

DOMINIQUE BERTEAUX

avec la collaboration de

NICOLAS CASAJUS et SYLVIE DE BLOIS

CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET BIODIVERSITÉ DU QUÉBEC

VERS UN NOUVEAU PATRIMOINE NATUREL



Presses
de l'Université
du Québec

CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET BIODIVERSITÉ DU QUÉBEC

Membre de
L'ASSOCIATION
NATIONALE
DES ÉDITEURS
DE LIVRES

Presses de l'Université du Québec

Le Delta I, 2875, boulevard Laurier, bureau 450, Québec (Québec) G1V 2M2

Téléphone : 418 657-4399

Télécopieur : 418 657-2096

Courriel : puq@puq.ca

Internet : www.puq.ca

Diffusion/Distribution :

CANADA Prologue inc., 1650, boulevard Lionel-Bertrand, Boisbriand (Québec) J7H 1N7
Tél. : 450 434-0306 / 1 800 363-2864

FRANCE AFPU-D – Association française des Presses d'université
Sodis, 128, avenue du Maréchal de Lattre de Tassigny, 77403 Lagny, France – Tél. : 01 60 07 82 99

BELGIQUE Patrimoine SPRL, avenue Milcamps 119, 1030 Bruxelles, Belgique – Tél. : 02 7366847

SUISSE Servidis SA, Chemin des Chalets 7, 1279 Chavannes-de-Bogis, Suisse – Tél. : 022 960.95.32



La Loi sur le droit d'auteur interdit la reproduction des œuvres sans autorisation des titulaires de droits. Or, la photocopie non autorisée – le « photocopillage » – s'est généralisée, provoquant une baisse des ventes de livres et compromettant la rédaction et la production de nouveaux ouvrages par des professionnels. L'objet du logo apparaissant ci-contre est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit le développement massif du « photocopillage ».

DOMINIQUE BERTEAUX

avec la collaboration de

NICOLAS CASAJUS et SYLVIE DE BLOIS

CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET BIODIVERSITÉ DU QUÉBEC

VERS UN NOUVEAU PATRIMOINE NATUREL

**Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives nationales
du Québec et Bibliothèque et Archives Canada**

Vedette principale au titre :

Changements climatiques et biodiversité du Québec :
vers un nouveau patrimoine naturel

Comprend des références bibliographiques et un index.

ISBN 978-2-7605-3950-1

1. Climat – Changements – Québec (Province). 2. Biodiversité – Facteurs
climatiques – Québec (Province). I. Berteaux, Dominique, 1965- .
II. Casajus, Nicolas. III. Blois, Sylvie de, 1957- .

QC903.2.C3C52 2014 577.2'209714 C2013-942131-9

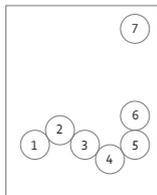
Les Presses de l'Université du Québec
reconnait l'aide financière du gouvernement du Canada
par l'entremise du Fonds du livre du Canada
et du Conseil des Arts du Canada pour leurs activités d'édition.

Elles remercient également la Société de développement
des entreprises culturelles (SODEC) pour son soutien financier.

Conception graphique

**Michèle Blondeau
Richard Hodgson**

Images de couverture



1. Jacques Larivée, Jaseur boréal (*Bombycilla garrulus*)
2. Maxim Larivée, Chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra*)
3. Maxim Larivée, Hespérie délicate (*Ancyloxypha numitor*)
4. Jacques Larivée, Couleuvre d'eau (*Nerodia sipedon sipedon*)
5. Jacques Larivée, Cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*)
6. Jacques Larivée, Paruline flamboyante (*Setophaga ruticilla*)
7. Jacques Larivée, Cypripède royal (*Cypripedium reginae*)

Mise en pages

Interscript

Dépôt légal : 1^{er} trimestre 2014

- › Bibliothèque et Archives nationales du Québec
- › Bibliothèque et Archives Canada

© 2014 – Presses de l'Université du Québec

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés

Imprimé au Canada

*Aux milliers de naturalistes du Québec,
sans les observations desquels la réalisation
de ce livre aurait été impossible.*



REMERCIEMENTS

Le projet de recherche CC-Bio duquel émerge ce livre a démarré en 2007 grâce au travail rassembleur de Luc Vescovi du consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques. Toujours en cours, CC-Bio a été le projet précurseur au Québec qui a permis de sensibiliser les acteurs du domaine, préparant ainsi le développement d'une programmation de recherche plus complète, soutenue par Ouranos.

