si les efforts de pêche sont compilés.
- L'augmentation des prélèvements d'eau pour l'irrigation va amplifier les modifications des régimes hydriques dus aux cc et occasionner des pertes d'habitats.
- La diminution du débit des rivières et des volumes d'eau des lacs du aux cc va diminuer leur pouvoir de dilution face à plusieurs polluants et possiblement en augmenter la toxicité.

12. Déterminer les synergies possibles entre les méthodes d'échantillonnage pour les différents groupes (si le temps le permet)

Champignons et insectes

- Les mousses et les lichens pourraient aisément être échantillonnés en même temps.
- Avec l'ADN environnemental, plusieurs autres organismes peuvent être identifiés.
- Viser les écosystèmes sensibles

Vertébrés terrestres

- Utiliser les inventaires acoustiques pour analyser la présence de plusieurs types d'organismes.
- Le suivi des macroinvertébrés et des salamandres peut se faire en simultanément.
- Il y a possibilité de faire des synergies avec différents groupes (voir le projet de Michel Crête).

Poissons

- Les poissons peuvent être suivis avec les libellules et les invertébrés aquatiques.
- Les poissons peuvent aisément être joint aux échantillonnages de phyto- et zooplanctons également.

13. Est-ce qu'il y a d'autres éléments que vous jugez importants qui n'ont pas été couverts?

Éléments généraux

- Résilience de l'écosystème comme objectif.
- Une variable à inclure dans la prise de décision des différents indicateurs pourrait être les bénéfices collatéraux du suivi des indicateurs (p. ex. suivi destruction/dégradation des habitats).
- Il faut absolument que les ministères rendent leurs données existantes plus accessibles comme c'est le cas aux USA.

Contacts possibles – Spécialistes en biodiversité au Québec

Michel Garneau – UQÀM géographie – capacité d'accumulation du C dans la tourbe

Nigel pioulet – McGill – modélisation C dans les tourbières
Tim Moore – McGill – végétation tourbière
Lyne Rochefort – Uaval – atlas répartition des sphaignes
Serge Payette – ULaval
Stéphanie Pellerin – IRBV
Claude Lavoie – vision historique des milieux humides
Denis Bastien – Botalys – consultant en identification des bryophytes, herbacées et lichens
Claude Roy – retraité – herbier louis-marie
Jacques Labrecque – plantes – atlas milieu nordiques
Jean Gagnon – mddep – bryophytes
Benoît tremblay – mddep – plantes nordiques
Conny Lovejoy – séquençage d’algues
Jean Bérubé – bar coding
François Brassard - s’occupe des aires protégés au MDDEP
Route d’écoute d’anoures : Société d’histoire naturelle de la vallée du Saint-Laurent : Sébastien
Rouleau, rouleau.sebastien@ecomuseum.ca
Étang temporaire : MRNF-Dir régionale Bas-Saint-Laurent : Walter Bertacchi,
Walter.Bertacchi@mrnf.gouv.qc.ca
Hydrologie en lien avec salamandre sombre des montagnes (Laboratoire naturelle à Covey Hill:
UQAM, Marie Larocque, larocque.marie@uqam.ca
Suivi avec enregistrement sonore : UQTR, Raphael Proulx raphael.proulx@uqtr.ca
Salamandres de ruisseaux (suivi local) : Corridor Appalachien (ACA), Clément Robidoux,
clement@apcor.ca
Claude Lavoie, Université Laval (EEE)
Isabelle Simard, MDDEP (EEE)
Yvon Richard, MDDEP (EEE)
Sylvie De Blois, Université McGill (EEE)
Jacques Brisson, Université de Montréal (EEE)
Jacques Labrecque, MDDEP (EEE)
Hélène Godmaire, Conseil québécois des espèces exotiques envahissantes (EEE)
Rafael Otfinowski, Université McGill (EEE)
Martin Jean, Environnement Canada (EEE)
Romain Néron, MAPAQ (EEE)
Frédéric Coursol, Jardin botanique de Montréal (EEE)
Jean Faubert, FloraQuébec (EEE)
Daniel Boisclair, Udm (poisson)
Louis Bernatchez, Université Laval (poisson)
Pierre Magan, UQTR (poisson)
Warwick Vincent, Université Laval (limnologie et cyanobactéries)
Connie Lovejoy, Université Laval (phytoplancton et biologie moléculaire)
Isabelle Laurion, INRS (écologie aquatique et biooptique)
Suzanne Roy, ISMER (phytoplancton de l’estuaire du St-Laurent)
Michel Gosselin, ISMER (production primaire aquatique)
David Bird, UQAM (Cyanobactéries, algues bleues)
Antonella Cattaneo, Udm (phytoplancton)
M. Louis Imbault, UQAT (micromammifères)

M. Dominique Fauteux, UQAT (micromammifères)
Christian Nozais, UQAR (amphipode)
France Dufresne, UQAR (amphipode)
Robert Chabot, UQAR (amphipode)
Louise Cloutier (Université de Montréal) (Taxonomie, suivi, indice) MIB
Pierre-Paul Harper (Taxonomie, suivi, indice) MIB
Fernand Therrien (les Laboratoire SAB in.) (Taxonomie) MIB
Julie Moisan MDDEP, DSEE (Taxonomie, suivi, indice, RSBenthos, formation) MIB
Lyne Pelletier MDDEP, DSEE (suivi, indice, RSBenthos, formation) MIB
Alain Armellin (Environnement Canada) (suivi, indice, RCBA) MIB
Mélanie Desrosiers MDDEP, CEAEQ (analyse de risque, traits biologiques) MIB
Bernadette Pinel-Alloul, (Université de Montréal) MIB
Rebekah Kipp (Université McGill) (taxonomie, suivi, indice) MIB

Annexe D Programmes de suivi d'éléments de biodiversité existant au Québec

Auteurs : Frédéric Boivin¹, Anouk Simard², Guillaume Larocque³, Chloe Makepeace³ et Pedro Peres-Neto¹

Affiliation : ¹Université du Québec à Montréal, Chaire du Canada en modélisation spatiale et biodiversité, ²Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, ³Centre pour la Science de la Biodiversité du Québec

Liste des programmes de suivi

De nombreux programmes de suivi et atlas existent déjà au Québec. Dans l'objectif de ne pas dupliquer des efforts d'échantillonnages ayant courts et de pouvoir s'appuyer sur des données historiques, nous avons compilé 60 programmes de suivi et atlas existants au Québec. Ces programmes sont détaillés dans le fichier « 554010 - Peres-Neto - Rapport final - Section C - Annexe D – supp.xlsx ». Ces programmes sont également compilés sur un site internet (<http://quebio.ca/node/4>; voir l'image ici bas) où les détenteurs de données peuvent éditer les données et y décrire des nouveaux programmes de suivi. Nous espérons que cette liste demeurera dynamique et que le programme de suivi en fonction des changements climatiques y soit inclus.

The screenshot shows the QuéBio website interface. At the top left is the QuéBio logo with the tagline 'LA BIODIVERSITÉ DU QUÉBEC'. At the top right is a 'Projets' link. Below the header, there are two tabs: 'Description' (selected) and 'Formulaire pour l'ajout d'entrées'. The main heading is 'Programmes de suivi de la biodiversité au Québec'. Below this is a search section with a search bar, 'Recherche' and 'Tout afficher' buttons, and a dropdown menu for 'Liste des projets...'. A note states 'Cette page a été développée en partenariat avec le projet CC-Suivi' with a logo for 'CC-Suivi'. Below that, it says 'Pour corrections, ajouts ou commentaires, veuillez contacter Guillaume Larocque'. The main content area features a dark blue header for 'Atlas de la biodiversité du Québec nordique', followed by the text 'Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs' and 'Site web du projet'. There is a tabbed interface with 'Objectifs', 'Description', 'Éléments', 'Indicateurs', and 'Contact' tabs. The 'Objectifs' tab is active, showing the text: 'Élaborer un prototype d'atlas sur la biodiversité en milieu nordique pour améliorer nos connaissances et servir d'aide aux décisions à l'égard des espèces menacées ou vulnérables; des écosystèmes rares/sensibles; des mesures d'adaptation aux changements climatiques; des savoirs autochtones'. At the bottom, another dark blue header reads 'Atlas des amphibiens et des reptiles du Québec (AARQ)'.