CC-Bio a été principalement financé par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, grâce à une subvention du programme de projets stratégiques. Il a également reçu le soutien financier du consortium Ouranos, de l'Agence Parcs Canada, du ministère des Ressources naturelles du Québec, de Canards Illimités Canada et du Service canadien de la faune (Environnement Canada). Ces organismes ont aussi contribué intellectuellement aux recherches, de même que Conservation de la nature Canada, Regroupement QuébecOiseaux, zoo Ecomuseum de la Société d'histoire naturelle de la vallée du Saint-Laurent, ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, Université McGill, Université de Montréal, Université Joseph Fourier (France), Université du Maine (États-Unis) et Wright State University (États-Unis). L'Université du Québec à Rimouski (UQAR) a joué un rôle pivot en coordonnant l'ensemble du travail.

La Chaire de recherche du Canada en biodiversité nordique (UQAR), le Groupe de recherche sur les environnements nordiques BORÉAS (UQAR), le Centre d'études nordiques, le ministère des Ressources naturelles du Québec et le Fonds vert (dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012 du gouvernement du Québec et de sa mesure 26 pilotée par Ouranos) ont soutenu financièrement la production du livre. En plus des trois auteurs principaux du livre et de leurs coauteurs, des experts réviseurs ont contribué aux divers chapitres grâce à leur lecture critique. Les noms des coauteurs et réviseurs apparaissent à la section «Contributions». Un grand merci à Jacques Larivée et à Maxim Larrivée pour avoir fourni les photographies qui apparaissent en couverture. Jacques Larivée, Catherine Périé, Marylène Ricard, Sylvain Christin et Yanick Gendreau ont été les premiers lecteurs de l'ensemble du manuscrit et nous les remercions pour leurs nombreux commentaires pertinents.

Nous remercions chaleureusement les nombreux étudiants qui ont participé au projet CC-Bio: Blache-Paul Akpoue, Volker Bahn, Frieda Beauregard, Laura Boisvert-Marsh, Dominic Chambers, Richard Feldman, Xavier Francoeur, Chantal Gagnon, Yanick Gendreau, Natalie James, Benoît Laliberté, Alexandra-Sacha Liston, Beatriz Osorio-Rodriguez et Jason Samson. Leur passion et les nombreux obstacles qu'ils ont affrontés dans leurs recherches ont été des sources importantes de motivation et de réflexion. Nos collègues Brian McGill (University of Maine), Jean-François Angers (Université de Montréal) et Murray Humphries (Université McGill) ont encadré certains de ces étudiants et apporté des expertises complémentaires aux nôtres. Merci à Wilfried Thuiller (Université Joseph Fourier de Grenoble) pour ses conseils indispensables en début de projet.

Pour finir, un grand merci aux milliers de naturalistes, dont les observations, méticuleusement archivées durant des décennies, ont rendu possible ce travail. Leurs patients et passionnés efforts nous aident aujourd'hui à mieux comprendre et à mieux apprécier les relations que nous entretenons avec notre planète, la seule qui, pour l'instant, héberge avec certitude cet étrange phénomène qu'est la vie.

Dominique Berteaux

Les redevances aux auteurs issues de la vente de cet ouvrage sont entièrement versées au Regroupement QuébecOiseaux et au zoo Ecomuseum de la Société d'histoire naturelle de la vallée du Saint-Laurent.



AVANT-PROPOS

Ce livre résume l'état des connaissances quant aux effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec. Il résulte du travail de près de 40 personnes collaborant depuis 2007 au projet de recherche CC-Bio (Effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec).

Le projet CC-Bio a rassemblé pour la première fois au Québec une équipe venue d'horizons divers (universités, ministères, agences gouvernementales, associations de naturalistes, organismes non gouvernementaux voués à la protection de la nature) afin de comprendre et prévoir les effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec. Les approches scientifiques les plus perfectionnées ainsi que les modèles climatiques et les données sur la biodiversité québécoise les plus à jour ont été utilisés pour atteindre cet objectif.

Nous désirions également tirer les enseignements de nos découvertes du point de vue de la gestion et de la conservation des espèces et écosystèmes. Pour ce faire, il était impératif que les résultats de nos recherches soient diffusés au-delà du cercle restreint des quelques spécialistes de la question. Le livre résulte de cette aspiration. Ainsi, les biologistes, les gestionnaires de la faune et des parcs, les étudiants et enseignants en biologie, les naturalistes avertis, les ingénieurs forestiers,

les techniciens en écologie, les professionnels et militants de la conservation de la nature ont maintenant à leur disposition une foule de connaissances à jour qui n'ont jamais été rassemblées ailleurs, ainsi que de nouvelles pistes de réflexion.

L'introduction et les trois premiers chapitres présentent le cadre général dans lequel s'inscrit l'étude des effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec. Ce contexte est riche, car la biodiversité du Québec, les climats du Québec et les liens qui les unissent sont des sujets vastes et passionnants. Leur exploration révèle à la fois certains éléments fondamentaux du patrimoine naturel du Québec et les contours de nos connaissances actuelles. Nous découvrons dans cette première partie du livre à quel point les changements climatiques sont incontournables pour penser au futur de la biodiversité du Québec.

Les chapitres 4 et 5 entrent au cœur du projet CC-Bio et des développements scientifiques les plus récents. La plupart des résultats qui y apparaissent sont publiés pour la première fois. Nous n'avons pas craint d'aborder certains aspects dont le niveau technique est parfois relevé, mais en ayant toujours à l'esprit un grand souci de clarté. Ainsi nous avons, par exemple, privilégié les représentations cartographiques aux démonstrations statistiques. Ces dernières apparaîtront dans des articles spécialisés. Nous avons aussi rassemblé dans des encadrés les notions les plus techniques. La lecture des encadrés apportera des éclaircissements aux lecteurs qui le désirent, mais elle pourra aussi être omise sans perdre le fil des raisonnements.

Le chapitre 6 tire les conséquences de tout ce qui précède en analysant les retombées pratiques de nos recherches. Il s'agit d'un chapitre essentiel, qui nous a forcés à poser des questions vitales sur la gestion et la conservation de la biodiversité du Québec. Nous y avons fait un effort particulier pour résumer l'abondante littérature, pour offrir des synthèses visuelles guidant la réflexion et pour stimuler de nouvelles idées.

La conclusion aborde des questions plus générales quant à l'utilité de notre évaluation scientifique. Nous y discutons ainsi des thèmes de l'originalité, de la légitimité, de la crédibilité et de la visibilité de la recherche. Nous traçons également les principales pistes dans lesquelles les recherches futures vont probablement s'engager, puis terminons en rappelant la place qu'occupe la science dans l'évolution de nos sociétés.

Nos analyses ont porté sur près de 1 000 espèces, parmi lesquels des homéothermes et hétérothermes (pour les animaux), des espèces herbacées et ligneuses (pour les plantes), des représentants de tous les niveaux trophiques, ainsi que des espèces d'une grande variété de milieux. Nous avons produit au cours de nos travaux des millions de cartes de répartition future potentielle, souvent réduites dans ce livre à quelques chiffres ou cartes synthétiques. Cependant, malgré l'ampleur de la tâche accomplie, il nous était impossible d'aborder en détail tout ce qui touche aux effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec.

Ainsi, nous nous sommes concentrés sur les vertébrés et les plantes vasculaires, groupes pour lesquels des informations de répartition assez précises sont disponibles. Nos analyses ne touchent pas à la diversité génétique ou au fonctionnement

des écosystèmes, des composantes importantes de la biodiversité, mais qui sont encore trop difficiles à traiter à l'échelle du Québec. Bien que nous fassions un bref survol des relations passées entre le climat et la biodiversité, nous nous concentrons surtout sur le présent et l'avenir afin de répondre aux besoins de gestion dans un climat changeant. Nous traitons de la biodiversité terrestre, sans toucher au milieu marin. C'est un monde différent qui aurait exigé une approche assez éloignée de celle que nous avons utilisée. Nous présentons des informations importantes et nouvelles sur le Québec nordique, mais nos analyses concernent surtout la biodiversité qui est au sud du 53^e parallèle. Les données disponibles sur la biodiversité située au nord de cette latitude sont malheureusement encore très parcellaires. Elles nécessitent un traitement spécifique et sont donc l'objet d'autres recherches, notamment le projet d'Atlas de la biodiversité du Québec nordique.

Les idées abordées dans cet ouvrage sont vastes. Elles touchent à tous les concepts importants pour qui s'intéresse aux changements climatiques et à la biodiversité du Québec. Nous espérons que ce livre suscitera des discussions, fera naître de nouvelles idées de recherche et influencera des décisions. Puisqu'il est le fruit d'une collaboration d'envergure, riche, stimulante et qui nous a beaucoup appris, nous espérons proposer une référence utile à toutes les personnes intéressées par l'avenir de la biodiversité du Québec.