Le site est hébergé par QuéBio (<http://quebio.ca/fr>), une initiative du Centre pour la Science de la Biodiversité du Québec (CSBQ) et contient deux autres outils d'intérêts. Le *Biodiversity Article Mapper!* (BAM!), qui

« est un outil pour cartographier les articles scientifiques géolocalisés contenant des noms d'animaux. Ce projet a vu le jour suite à une collaboration entre le Centre de la science de la biodiversité du Québec et Zoological Record, une filiale de Thomson Reuters. Une équipe de zoologistes chez Zoological Record travaille pour extraire les noms d'animaux, les noms de lieux, et d'autres informations pertinentes à la zoologie et la recherche présents dans les articles scientifiques. La base de données ainsi constituée ne contient que de l'information relative aux animaux (aucun végétal). Zoological Record a gracieusement fourni toutes les entrées concernant le Québec. »

Le site QuéBio inclus également :

« Le Système de gestion Métadonnées pour la Biodiversité a été créé en collaboration avec NatureServe Canada. Ce système fournit un cadre standardisé pour entrer, entreposer, rechercher et afficher les métadonnées relatives aux études de terrain de la biodiversité au Québec. L'objectif est de fournir une plate-forme qui facilitera l'accès et l'intégration des connaissances sur les données de terrain de la biodiversité au Québec.

Nous visons à promouvoir une stratégie multidisciplinaire, ouverte et collaborative de la science de la biodiversité au Québec. »

Annexe E Biodiversity Research Finder

Auteur : Pedro Peres-Neto

Affiliation : Université du Québec à Montréal, Chaire du Canada en modélisation spatiale et biodiversité

Biodiversity Research Finder

Qui étudie quoi et où?

C'est la mission du *Biodiversity Research Finder* (<http://www.biodivresearchfinder.uqam.ca/>), un site internet voué à la recherche en biodiversité où toutes personnes avec des connaissances ou des données sur la biodiversité peuvent s'inscrire pour y indiquer :

- Qui il/elle est
- Où il/elle étudie et
- Quel(s) organisme(s) il/elle étudie

Cet outil peut s'avérer très utile afin de trouver si d'autres personnes travaillent sur les mêmes organismes que vous ou dans la même région. Les objectifs sont multiples, 1- susciter des collaborations et des interactions, 2- de compiler l'expertise pour les différents organismes et régions et 3- de déterminé les lieux et les organismes pour lesquels peu ou beaucoup de connaissances existent.

Voici un exemple de recherche sur « l'original »

Biodiversity Research Finder
Home Search About Contact Login

Select your search criteria

Firstname
 Lastname
 Profile #
 Institution
 Profile's Country
 Study's Country
 Category
 Keyword

Search Results

Movements and management of moose	Mathieu Leblond	300 allée des Ursulines Rimouski, QC G5L-3A1 Canada	UQAR	Profile #76
-----------------------------------	-----------------	---	------	-----------------------------

Introduction générale du site en anglais.

Who is studying what, where?

Have you ever wondered who is or has been collecting biodiversity data in geographical areas that overlap in geographical and taxonomical areas that overlap with your own areas of interest?

Never before have we had so much information about the distribution of biodiversity across space. This knowledge is extremely important for both scientific research and nature conservation and as a consequence, much effort has been expended to the organization and cataloguing of biodiversity data. Despite ever-increasing creative and technological innovation in cataloguing, organizing and sharing biodiversity data, there is a lack of a strategy to promote the gathering of information about biodiversity data generators. Our goal is to encourage the academic, governmental and non-governmental, conservation and lay communities to consolidate information regarding *who* we are (*profiler*), *where* we are studying (*finder* for the spatial localization of the sites) and *what* types of organisms we study.

Overview

Biodiversity Research Finder has two basic modes:

1) Profiler: [Login] where you create (and edit) a personal profile providing basic information about you, your interests regarding biodiversity research, and the geographical sites for which you have information on biodiversity.

2) Finder: [Search] where you can produce maps and lists of biodiversity data generators (among our profiles) based on search criteria such as geographical area and taxonomic groups,

among others.

Our mission

We hope that the Biodiversity Research Finder becomes a tool that will permit and foster:

- 1) Collaborative interaction among individuals and projects interested in biodiversity.
- 2) The generation of compilations of biodiversity expertise for technical and conservation support regarding a particular geographical area of interest.
- 3) The assessment of hot (concentration) and cold (gaps) spots in biodiversity knowledge.

What we won't do:

We won't ask for your data or metadata in the future.

We won't keep a record if you delete your profile.

Annexe F Trade-offs between resource allocation strategy and phenotypic cost varies with patterns of environmental fluctuation

Auteurs : Who-Seung Lee¹, Marc Mangel^{2,3} et Pedro Peres-Neto¹

Affiliation : ¹Université du Québec à Montréal, Chaire du Canada en modélisation spatiale et biodiversité, ²University of California, ³University of Bergen

Cet article sera soumis à la revue *The American Naturalist*

Abstract

Environmental variation poses a substantial challenge for individual growth, survival and reproduction. Phenotypic plasticity is a powerful mechanism as it allows organisms to cope with short-term changes in their environment. While the impact of connections between early-life development and environmental conditions on subsequent fitness in late life has been widely explored, it is unclear how the rapid phenotypic adaptation in response to environmental conditions early in life affects life history decisions and its consequences. Here, we investigate this question by using a dynamic-state-dependent model in which the state of the organism is characterized by mass, reproductive investment, and accumulated damage, both of which are affected by feeding activity and cost of phenotypic plasticity. Focusing on early growth in life, we determine the level of activity and plasticity cost that maximizes reproductive value – ultimately, fitness. We used simulations to project forward and determine optimal life history strategies regarding cost related to phenotypic plasticity and development, given physiological and reproductive parameters. We show that optimal life history strategies are a function of trait variation such as early growth, long-term damage accumulation and future reproductive investment in response to environmental gradients via a trade-off between the costs of phenotypic plasticity and resource allocation. Moreover, our results indicate that life-history decisions are also influenced by patterns of covariation among relevant environmental factors (i.e., ‘abiotic integration’) and future reproductive investment is also affected by the interaction between resource allocation strategies and patterns of temporal variation and correlation of environmental conditions. These results emphasize the point that understanding the interactions between phenotypic plasticity and developmental decisions need to take into account not only the environmental conditions but also their dynamics through time.

Key words: Climate change, cost of phenotypic plasticity, life history, growth, reproduction, resource allocation, dynamic state model

Annexe G Improving biodiversity model using time series decomposition of climatic variables

Auteurs : Shubha Pandit et Pedro Peres-Neto

Affiliation : Université du Québec à Montréal, Chaire du Canada en modélisation spatiale et biodiversité

Cette article sera soumis pour publication à la revue *Global Ecology and Biogeography*

Abstract

Several hypotheses and models have been proposed to explain a large-scale variation of species richness, but no consensus has yet been reached on the underlying mechanisms. The model so far used the average value of the climatic variables (e.g. temperature and precipitation) even when information is available at high temporal resolution. However, community dynamics at a site changes even with the small environmental changes. Thus, we postulate that using the average value of the climatic variables can be a source of errors in explaining the relationship. Thus in this study, we decomposed 60 years long term temporal data set (1961-2000, global) into linear, seasonal, cyclic and noise components of the temperature and precipitation; and evaluated the relationship of species richness and these new derived climatic variables in the global scale and continental scales and along the latitude gradient. Our results showed spatial variation in the decomposed variables of each of temperature and precipitation; and the temperature was explained more by linear in and around the equator area, whereas in the northern and southern hemisphere, seasonal component was prominent. Residual variation of temperature was higher in and around the equator. Further, these four components contributed about 20% variation of the species richness (pure), whereas the mean temperature and precipitation explained only about 2% with shared value of 43% between them. But, at the continental scales, the percentage of explained variation of species richness by two types of variables (mean vs temporal component) varied. We further found shifting the importance of the temperature and precipitation along the latitude and shifting took place at about 45° north and 33° in south. The study shows that the decomposed components of temperature and precipitation can substantially explain the large-scale variation of species richness, which can be an important variables in explaining the species-climate relationship.