Afin d'aider les lecteurs à poursuivre la réflexion, le site <<http://cc-bio.uqar.ca/>> (consulté le 10 septembre 2013) fournit quantité d'informations complémentaires. En particulier, près de 11 500 cartes et 4 000 tableaux, facilement accessibles grâce à des menus déroulants, permettent au lecteur d'explorer les répartitions potentielles futures de centaines d'espèces. D'autre part, toutes les figures du livre peuvent être téléchargées (JPEG ou PowerPoint) du site Web, ce qui pourra faciliter la diffusion des messages principaux découlant de notre travail.

Dominique Berteaux



CONTRIBUTIONS

Cet ouvrage est le fruit d'une intense collaboration. Un comité de rédaction a été établi avec les auteurs, en octobre 2011, les objectifs, les orientations, le style et la structure du livre. Les membres de ce comité sont tous des participants au projet CC-Bio: Marcel Darveau (Canards Illimités Canada), François Fournier (Environnement Canada), Jacques Larivée (Regroupement QuébecOiseaux), Travis Logan (consortium Ouranos), Patrick Nantel (Agence Parcs Canada), Catherine Périé (ministère des Ressources naturelles du Québec), Frédéric Poisson (ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec), Sébastien Rouleau (zoo Ecomuseum de la Société d'histoire naturelle de la vallée du Saint-Laurent), Jason Samson (Université de Montréal) et Robert Siron (consortium Ouranos).

Les personnes suivantes ont participé à l'élaboration du livre en fournissant, dans le cas des coauteurs de chapitres, des expertises indispensables lors de la rédaction. Les experts réviseurs ont, quant à eux, formulé de nombreux commentaires ayant permis d'améliorer le manuscrit. S'il reste des erreurs dans ce livre, les auteurs en assument l'entière responsabilité.

Chapitre 1. La biodiversité du Québec: Anouk Simard, ministère des Ressources naturelles du Québec (révisure).

Chapitre 2. Les climats du Québec: Travis Logan (coauteur) et Dominique Paquin (révisseur), consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques.

Chapitre 3. L'importance biologique des changements climatiques: Claude Lavoie, Université Laval (révisseur).

Chapitre 4. La projection écologique: une science exigeante: Catherine Périé, ministère des Ressources naturelles du Québec (coauteure); Maxim Larrivée, Insectarium de Montréal/Espace pour la vie (révisseur).

Chapitre 5. Vers un nouveau patrimoine naturel: Catherine Périé, ministère des Ressources naturelles du Québec (coauteure); Maxim Larrivée, Insectarium de Montréal/Espace pour la vie (révisseur).

Chapitre 6. L'adaptation aux changements climatiques: Robert Siron, consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques (révisseur) et Anouk Simard, ministère des Ressources naturelles du Québec (révisseur).

CONTRIBUTIONS AU PROJET CC-BIO

Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada

Gouvernement du Canada

Canards Illimités Canada

Regroupement QuébecOiseaux

Zoo Ecomuseum de la Société d'histoire naturelle de la vallée du Saint-Laurent

Consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques

Ministère des Ressources naturelles du Québec

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

Conservation de la nature Canada

CONTRIBUTIONS À LA PRODUCTION DU LIVRE

Chaire de recherche du Canada en biodiversité nordique

Ministère des Ressources naturelles du Québec

Centre d'études nordiques (CEN)

Université du Québec à Rimouski

Fonds vert du gouvernement du Québec

Groupe de recherche sur les environnements nordiques BORÉAS



À PROPOS DES AUTEURS

Dominique Berteaux a obtenu un doctorat en biologie à l'Université de Sherbrooke en 1996. Il a ensuite été chercheur postdoctoral à l'Université Laval et à l'Université de l'Alberta avant de devenir professeur en biologie de la faune à l'Université McGill en 1999. Il est depuis 2002 professeur en écologie à l'Université du Québec à Rimouski. Après avoir été, de 2002 à 2011, titulaire de la chaire de recherche du Canada junior en conservation des écosystèmes nordiques, il est depuis 2012 titulaire de la chaire de recherche du Canada senior en biodiversité nordique. Le Dr Berteaux est membre du Groupe de recherche sur les environnements nordiques BORÉAS, qu'il a dirigé de 2008 à 2012, ainsi que du Centre d'études nordiques et du Centre de la science de la biodiversité du Québec. Il a été pendant huit ans membre d'un sous-comité de spécialistes du comité sur la situation des espèces en péril au Canada et a créé en 2009 le Programme de formation FONCER du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) en sciences environnementales nordiques (EnviroNord), qu'il dirige depuis. Les recherches du Dr Berteaux portent sur l'écologie des mammifères, le fonctionnement des écosystèmes et l'effet des changements climatiques sur la biodiversité. Ses travaux se déroulent surtout au Québec, au Yukon et au Nunavut. Il dirige depuis 2007 le projet CC-Bio sur les effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec.