Key words: temporal decomposition, linear, cyclic, seasonal, residual, global mammals diversity, species richness

H5	H5. Indicateur: Composition en nutriment et pH de l'eau des milieux humides.	1	5	0,5	1	0,5	0,07142857	0	20	Bouteilles et glices pour conserver les échantillons	0		0	0	110	Le prix des analyses dans un laboratoire spécialisé.	130\$/site	0	0				
H6	H6. Indicateur: Niveau d'eau des milieux humides.	1	5	0,25	1	0,25	0,03571429	0			20	Tuyeau de PVC coulé avec graduation	0	0	0		0\$/site + 20\$/équipement	0	0				
H7	H7. Indicateur: Composition en végétaux (plantes vasculaires) et couvert muscinale (Bryophytes).	1	5	2	1	2	0,28571429	20		Tige de métal pour marquer le centre des sous-parcelles plus étiquettes	0		0	0	0		20\$/site	15	0	Moyen			
H8	H8. Indicateur: Composition en arbres et arbustes.	1	5	2	2	4	0,57142857	10		Étiquette pour marquer les arbres et arbustes	0		20	0	0		10\$/site + 20\$/équipement	15	0	Moyen			
H9	H9. Indicateur: Proportion d'envassement par des EEE ou des espèces indigènes du Québec (mais non locale) dans les marais.	1	5	0,5	1	0,5	0,07142857	0			0		0	0	0		0\$/site	10	0	Moyen			
H91	H91. Indicateur: Macro-invertébrés benthiques, larves d'odonates.	1	5	0,5	2	1	0,14285714	0		Bouteilles et alcool pour conserver les échantillons	20		300	0	600	Il faut compter le temps ou l'argent. Un échantillon prend de 2 à 3 jours à faire. Il faut compter le temps ou l'argent.	Élevé	620\$/site + 300\$/équipement	15	0	Moyen		
H12	H12. Indicateur: Productivité végétale.	1	5	1	2	2	0,28571429	0			10		0	0	210	Il faut compter le temps ou l'argent.	Moyen	220\$/site	15	0	Moyen		
H13	H13. Indicateur: Vitesse de décomposition de la matière organique.	1	5	2	1	2	0,28571429	0	5	Sac en tissu	0		0	0	420	Il faut compter le temps ou l'argent.	Faible	425\$/site	10	0	Moyen		
H14	H14. Indicateur: Émission de méthane et de gaz carbonique.	1	5			0	0							0									
H14	H14. Indicateur: Émission de méthane et de gaz carbonique.	1	5			0	0							0									
H92	H92. Indicateur: Inventaires des vertébrés.	variable	5	0,3	1	0,3	0,04285714	0	0		0		0	0	0			0\$/site	15	0	Moyen		
Une visite au 3 à 5 ans, plusieurs visites par année.																							
H10	H10. Indicateur: Inventaire acoustique de grenouilles (verte, des bois, crapaud, rainette).	2	5	0,5	1	0,5	0,07142857	1000		1 microphone Wildlife acoustics par site (1000\$/par année. Si 10 sites sont échantillonnés par année, 10 microphones sont nécessaires.	0		0	0	420	Il faut compter le temps ou l'argent.	420\$/site + 1000\$/site/année d'équipement	15	0	Élevé			
H11	H11. Indicateur: Abondance des pollinisateurs.	3	5	0,5	1	0,5	0,07142857	0	0		30	Filet	Élevé	0	0	0		15	0	Moyen			
Milieux forestiers																							
Pas de terrain																							
F1	F1. Indicateur: La fréquence, la superficie et le moment de l'année où surviennent les feux de forêts.	0	10	0	0	0	0	0	0		0		0	0	0			40	0	Élevé			
F2	F2. Indicateur: La superficie, la répartition et l'intensité des attaques par la tordeuse des bourgeons d'épicéa.	0	10	0	0	0	0	0	0		0		0	0	0			10	0	Moyen			
F3	F3. Indicateur: Distribution des ravageurs forestiers	0	10	0	0	0	0	0	0		0		0	0	0			10	0	Moyen			
F4a	F4a. Indicateur: Date de verdissement et de sénescence de la végétation.	0	10	0	0	0	0	0	0		0		0	0	0			10	0	Faible			
F4b	F4b. Indicateur: Date de verdissement et de sénescence de la végétation.	0	10	0	0	0	0	0	0		0		0	0	0			40	0	Élevé			
F5	F5. Indicateur: Production de sirap d'érable, date de début et de fin.	0	10	0	0	0	0	0	0		0		0	0	0			15	0	Faible			
F6	F6. Indicateurs: La répartition des espèces arborescentes.	0	10	0	0	0	0	0	0		0		0	0	0			20	0	Moyen			
F7	F7. Indicateurs: La croissance des espèces arborescentes.	0	10	0	0	0	0	0	0		0		0	0	0			60	0	Élevé			
F8	F8. Indicateur: La distribution des grands ongulés.	0	10	0	0	0	0	0	0		0		0	0	0			10	0				
F9	F9. Indicateur: Distribution des petits gibiers et des animaux à fourrure.	0	10	0	0	0	0	0	0		0		0	0	0			20	0				
F10	F10. Indicateur: La phénologie et la répartition des oiseaux.	0	10	0	0	0	0	0	0		0		0	0	0			40	0	Moyen			
F11	F11. Indicateur: Les fluctuations dans l'abondance des chauves-souris.	0	10	0	0	0	0	0	0		0		0	0	0			10	0				
Une visite au 3 à 5 ans.																							
F12	F12. Indicateur: Concentration en nutriments, stœchiométrie (ratio C : N) et pH des sols.	1	5	1	1	1	0,14285714	0			0	40	Pelles	0	0		Prix de l'analyse dans laboratoire privé		0	0			
F13	F13. Composition arborescente.	1	5	4	2	8	1,14285714	30		Étiquettes pour identifier les arbres	0	30	Ruban à DHP	0	0	0		30\$/site + 30\$/équipement	15	0	Moyen		
F14	F14. Composition de la végétation de sous bois.	1	5	1	2	2	0,28571429	5		Queues de cochon pour marquer le centre des sous-parcelles	0		0	0	0			5\$/site	10	0	Moyen		
F15	F15. Vitesse de décomposition de la matière organique.	1	5	2	2	4	0,57142857	0			15	Sac pour la litière	0	7	1	210	Il faut compter le temps ou l'argent.	Faible	225\$/site	10	0	Moyen	
F18	F18. Indicateur: Abondance ou reproduction des salamandres.	1	5	1	1	1	0,14285714	5		Planches	0		0	0	0			5\$/site	10	0	Moyen		
F20	F20. Abondance des champignons mycorhiziens.	1	5	1	1	1	0,14285714	0			0		0	14	2	420	Coût ponctuel pour identification par ADN de nouvelles espèces	Élevé	420\$/site	15	0	Moyen	
F90	F90. Quantité de lumière en sous-bois.	1	5	1	2	2	0,28571429	0			0		0	0	0				0	0			
F92	F92. Indicateur: Abondance des mites orbitales.	1	5	0,5	1	0,5	0,07142857	0		Contenant pour échantillon + alcool	5		0	4	0,57142857	120	Il faut compter le temps ou l'argent.	Élevé	125\$/site	15	0	Moyen	
Une visite au 3 à 5 ans, plusieurs visites par année.																							
F16	F16. Insectes des sols carabes.	3	5	1	1	1	0,14285714	0		Prestation, plats en plastique	10		0	2	0,28571429	60	Il faut compter le temps ou l'argent.	Élevé	70\$/site	15	0	Moyen	
F17	F17. Inventaires acoustiques des oiseaux et des chauves-souris.	3	5	1	1	1	0,14285714	1000		1 microphone Wildlife acoustics par site (1000\$/par année.	0		0	14	2	420	Il faut compter le temps ou l'argent.	420\$/site + 1000\$/site/année d'équipement	40	10	Disques durs pour données	Élevé	
F19	F19. Présence de petits mammifères.	3	5	0	0	0	0	0			0		0	0	0			0\$/site	3	0	Moyen		
F91	F91. Indicateur: Insectes volants, papillons.	3	5	0,5	1	0,5	0,07142857	0			0	30	Filet	Élevé	0	0	0	0\$/site + 30\$/équipement	15	0	Moyen		

		Types d'écosystème					
		Paysages	Milieux arctiques	Milieux aquatiques	Milieux humides	Milieux forestiers	Milieux agricoles et périurbains
Mesures au niveau des individus							
Génétique							
Croissance			N8		H12	F7, F13	
Condition corporelle							
Morphologie				A3, A4			
Santé (Maladie-parasites-pathogène)							
Mesures au niveau des populations							
Densité-abondance			N7, N13	A3, A4, A5, A6, A9, A10	H7, H8, H11, H91	F6, F9, F11, F13, F14, F16, F18, F20, F91	
Saisonnalité-phénologie-aoutement (micro)			N3, N4, N5		H16	F5, F10	
Structure (p.ex., âge-sexe)							
Reproduction							
Survie					H8	F6, F11, F13	
Mesures au niveau des espèces ou groupes fonctionnels							
Distribution			N6, N7, N13	A3, A4, A5, A6, A9, A10	H7, H8, H10, H11, H15, H91, H92	F2, F3, F6, F8, F9, F10, F11, F13, F14, F16, F17, F18, F19, F91, F92	
Catégorie:							
Parapluie			N3	A4			
Clé de voute (keystone)			N3	A4	H7	F6, F13	
Exotique envahissante			N6	A6	H2, H3, H9	F2, F3	
Indicateur de santé d'habitat Menacée ou vulnérable			N7, N13	A2, A3, A5, A6	H10, H91, H10	F16, F11, F17, F18, F6, F8, F10, F13, F17	
Emblématique-Charismatique Peu connu (intérêt scientifique)			N3	A4	H11	F20, F21	
Indicateur de tendances populationnels			N7, N2	A3, A5	H7, H91	F6, F13	
Taxon-groupe fonctionnel:							
Algues-Phytoplancton				A3, A6			
Zooplanctons				A3			
Invertébrés aquatiques				A5, A9	H91		
Poissons				A4, A10			
Arbres			N1, N2, N4, N6, N7, N8		H8, H12	F4, F5, F6, F7, F13, F14	
Autres plantes			N1, N2, N4, N6, N7, N8	A6, A8	H7, H9, H12, H16	F14	
Mousses - Lichens			N2, N7		H7		
Champignons					H15	F3, F20, F21	
Bactéries					H15	F21	
Invertébrés terrestres			N13		H11, H16	F2, F3, F16, F18	
Amphibiens					H10		
Reptiles							
Mammifères			N3, N5, N6		H92	F8, F9, F11, F17, F19	
Oiseaux			N5, N6, N13		H92	F10, F17	
Mesures au niveau des communautés-interactions							
Composition-Diversité			N7, N13	A3, A4, A5, A6, A9, A10	H7, H8, H10, H11, H15, H91, H92	F6, F8, F9, F10, F11, F13, F14, F16, F17, F20, F21, F91, F92	
Synchronie phenologique			N4, N5		H16	F4	
Groupes fonctionnels			N2, N7, N13	A3, A4, A5, A6, A9	H7, H11, H15	F10, F13, F16, F21	

Lien aquatique-terrestres			(N7, N13, N10, N11)	A6, A8, A9			
Liens sol-surface						F1	
Réseaux alimentaires (herbivore-predation-parasite)				(A3, A4, A5, A6) (A9, A10)		F2	
Compétition				A3, A4, A5, A6, A9, A10	H8	F6, F8, F13	
Mutualisme-Facilitation (pollinisation-microyze)			N4		H11, H16	F20	
Mesures au niveau des habitats-écosystèmes							
Phénologie (Macro)			N1	A8		F4, F5	
Répartition	P1		N2	A6	H1	F6	
Fragmentation	P1				H2		
Taille	P1		N2	A8	H1, H2, H4		
Diversité spatiale	P1		N2	A6	H1	F1, F2, F3	
Protection							
Écotone - bordure	P1		N2	A6	H3	F6	
Stratification verticale				A1, A2			
Processus écosystémique							
Décomposition			N11, N12	A1, A2, A7	H13, H14, H15	F15, F21, F92, F92	
Filtration				A1, A2, A9			
Productivité			N1, N8, N10, N12	A1, A2, A3, A6, A7	H7, H8, H12	F7, F13, F15, F1, F2, F3, F6	
Réflectance - Albédo			N2	A2	H1	F1, F2, F3, F6	
Perturbation naturelle	P1				H1	F1, F2, F3	
Perturbation humaine	P1			A6	H1		
Cyclage des nutriments (azote-carbone)			N10, N11, N12	A1, A2	H13, H14, H15	F1, F2, F3, F15, F21	
Résilience				A2	H1, H2, H3, H4	F6, F7, F13	
Synergie changements globaux			N6	A1,A2,A6, A8	H9, H10, H14	F1, F2, F3, F11, F12	
Services écologique							
Services d'approvisionnement	Par exemple: Nourriture, Eau, Minéraux et matériaux d'origine vivante, Pharmaceutique, Énergie			A4, A10	H92	F1, F2, F3, F5, F6, F7, F8, F9, F13	
Services de régulation	Par exemple: Frederic Boivin: Séquestration du carbone et régulation du climat; Décomposition et détoxification des déchets; Purification de l'eau et de l'air; Pollinisation; Contrôle des pestes et maladies;	P1	N2, N4, N10, N11, N12	A6, A9	H1, H2, H7, H8 H11, H14, H15, H16	F1, F2, F3, F13, F21	
Services culturels et aménités	Par exemple: Inspiration culturelle, intellectuelle ou spirituelle; Récréationnel (tourisme); Découverte scientifique;		N3	A4, A6	H92	F6, F8, F10, F13, F91	
Services de soutien à la vie	Par exemple: Dispersion et recyclage des nutriments, Dispersion des semences, Production primaire		N8	A1, A2, A3	H1, H2, H4, H5, H6, H12, H91	F7, F9, F13, F15, F17, F19, F20	
Abiotique							
Température			N1	A1, A7	H4		
Humidité					H4		
pH			N10	A1	H5	F12	
Lumière						F90	
Niveau d'eau				A8	H4, H6		
Couvert neige-glace (aussi pergélisol)			N9				
Précipitation							
Composition éléments			N10, 12	A1, A2	H5	F12	
Contaminant							
Type de dépôt							
Substrat			N9, N12	A6, A7			
Vélocité (courant-vent)				A7			
Outils							
ADN environnementale						F21	
Système géoinformatique - Indice satellitaire	P1		N1, N2	A2	H1, H2, H3, H4	F4	
Télé-détection <i>in situ</i> (caméra-micro)				A8			
Identification terrain			N7, N8, N9, N12, N13	A1, A4, A6, A7, A10	H6, H7, H8, H9, H11, H12, H14, H91	F13, F14, F92, F15, F18, F90, F91	