Nicolas Casajus a obtenu une licence en biologie des organismes, populations et écosystèmes à l'Université Paul Sabatier de Toulouse en 2006, puis un master en écologie (spécialité biostatistiques et modélisation) à la même université en 2008. Ses recherches portaient sur la modification des aires de répartition des poissons des cours d'eau français sous l'effet des changements climatiques. Il est, depuis fin 2008, professionnel de recherche à l'Université du Québec à Rimouski où il assume les responsabilités de coordonnateur, gestionnaire de bases de données et modélisateur du projet CC-Bio.

Sylvie de Blois a obtenu un doctorat en biologie avec spécialisation en écologie végétale et écologie du paysage à l'Université de Montréal en 2001. Elle a été chercheuse invitée au Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation en Australie et est depuis 2001 professeure au Département de sciences végétales et à l'École d'environnement de l'Université McGill. Elle est directrice adjointe de l'École d'environnement de McGill et membre du Centre de la science de la biodiversité du Québec. Elle participe régulièrement en tant qu'experte à des comités internationaux sur des enjeux de développement durable et sur la relève en recherche. En 2007, elle a initié avec Dominique Berteaux le projet CC-Bio sur les effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec et est membre fondatrice du Groupe Phragmites. Elle dirige depuis 2011 le projet Changements climatiques et plantes envahissantes au Québec qui vise à évaluer l'impact des changements climatiques sur les invasions biologiques. Les recherches de la D^{re} de Blois portent sur l'écologie végétale et l'écologie du paysage et en particulier sur l'effet des changements climatiques sur la diversité végétale. Ses travaux se sont déroulés surtout dans les milieux agricoles et forestiers du sud du Québec et en régions tropicales (Mexique, Australie).

Travis Logan est spécialiste en scénarios hydroclimatiques au consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques. Il a collaboré au chapitre 2 à titre de coauteur.

Catherine Périé est spécialiste en impacts des changements climatiques sur les forêts du Québec à la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles du Québec. Elle a collaboré aux chapitres 4 et 5 à titre de coauteur.



TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IX
AVANT-PROPOS	XI
CONTRIBUTIONS	XV
À PROPOS DES AUTEURS	XVII
Liste des encadrés	XXIII
Liste des figures	XXV
Liste des tableaux	XXIX
Liste des sigles et acronymes	XXXI
INTRODUCTION	1
1. Les enjeux scientifiques	2
2. Les enjeux économiques	3
3. Les enjeux politiques	4
4. Les enjeux moraux	4

PARTIE 1. LE CADRE GÉNÉRAL	7
CHAPITRE 1. LA BIODIVERSITÉ DU QUÉBEC	9
À retenir	10
Introduction	11
1. Une description de la biodiversité	11
1.1. Le catalogue de la biodiversité	11
1.2. La répartition des espèces	15
1.3. Les gradients de biodiversité	17
1.4. Les régions écologiques	18
2. Une explication de la biodiversité	19
2.1. Un regard nécessaire vers le passé	19
2.2. La hiérarchie des facteurs écologiques	21
2.3. Le concept fondamental de niche écologique	22
3. La gestion et la conservation de la biodiversité	23
3.1. À quoi sert la biodiversité?	23
3.2. Les inquiétudes que soulève la dynamique actuelle de la biodiversité	25
3.3. La gestion de la biodiversité au Québec	25
Conclusion	28
CHAPITRE 2. LES CLIMATS DU QUÉBEC	29
À retenir	30
Introduction	31
1. Les climats actuels du Québec	31
1.1. Le climat versus la météo	31
1.2. Ce qui caractérise les climats du Québec	32
2. Les changements climatiques récents	34
2.1. Les tendances observées au Québec	35
2.2. Des changements régionalisés	36
3. Les projections climatiques	36
3.1. Les modèles climatiques globaux	37
3.2. Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre	38
3.3. Les réductions d'échelle	39
3.4. Les simulations climatiques	40
3.5. L'incertitude associée aux scénarios climatiques	42
3.6. Les climats du Québec à la fin du XXI ^e siècle	42
Conclusion	46
CHAPITRE 3. L'IMPORTANCE BIOLOGIQUE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	49
À retenir	50
Introduction	51
1. Les mécanismes d'influence du climat sur la biodiversité	51
1.1. La température	51
1.2. Les autres facteurs climatiques	54
1.3. Les nombreux effets indirects	55
1.4. Des mécanismes menant à une hypothèse simple et claire	56

2. Les effets des changements climatiques déjà observés au Québec	56
2.1. Les difficultés de détection et d'attribution	56
2.2. Les changements de phénologie des espèces	59
2.3. Les changements de répartition des espèces	64
2.4. Les changements à l'échelle des écosystèmes	68
Conclusion	68
PARTIE 2. REGARDS VERS L'AVENIR.	69
CHAPITRE 4. LA PROJECTION ÉCOLOGIQUE: UNE SCIENCE EXIGEANTE	71
À retenir	72
Introduction	73
1. Les modèles de niche écologique	74
1.1. Qu'est-ce qu'un modèle de niche?	74
1.2. Les avantages et les inconvénients des modèles de niche	74
1.3. La modélisation du déplacement des espèces ou de celui des communautés?	76
2. Les données utilisées pour la modélisation	76
2.1. L'étendue spatiale et la résolution des données	78
2.2. La nature des données disponibles sur la répartition des espèces	79
2.3. Le choix des espèces étudiées	79
2.4. Les descripteurs des climats et des sols	81
3. L'élaboration des modèles	83
3.1. Le choix des algorithmes	83
3.2. La calibration	83
3.3. L'évaluation	83
3.4. La projection	85
4. La confiance dans les prévisions	86
4.1. Les sources d'incertitude	87
4.2. La projection d'ensemble	87
4.3. L'estimation de la confiance	87
Conclusion	88
CHAPITRE 5. VERS UN NOUVEAU PATRIMOINE NATUREL	89
À retenir	90
Introduction	91
1. Une étude de cas: le bruant chanteur	91
1.1. Une représentation visuelle des effets des changements climatiques	92
1.2. Une représentation chiffrée des effets des changements climatiques	94
1.3. Des prévisions spectaculaires à interpréter avec justesse	97

2. Des espèces en mouvement	98
2.1. Les déplacements des aires de répartition	99
2.2. Les immigrations, expansions, contractions et extirpations	99
2.3. Une très forte pression de changement	102
3. Des écosystèmes en transition	107
3.1. Davantage d'espèces : le paradoxe de la biodiversité nordique	107
3.2. Des écosystèmes en déséquilibre : le revers de la médaille	109
3.3. De multiples processus à l'œuvre	114
Conclusion	115
CHAPITRE 6. L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES	117
À retenir	118
Introduction	119
1. Un changement de paradigme	119
2. Un détour vers l'éthique et les positions morales	121
3. Un nouveau cadre de réflexion	122
3.1. Les aires protégées	122
3.2. La connectivité	124
3.3. La migration assistée	126
3.4. La gestion des populations	129
3.5. Se préparer aux surprises	129
3.6. Sur la scène québécoise	133
4. Vingt questions et vingt réponses	136
Conclusion	141
CONCLUSION	143
1. L'originalité de ce livre	144
2. Ce qui fait l'utilité d'une évaluation scientifique	145
2.1. La légitimité	145
2.2. La crédibilité	145
2.3. La visibilité	145
3. Et la suite ?	147
3.1. Des recherches à poursuivre	147
3.2. Une nécessaire adaptation aux changements climatiques	147
RÉFÉRENCES	151
INDEX GÉNÉRAL	163
INDEX DES ESPÈCES	167

LISTE DES ENCADRÉS

Encadré 1.1.	Les aires protégées du Québec	27
Encadré 2.1.	Le forçage radiatif	35
Encadré 2.2.	Le consortium Ouranos	40
Encadré 3.1.	Les zones de rusticité des plantes	53
Encadré 3.2.	L'apport précieux des naturalistes	61
Encadré 4.1.	L'anticipation, la projection, la prévision et la prédiction : du pareil au même?	74
Encadré 4.2.	La modélisation de niche : un outil polyvalent pour la projection écologique	75
Encadré 4.3.	Trois alternatives aux modèles de niche	77
Encadré 4.4.	Quelques statistiques sur la modélisation réalisée dans CC-Bio	88
Encadré 5.1.	Les cartes et les données disponibles en complément du livre	91
Encadré 5.2.	L'indice de dissimilarité de Jaccard	112
Encadré 6.1.	Le vocabulaire de l'adaptation aux changements climatiques	120