Identification laboratoire			N10, N11, N13	A2, A3, A5, A9	H5, H10, H13, H15, H91	F12, F16, F17, F19, F20, F92	
Science citoyenne			N4, N5, N6		H16	F4, F10	
Suivi déjà existant			N3			F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11	
Ressources							
Pas de terrain		P1	N1, N2, N3, N4, N5, N6		H1, H2, H3, H4, H16	F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11	
Temps terrain faible	Moins d'une heure		N7, N9, N10, N12	A1, A2, A3, A5, A8	H5, H6, H9, H10, H11, H15, H91, H92	F12, F14, F92, F15, F16, F17, F19, F20, F21, F90, F91, F92	
Temps terrain moyen	D'une heure à une demi journée		N7, N8, N11, N13	A6, A7, A9	H7, H8, H12	F13, F18	
Temps terrain élevé	Plus d'une demi journée			A4, A10	H13, H14		
Coûts terrain faible	Moins de 30\$ par site			A2, A3, A5, A6, A7, A9	H5, H6, H7, H8, H9, H11, H12, H13, H15, H91, H92	F12, F13, F14, F92, F15, F16, F19, F20, F21, F91, F92	
Coûts terrain moyen	30-60\$ par site			A4, A10		F90	
Coûts terrain élevé	Plus de 60\$ par site		(N7,N8,N9,N10,N11,N12,N13)	A1, A8	H10, H14	F17	
Expertise terrain faible	Connaissances taxonomiques ou techniques pouvant être acquises en moins d'une journée		N8, N9, N10, N11, N12	A1, A2, A3, A5, A7, A8, A9	H5, H6, H8, H10, H12, H13, H15, H91	F12, F13, F92, F15, F16, F17, F19, F20, F21, F90	
Expertise terrain moyen	Connaissances taxonomiques ou techniques pouvant être acquises sur plus d'une journée		N7, N13	A4, A6, A10	H7, H9, H14	F14, F18	
Expertise terrain élevé	Connaissances taxonomiques ou techniques spécialisées				H11, H92	F91	
Pas de laboratoire		P1	N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N9, N12	A1, A4, A6, A7, A8	H1, H2, H3, H4, H6, H7, H8, H9, H10, H11, H13, H14, H16, H92	F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11, F13, F14, F17, F18, F90, F91	
Temps Laboratoire faible	Moins de 30 minutes		N8, N11	A2	H12, H13	F19	
Temps Laboratoire moyen	De 30 minutes à 2 heures par échantillon		N10		H5	F12, F16	
Temps Laboratoire élevé	Plus de 2 heures par site		N13	A3, A5	H15, H91	F15, F20, F21, F92	
Expertise Laboratoire faible	Connaissances taxonomiques ou techniques pouvant être acquises en moins d'une journée		N8, N11	A2	H12, H13	F15	
Expertise Laboratoire moyen	Connaissances taxonomiques ou techniques pouvant être acquises sur plus d'une journée		N10		H5	F12, F19	
Expertise Laboratoire élevé	Connaissances taxonomiques ou techniques spécialisées		N13	A3, A5	H15, H91	F16, F20, F21, F92	
Coûts Laboratoire faible	Moins de 30\$ par site		N8, N11, N13	A3, A5	H12, H13, H91	F15, F16, F19, F20, F92	
Coûts Laboratoire moyen	30-60\$ par site		N10	A2	H5	F12	
Coûts Laboratoire élevé	Plus de 60\$ par site				H15	F21	
Pas d'analyse (informatique, statistique)						F90	
Temps analyse faible	Moins d'une semaine		N3, N5, N6, N9, N11, N12	A1, A2, A6, A7, A10	H5, H6, H12, H13	F12, F92, F15, F18, F19, F91	
Temps analyse moyen	D'une à 3 semaines	P1	N1, N4, N7, N8, N10, N13	A3, A4, A5, A9	H1, H2, H3, H4, H7, H8, H9, H11, H14, H16, H91, H92	F4a, F5, F8, F11, F13, F14, F16, F20	
Temps analyse élevé	Plus de 3 semaines		N2	A8	H10, H15	F1, F2, F3, F4b, F6, F7, F9, F10, F17, F21	
Expertise analyse faible	Connaissances statistiques ou informatiques de base		N3, N4, N5, N6, N9, N10, N12	A1, A2, A7, A10	H5, H6	F4a, F5, F8, F12, F92, F15, F18, F19, F91	

Expertise analyse moyen	Connaissances statistiques ou informatiques moyennes	P1	N7, N8, N11, N13	A,3 A4, A5, A6, A9	H1, H2, H3, H4, H7, H8, H9, H11, H12, H13, H16, H91, H92	F6, F9, F10, F11, F13, F14, F16, F20, F92	
Expertise analyse élevé	Connaissances statistiques ou informatiques spécialisées		N1, N2	A8	H10, H14, H15	F1, F2, F3, F4b, F7, F17, F21	
Coûts analyse faible	Moins de 30\$ par site	P1	N1, N2, N3, (N7 à N13)	A1 à A10	H5 à H9, H11 à H14, H91, H92	F1 à F4a, F5 à F8, F10 à F16, F19, F20, F92	
Coûts analyse moyen	30-60\$ par site		N4, N5, N6		H1, H2, H3, H4, H9, H15, H16	F4b, F9, F17, F21	
Coûts analyse élevé	Plus de 60\$ par site						