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1.	Nombre d'espèces sur la planète Terre	12
Figure 1.2.	Exemples de types de répartition géographique	16
Figure 1.3.	Gradients de richesse spécifique des oiseaux et des mammifères	17
Figure 1.4.	Écorégions de niveau I en Amérique du Nord et au Québec	18
Figure 1.5.	Principaux substrats rocheux de l'est du Canada	20
Figure 1.6.	Échelles spatiales d'influence de certains facteurs écologiques	22
Figure 1.7.	Illustration de la niche écologique d'une espèce	23
Figure 1.8.	Extension des niveaux de moralité	28
Figure 2.1.	Températures et précipitations au Québec et en périphérie en 1961-1990	33
Figure 2.2.	Zones climatiques de l'Amérique du Nord	34
Figure 2.3.	Principaux concepts de climatologie prédictive abordés	37
Figure 2.4.	Familles de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre	39

Figure 2.5.	Représentation selon les cellules d'un modèle climatique global et d'un modèle régional du climat des températures annuelles moyennes du Québec et de sa périphérie	41
Figure 2.6.	Illustration du déplacement prévu des climats dans le sud du Québec durant le XXI ^e siècle.	44
Figure 2.7.	Isothermes et isohyètes annuelles en 1961-1990 et 2071-2100 pour le Québec et sa périphérie	45
Figure 2.8.	Gradients de température et vélocité climatique au Québec et dans certaines régions voisines entre 1961-1990 et 2071-2100	47
Figure 3.1.	Interactions écologiques et influences climatiques dans un écosystème forestier du sud du Québec	57
Figure 3.2.	Quatre espèces de plantes dont la floraison au Québec est devenue plus précoce durant le XX ^e siècle	60
Figure 3.3.	Changement de la date d'arrivée printanière de 113 espèces d'oiseaux migrateurs nichant au Québec	62
Figure 3.4.	Changement de la date de premier chant de la rainette crucifère dans le sud du Québec.	63
Figure 3.5.	Déplacements nordiques récents d'aires de répartition au Québec	65
Figure 3.6.	Progression nordique du cardinal rouge au Québec depuis 50 ans	66
Figure 4.1.	Zone d'étude pour étudier les effets potentiels des changements climatiques sur la biodiversité du Québec	78
Figure 4.2.	Étapes pour élaborer un modèle de niche et prévoir la répartition future potentielle d'une espèce	84
Figure 4.3.	Performances de 380 760 modèles statistiques calibrés durant le projet CC-Bio	86
Figure 5.1.	Bruant chanteur	92
Figure 5.2.	Résultats graphiques issus de la modélisation de la niche climatique du bruant chanteur	93
Figure 5.3.	Réponses de type « déplacement avec expansion », « déplacement avec contraction » et « déplacement net »	100
Figure 5.4.	Réponses de type « immigration », « expansion », « contraction » et « extirpation »	101
Figure 5.5.	Réponse potentielle de 765 espèces aux changements climatiques du XXI ^e siècle dans le Québec méridional	103
Figure 5.6.	Amplitude de déplacement des niches de 740 espèces en réponse aux changements climatiques du XXI ^e siècle au Québec	106

Figure 5.7.	Direction de déplacement de niche induite par les changements climatiques du XXI ^e siècle pour 383 espèces présentant une réponse de type « déplacement »	108
Figure 5.8.	Effets potentiels sur 765 espèces modélisées des changements climatiques prévus entre 1961-1990 et 2071-2100	110
Figure 5.9.	Écorégions de niveau III chevauchant la partie québécoise de notre zone d'étude et changements entre 1961-1990 et 2071-2100 du nombre d'espèces modélisées pour lesquelles les conditions climatiques sont favorables dans chaque écorégion.	111
Figure 5.10.	Remaniement potentiel de la biodiversité entre 1961-1990 et 2071-2100 dans le sud du Québec et certaines régions voisines	113
Figure 5.11.	Pourcentage d'espèces pour lesquelles les conditions climatiques étaient favorables en 1961-1990, mais ne le seront plus en 2071-2100	113
Figure 6.1.	Arbres de décision pour la gestion des populations face aux changements climatiques	130
Figure C.1.	Appartenance institutionnelle et fonctions principales des spécialistes ayant participé aux recherches	146
Figure C.2.	Quatre phases du processus d'adaptation aux changements climatiques	148