ID indicateurs	Nom indicateurs	Coûts
Aquatique eau douce	Scénario 1 : Intégration à l'échantillonnage des suivis ichthyologiques, ajouts mineurs.	
A1	A1. Indicateur: Température de l'eau, concentration en oxygène dissout, concentration en matière organique	0\$/site + 6000\$ équipement
A2	A2. Indicateur: Concentration en phosphore, ammonium, nitrate, nitrite et chlorophylle.	220\$/site + 300\$ équipement
A3	A3. Indicateur: La composition, l'abondance et la biomasse totale des phytoplanctons et zooplanctons.	620\$/site
A4	A4. Indicateur: La composition et la taille des poissons en lacs.	500\$/site
Aquatique eau douce	Scénario 2 : Intégration à l'échantillonnage des suivis ichthyologiques, ajouts mineurs, mais nombre de visites doublées.	
A1	A1. Indicateur: Température de l'eau, concentration en oxygène dissout, concentration en matière organique	0\$/site + 6000\$ équipement
A2	A2. Indicateur: Concentration en phosphore, ammonium, nitrate, nitrite et chlorophylle.	220\$/site + 300\$ équipement
A3	A3. Indicateur: La composition, l'abondance et la biomasse totale des phytoplanctons et zooplanctons.	620\$/site
A4	A4. Indicateur: La composition et la taille des poissons en lacs.	500\$/site
Aquatique eau douce	Scénario 3 : Intégration à l'échantillonnage des suivis ichthyologiques, ajouts majeurs.	
A1	A1. Indicateur: Température de l'eau, concentration en oxygène dissout, concentration en matière organique	0\$/site + 6000\$ équipement
A2	A2. Indicateur: Concentration en phosphore, ammonium, nitrate, nitrite et chlorophylle.	220\$/site + 300\$ équipement
A3	A3. Indicateur: La composition, l'abondance et la biomasse totale des phytoplanctons et zooplanctons.	620\$/site
A4	A4. Indicateur: La composition et la taille des poissons en lacs.	500\$/site
A5	A5. Indicateur A: La composition et l'abondance des macro-invertébrés benthiques des littoraux de lacs.	620\$/site + 300\$ d'équipement
A6	A6. Indicateur: La composition et l'abondance des herbiers en lacs.	0\$/site + 20\$ équipement
Aquatique eau douce	Scénario 4 : Intégration à l'échantillonnage des suivis ichthyologiques, ajouts majeurs, visites doublées.	
A1	A1. Indicateur: Température de l'eau, concentration en oxygène dissout, concentration en matière organique	0\$/site + 6000\$ équipement
A2	A2. Indicateur: Concentration en phosphore, ammonium, nitrate, nitrite et chlorophylle.	220\$/site + 300\$ équipement
A3	A3. Indicateur: La composition, l'abondance et la biomasse totale des phytoplanctons et zooplanctons.	620\$/site
A4	A4. Indicateur: La composition et la taille des poissons en lacs.	500\$/site
A5	A5. Indicateur A: La composition et l'abondance des macro-invertébrés benthiques des littoraux de lacs.	620\$/site + 300\$ d'équipement
A6	A6. Indicateur: La composition et l'abondance des herbiers en lacs.	0\$/site + 20\$ équipement
Aquatique eau douce	Scénario 5 : Suivi en rivières.	
A2	A2. Indicateur: Concentration en phosphore, ammonium, nitrate, nitrite et chlorophylle.	220\$/site + 300\$ équipement
A7	A7. Indicateur: Vitesse de l'eau, température, profondeur, largeur, composition en sédiments et micro-habita	0\$/site + 800\$ équipement
A9	A9. Indicateur: La composition et l'abondance des macro-invertébrés benthiques en ruisseaux et rivières.	620\$/site + 300\$ d'équipement
A10	A10. Indicateur: Composition, abondance et taille des poissons en ruisseaux et rivières.	0\$/site + 6000\$ équipement
Milieux humides	Scénario 1 : Analyses au niveau du paysage.	
P1	P1. Indicateur: Proportions et tailles des écosystèmes dans le paysage.	À déterminer
H1	H1. Indicateur: Abondance de milieux humides et leurs caractéristiques générales dans le paysage.	Voir P1
H2	H2. Indicateur: Taille et caractérisation des mares dans les milieux humides.	Voir P1
H3	H3. Indicateur: Déplacement de la limite entre les forêts et les milieux humides et taux d'afforestation.	Voir P1
Milieux humides	Scénario 2 : Nouveau suivi, mineur.	
H5	H5. Indicateur: Composition en nutriment et pH de l'eau des milieux humides.	130\$/site
H6	H6. Indicateur: Niveau d'eau des milieux humides.	0\$/site + 20\$ d'équipement
H7	H7. Indicateur: Composition en végétaux (plantes vasculaires) et couvert muscinale (bryophytes).	20\$/site
H8	H8. Indicateur: Composition en arbres et arbustes.	10\$/site + 20\$ d'équipement
H9	H9. Indicateur: Proportion d'envahissement par des EEE ou des espèces indigènes du Québec (mais non loca	0\$/site
H91	H91. Indicateur: Macro-invertébrés benthiques, larves d'odonates.	620\$/site + 300\$ d'équipement
H92	H92. Indicateur: Inventaires des vertébrés.	0\$/site
Milieux humides	Scénario 3 : Nouveau suivi, mineur plusieurs visites par année.	
H5	H5. Indicateur: Composition en nutriment et pH de l'eau des milieux humides.	130\$/site
H6	H6. Indicateur: Niveau d'eau des milieux humides.	0\$/site + 20\$ d'équipement
H7	H7. Indicateur: Composition en végétaux (plantes vasculaires) et couvert muscinale (bryophytes).	20\$/site
H8	H8. Indicateur: Composition en arbres et arbustes.	10\$/site + 20\$ d'équipement
H9	H9. Indicateur: Proportion d'envahissement par des EEE ou des espèces indigènes du Québec (mais non loca	0\$/site
H10	H10. Indicateur: Inventaire acoustique de grenouilles (verte, des bois, crapaud, rainette).	420\$/site + 1000/site/année d'équipem
H11	H11. Indicateur: Abondance des pollinisateurs.	0\$/site + 30\$ d'équipement
H91	H91. Indicateur: Macro-invertébrés benthiques, larves d'odonates.	620\$/site + 300\$ d'équipement
H92	H92. Indicateur: Inventaires des vertébrés.	0\$/site
Milieux humides	Scénario 4 : Nouveau suivi, majeur plusieurs visites par année.	
H5	H5. Indicateur: Composition en nutriment et pH de l'eau des milieux humides.	130\$/site
H6	H6. Indicateur: Niveau d'eau des milieux humides.	0\$/site + 20\$ d'équipement
H7	H7. Indicateur: Composition en végétaux (plantes vasculaires) et couvert muscinale (bryophytes).	20\$/site
H8	H8. Indicateur: Composition en arbres et arbustes.	10\$/site + 20\$ d'équipement
H9	H9. Indicateur: Proportion d'envahissement par des EEE ou des espèces indigènes du Québec (mais non loca	0\$/site
H10	H10. Indicateur: Inventaire acoustique de grenouilles (verte, des bois, crapaud, rainette).	420\$/site + 1000/site/année d'équipem
H11	H11. Indicateur: Abondance des pollinisateurs.	0\$/site + 30\$ d'équipement
H12	H12. Indicateur: Productivité végétale.	220\$/site
H13	H13. Indicateur: Vitesse de décomposition de la matière organique.	425\$/site
H14	H14. Indicateur : Émission de méthane et de gaz carbonique.	0
H91	H91. Indicateur: Macro-invertébrés benthiques, larves d'odonates.	620\$/site + 300\$ d'équipement
H92	H92. Indicateur: Inventaires des vertébrés.	0\$/site
Milieux forestiers	Scénario 1 : Revue de littérature et analyses des données existantes.	
F1	F1. Indicateur: La fréquence, la superficie et le moment de l'année où surviennent les feux de forêts.	0
F2	F2. Indicateur: La fréquence, la superficie, la répartition et l'intensité des attaques par la tordeuse des bourg	0
F3	F3. Indicateur: Distribution des ravageurs forestiers	0
F4a	F4a. Indicateur: Date de verdissement et de sénescence de la végétation.	0
F4b	F4b. Indicateur: Date de verdissement et de sénescence de la végétation.	0
F5	F5. Indicateur: Production de sirop d'érable, date de début et de fin.	0
F6	F6. Indicateurs: La répartition des espèces arborescentes.	0
F7	F7. Indicateurs: La croissance des espèces arborescentes.	0
F8	F8. Indicateur: La distribution des grands ongulés.	0
F9	F9. Indicateur: Distribution des petits gibiers et des animaux à fourrure.	0
F10	F10. Indicateur: La phénologie et la répartition des oiseaux.	0
F11	F11. Indicateur: Les fluctuations dans l'abondance des chauves-souris.	0
Milieux forestiers	Scénario 2 : Intégration à l'échantillonnage du RÉSEF, ajout mineur.	

F12	F12. Indicateur: Concentration en nutriments, stœchiométrie (ratio C : N) et pH des sols.		0
F13	F13. Composition arborescente.	30\$/site + 30\$ d'équipement	
F14	F14. Composition de la végétation de sous-bois.	5\$/site	
F18	F18. Indicateur: Abondance ou reproduction des salamandres.	5\$/site	
F20	F20. Abondance des champignons mychoriziens.	420\$/site	
F90	F90. Quantité de lumière en sous-bois.		0
F92	F92 : Indicateur : Abondance des mites oribatides.	125\$/site	
Milieux forestiers	Scénario 3 : Intégration à l'échantillonnage du RÉSEF, ajout majeur.		
F12	F12. Indicateur: Concentration en nutriments, stœchiométrie (ratio C : N) et pH des sols.		0
F13	F13. Composition arborescente.	30\$/site + 30\$ d'équipement	
F14	F14. Composition de la végétation de sous-bois.	5\$/site	
F16	F16. Insectes des sols carabes.	70\$/site	
F17	F17.: Inventaires acoustiques des oiseaux et des chauves-souris.	420\$/site + 1000/site/année d'équipement	
F18	F18. Indicateur: Abondance ou reproduction des salamandres.	5\$/site	
F20	F20. Abondance des champignons mychoriziens.	420\$/site	
F90	F90. Quantité de lumière en sous-bois.		0
F91	F91: Indicateur : Insectes volants, papillons.	0\$/site + 30\$ d'équipement	
F92	F92 : Indicateur : Abondance des mites oribatides.	125\$/site	
Milieux forestiers	Scénario 4 : Intégration à l'échantillonnage des placette échantillons permanentes ou nouveau suivi, ajout mineur ou suivi de base.		
F12	F12. Indicateur: Concentration en nutriments, stœchiométrie (ratio C : N) et pH des sols.		0
F13	F13. Composition arborescente.	30\$/site + 30\$ d'équipement	
F14	F14. Composition de la végétation de sous-bois.	5\$/site	
F16	F16. Insectes des sols carabes.	70\$/site	
F18	F18. Indicateur: Abondance ou reproduction des salamandres.	5\$/site	
F19	F19. Présence de petits mammifères.	0\$/site	
F20	F20. Abondance des champignons mychoriziens.	420\$/site	
Milieux forestiers	Scénario 5 : Intégration à l'échantillonnage des placettes échantillons permanentes ou nouveau suivi, ajout majeur ou suivi avancé.		
F12	F12. Indicateur: Concentration en nutriments, stœchiométrie (ratio C : N) et pH des sols.		0
F13	F13. Composition arborescente.	30\$/site + 30\$ d'équipement	
F14	F14. Composition de la végétation de sous-bois.	5\$/site	
F16	F16. Insectes des sols carabes.	70\$/site	
F17	F17.: Inventaires acoustiques des oiseaux et des chauves-souris.	420\$/site + 1000/site/année d'équipement	
F18	F18. Indicateur: Abondance ou reproduction des salamandres.	5\$/site	
F19	F19. Présence de petits mammifères.	0\$/site	
F20	F20. Abondance des champignons mychoriziens.	420\$/site	
F91	F91: Indicateur : Insectes volants, papillons.	0\$/site + 30\$ d'équipement	

L'estimation des coûts n'inclu pas le temps d'analyse des données.

	Types d'écosystème														
	Milieux aquatiques					Milieux humides				Milieux forestiers					
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5	
Caractéristiques du suivi															
Nombre d'indicateurs	4	4	6	6	4	4	7	9	12	12	7	10	7	9	
Nombre total de sites	135	135	135	135	60	À déterminer	50	50	50	À déterminer	34	34	30	30	
Nombre de sites échantillonnés par année	31	61	31	61	30	À déterminer	10	10	10	À déterminer	7	7	6	6	
Coûts annuels	26 040	112 040	45260	157 300	82 710	À déterminer	27 570	51 970	68 070	À déterminer	3780	21 560	15240	30480	
Coûts initiaux pour l'équipement	0	0	0	0	7400	0	340	10 370	10 370	0	30	7360	30	6360	
Type de mesures inclus dans le suivi															
Mesures au niveau des individus															
Généétique															
Croissance									H12						
Condition corporelle										F7	F13	F13	F13	F13	
Morphologie	A3, A4	A3, A4	A3, A4	A3, A4											
Santé (Maladie-parasites-pathogène)															
Mesures au niveau des populations															
Densité-abondance	A3, A4	A3, A4	A3, A4, A5, A6,	A3, A4, A5, A6,	A9, A10		H7, H8, H91	H7, H8, H11, H91	H7, H8, H11, H91	F6, F9, F11,	F13, F14, F18, F20	F13, F14, F16, F18, F20, F91	F13, F14, F16, F18, F20	F13, F14, F16, F18, F20, F91	
Saisonnalité-phénologie-aoutement (micro)										F5, F10					
Structure (p.ex., âge-sexe)															
Reproduction															
Survie							H8	H8	H8	F6, F11	F13	F13	F13	F13	
Mesures au niveau des espèces ou groupes fonctionnels															
Distribution	A3, A4	A3, A4	A3, A4, A5, A6,	A3, A4, A5, A6,	A9, A10		H7, H8, H91, H92	H7, H8, H10, H11, H91, H92	H7, H8, H10, H11, H91, H92	F2, F3, F6, F8, F9, F10, F11	F13, F14, F18, F92	F13, F14, F16, F18, F19, F91, F92	F13, F14, F16, F18, F19	F13, F14, F16, F18, F19, F91	
Catégorie:															
Parapluie	A4	A4	A4	A4											
Clé de voute (keystone)	A4	A4	A4	A4			H7	H7	H7	F6	F13	F13	F13	F13	
Exotique envahissante			A6	A6			H2, H3	H9	H9	F2, F3					
Indicateur de santé d'habitat	A2, A3	A2, A3	A2, A3, A5, A6	A2, A3, A5, A6	A2		H91	H10, H91	H10, H91	F11	F18	F16	F16	F16	
Menacée ou vulnérable								H10	H10			F17, F18	F18	F17, F18	
Emblématique-Charismatique	A4	A4	A4	A4				H11	H11	F6, F8, F10	F13	F13, F17	F13	F13, F17	
Peu connu (intérêt scientifique)			A5	A5							F20	F20, F21	F20	F20	
Indicateur de tendances populationnels	A3	A3	A3, A5	A3, A5			H7, H91	H7, H91	H7, H91	F6	F13	F13	F13	F13	
Taxon-groupe fonctionnel:															
Algues-Phytoplancton	A3	A3	A3, A6	A3, A6											
Zooplanctons	A3	A3	A3	A3											
Invertébrés aquatiques			A5	A5	A9		H91	H91	H91						
Poissons	A4	A4	A4	A4	A10										
Arbres							H8	H8	H8, H12	F4, F5, F6, F7,	F13, F14	F13, F14	F13, F14	F13, F14	
Autres plantes							H7, H9	H7, H9	H7, H9, H12		F14	F14	F14	F14	
Mousses - Lichens							H7	H7	H7	F3	F20	F20, F21	F20	F20	
Champignons			A6	A6											
Bactéries															
Invertébrés terrestres								H11	H11	F2, F3	F92	F16, F92	F16	F16	
Amphibiens								H10	H10		F18	F18	F18	F18	
Reptiles															
Mammifères							H92	H92	H92	F8, F9, F11		F17, F19	F19	F17, F19	
Oiseaux							H92	H92	H92	F10		F17		F17	
Mesures au niveau des communautés-interactions															
Composition-Diversité	A3, A4	A3, A4	A3, A4, A5, A6	A3, A4, A5, A6	A9, A10		H7, H8, H91, H92	H7, H8, H10, H11, H91, H92	H7, H8, H10, H11, H91, H92	F6, F8, F9, F10, F11	F13, F14, F20, F92	F13, F14, F16, F17, F20, F21, F91, F92	F13, F14, F16, F20	F13, F14, F16, F17, F20, F91	
Syncronie phénologique															
Groupes fonctionnels	A3, A4	A3, A4	A3, A4, A5, A6	A3, A4, A5, A6	A9		H7	H7, H11	H7, H11	F10	F13	F13, F16, F21	F13, F16	F13, F16	
Lien aquatique-terrestres					A6, A8, A9					F1					
Liens sol-surface										F2					
Réseaux alimentaires (herbivore-predation-parasite)	(A3, A4)	(A3, A4)	(A3, A4, A5, A6)	(A3, A4, A5, A6)	(A9, A10)										
Compétition	A3, A4	A3, A4	A3, A4, A5, A6	A3, A4, A5, A6	A9, A10		H8	H8	H8	F6, F8	F13	F13	F13	F13	
Mutualisme-Facilitation (pollinisation-microzyte)								H11	H11		F20	F20	F20	F20	
Mesures au niveau des habitats-écosystèmes															
Phénologie (Macro)										F4, F5					
Répartition			A6	A6			P1, H1			F6					
Fragmentation							P1, H2								
Taille							P1, H1, H2			F1, F2, F3					
Diversité spatiale			A6	A6			P1, H1								
Protection															
Écotone - bordure			A6	A6			P1, H3			F6					
Stratification verticale	A1, A2	A1, A2	A1, A2	A1, A2											
Processus écosystémique															
Décomposition	A1, A2	A1, A2	A1, A2	A1, A2	A2				H13, H14		F92	F15, F21, F92			
Filtration	A1, A2	A1, A2	A1, A2	A1, A2	A2										
Productivité	A1, A2, A3	A1, A2, A3	A1, A2, A3, A6	A1, A2, A3, A6	A2, A7		H7, H8	H7, H8	H7, H8, H12	F7	F13	F13, F15	F13	F13	
Réfectance - Albédo	A2	A2	A2	A2	A2					F1, F2, F3, F6					
Perturbation naturelle							H1			F1, F2, F3					
Perturbation humaine			A6	A6			P1, H1								
Cyclage des nutriments (azote-carbone)	A1, A2	A1, A2	A1, A2	A1, A2	A2				H13, H14	F1, F2, F3	F21	F15, F21	F13	F13	
Résilience	A2	A2	A2	A2	A2		H1, H2, H3			F6, F7	F13	F13	F13	F13	
Synergie changements globaux	A1, A2	A1, A2	A1, A2, A6	A1, A2, A6			H9	H9, H10	H9, H10, H14	F1, F2, F3, F11	F12	F12	F12	F12	
Services écolgiques															
Services d'approvisionnement	A4	A4	A4	A4	A10		H92	H92	H92	F1, F2, F3, F5, F6, F7, F8, F9	F13	F13	F13	F13	
Services de régulation			A6	A6	A9		P1, H1, H2	H7, H8	H7, H8, H11, H14	F1, F2, F3	F13	F13, F21	F13	F13	
Services culturels et aménités	A4	A4	A4, A6	A4, A6			H92	H92	H92	F6, F8, F10	F13	F13, F91	F13	F13, F91	

Services de soutien à la vie	A1, A2, A3	A1, A2, A3	A1, A2, A3	A1, A2, A3	A2	H1, H2	H5, H6, H91	H5, H6, H91	H5, H6, H12, H91	F7, F9	F13, F20	F13, F15, F17, F19, F20	F13, F19, F20	F13, F17, F19, F20
Abiotique														
Température	A1	A1	A1	A1	A7									
Humidité														
pH	A1	A1	A1	A1			H5	H5	H5		F12 F90	F12 F90	F12	F12
Lumière														
Niveau d'eau							H6	H6	H6					
Couvert neige-glace (aussi pergélisol)														
Précipitation														
Composition éléments	A1, A2	A1, A2	A1, A2	A1, A2	A2		H5	H5	H5		F12	F12	F12	F12
Contaminant														
Type de dépôt														
Substrat			A6	A6	A7									
Vélocité (courant-vent)					A7									
Outils														
ADN environnementale														
Système géoinformatique - Indice satellitaire	A2	A2	A2	A2	A2	P1, H1, H2, H3								
Télé-détection <i>in situ</i> (caméra-micro)														
Identification terrain	A1, A4	A1, A4	A1, A4, A6	A1, A4, A6	A7, A10		H6, H7, H8, H9, H91	H6, H7, H8, H9, H11, H91	H6, H7, H8, H9, H11, H12, H14, H91		F13, F14, F18, F90, F92	F13, F14, F15, F18, F90, F91	F13, F14, F18	F13, F14, F18, F91
Identification laboratoire	A2, A3	A2, A3	A2, A3, A5	A2, A3, A5	A2, A9		H5, H91	H5, H10, H91	H5, H10, H13, H91		F12, F20, F92	F19, F20, F92	F20	F12, F16, F17, F19, F20
Science citoyenne														
Suivi déjà existant														
Ressources														
Pas de terrain						P1, H1, H2, H3								
Temps terrain faible	A1, A2, A3	A1, A2, A3	A1, A2, A3, A5	A1, A2, A3, A5	A2, A7		H5, H6, H9, H91, H92	H5, H6, H9, H10, H11, H91, H92	H5, H6, H9, H10, H11, H91, H92		F12, F14, F20, F92	F12, F14, F15, F16, F17, F19, F20	F12, F14, F16, F17, F19, F20	F12, F14, F16, F17, F19, F20
Temps terrain moyen			A6	A6	A9		H7, H8	H7, H8	H7, H8, H12, H13, H14		F13, F18	F13, F18	F13, F18	F13, F18
Temps terrain élevé	A4	A4	A4	A4	A10									
Coûts terrain faible	A2, A3	A2, A3	A2, A3, A5, A6	A2, A3, A5, A6	A2, A7, A9		H5, H6, H7, H8, H9, H91, H92	H5, H6, H7, H8, H9, H11, H12, H13, H91, H92	H5, H6, H7, H8, H9, H11, H12, H13, H14		F12, F13, F14, F20, F92	F12, F13, F14, F20, F21, F91, F92	F12, F13, F14, F16, F19, F20	F12, F13, F14, F16, F19, F20
Coûts terrain moyen	A4	A4	A4	A4	A10									
Coûts terrain élevé	A1	A1	A1	A1				H10	H10, H14			F17		
Expertise terrain faible	A1, A2, A3	A1, A2, A3	A1, A2, A3, A5	A1, A2, A3, A5	A2, A7, A9		H5, H6, H8, H91	H5, H6, H8, H10, H91	H5, H6, H8, H10, H12, H13, H91		F12, F13, F20, F90	F12, F13, F15, F17, F19, F20, F21, F90	F12, F13, F16, F17, F19, F20	F12, F13, F16, F17, F19, F20
Expertise terrain moyen	A4	A4	A4, A6	A4, A6	A10		H7, H9	H7, H9	H7, H9, H14		F14, F18	F14, F18	F14, F18	F14, F18
Expertise terrain élevé							H92	H11, H92	H11, H92		F91	F91	F91	F91
Pas de laboratoire	A1, A4	A1, A4	A1, A4, A6	A1, A4, A6	A7		H6, H7, H8, H9, H92	H6, H7, H8, H9, H10, H11, H13, H14, H92	H6, H7, H8, H9, H10, H11, H13, H14, H92		F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11	F13, F14, F18, F90	F13, F14, F17, F18, F19	F13, F14, F18, F19
Temps Laboratoire faible	A2	A2	A2	A2	A2				H12, H13					
Temps Laboratoire moyen							H5	H5	H5					
Temps Laboratoire élevé	A3	A3	A3, A5	A3, A5			H91	H91	H91		F20, F92	F15, F20, F21, F15	F20	F20
Expertise Laboratoire faible	A2	A2	A2	A2	A2				H12, H13					
Expertise Laboratoire moyen							H5	H5	H5					
Expertise Laboratoire élevé	A3	A3	A3, A5	A3, A5			H91	H91	H91		F16, F20, F92	F16, F20, F21, F92	F16, F20	F16, F20
Coûts Laboratoire faible	A3	A3	A3, A5	A3, A5			H91	H91	H12, H13, H91		F20, F92	F15, F16, F19, F20, F92	F16, F19, F20	F16, F19, F20
Coûts Laboratoire moyen	A2	A2	A2	A2	A2		H5	H5	H5		F12	F12	F12	F12