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1.	Nombre approximatif d'espèces décrites dans le monde et au Québec pour certains groupes taxonomiques	14
Tableau 1.2.	Concepts utiles pour décrire la dynamique de la biodiversité	26
Tableau 2.1.	Changements de températures et précipitations observés entre 1961 et 2005 dans les six écorégions de niveau I du Québec	36
Tableau 2.2.	Changements climatiques prévus entre 1961-1990 et 2071-2100 dans les six écorégions de niveau I du Québec	43
Tableau 2.3.	Déplacements latitudinaux des isothermes annuelles entre 1961-1990 et 2041-2070 et entre 1961-1990 et 2071-2100	46
Tableau 4.1.	Bases de données d'occurrence d'espèces étudiées dans le projet CC-Bio	80
Tableau 4.2.	Nombre d'espèces dont la répartition a été modélisée dans le projet CC-Bio	81
Tableau 4.3.	Liste des variables climatiques utilisées dans les modèles de niche	82

Tableau 4.4.	Bases de données environnementales utilisées dans le projet CC-Bio pour modéliser la répartition des espèces	82
Tableau 4.5.	Valeurs seuils d’AUC et de Kappa utilisées pour juger la performance des modèles	85
Tableau 5.1.	Résultats quantitatifs issus de la modélisation de la niche climatique du bruant chanteur	95
Tableau 5.2.	Réponses géographiques potentielles des espèces face aux changements climatiques	98
Tableau 5.3.	Les douze espèces étudiées dont la niche climatique pourrait disparaître du Québec méridional au cours du XXI ^e siècle	104
Tableau 5.4.	Surface cumulée occupée au Québec par les niches de 765 espèces en 1961-1990 et 2071-2100.	105
Tableau 5.5.	Évaluation simplifiée du potentiel de réorganisation spatiale de quatre groupes d’espèces face au déplacement de leur niche climatique durant le XXI ^e siècle.	107
Tableau 5.6.	Changements potentiels projetés pour l’érable à sucre entre 1961-1990 et 2071-2100.	114
Tableau 5.7.	Relation entre les changements climatiques contemporains et dix phénomènes structurant les écosystèmes du Québec.	115
Tableau 6.1.	Articles scientifiques traitant des stratégies d’adaptation aux changements climatiques dans le domaine de la biodiversité.	123
Tableau 6.2.	Adaptations aux changements climatiques pour conserver la biodiversité	134



LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

AARQ	Atlas des amphibiens et des reptiles du Québec
AUC	<i>Area under the receiver operating characteristic curve</i>
CC-Bio	Projet de recherche Effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec
ÉPOQ	Étude des populations d'oiseaux du Québec
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GRIL	Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie
MCCG	Modèle couplé du climat du globe
MCG	Modèle climatique global
MEA	Millenium Ecosystem Assessment
MRC	Modèle régional du climat
MRNF	Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
UICN	Union internationale de conservation de la nature
UQAR	Université du Québec à Rimouski
USDA	United States Department of Agriculture



INTRODUCTION

Le réchauffement global et la perte mondiale de biodiversité sont les deux plus importantes questions environnementales. Depuis 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) analyse les études scientifiques relatives au climat. Les conclusions sont claires: le climat change rapidement à cause de nos émissions de gaz à effet de serre. C'est un changement que nous pouvons mesurer et en bonne partie prédire, mais que nous n'arrivons pas à contrôler.

Un groupe équivalent au GIEC, mais consacré à la biodiversité, est né officiellement en avril 2012 après plusieurs années de négociations internationales. Cette Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (c'est son nom) documentera la crise globale de la biodiversité, en évaluera les conséquences pour les humains et fera la promotion des actions nécessaires pour l'enrayer. Nous cheminons de toute évidence vers l'extinction imminente de nombreuses formes de vie. Cette crise est encore plus difficile à mesurer, prédire et contrôler que la crise climatique.

Le climat et la vie sont en étroite relation sur notre planète. Depuis plus de trois milliards d'années, la vie a modelé le climat en changeant la composition de l'atmosphère et le climat a modelé la vie en influençant son évolution. Mais à l'échelle de temps à laquelle nous pouvons agir (les prochaines décennies), ce

sont les effets qu'ont les changements climatiques sur la biodiversité qui sont les plus préoccupants. D'ici la fin du siècle, la température moyenne de l'atmosphère pourrait monter de près de 5 °C, suivant les scénarios climatiques les plus extrêmes publiés par le GIEC (Alexander *et al.*, 2013). Ce réchauffement s'ajouterait à celui déjà enregistré depuis le XIX^e siècle, se poursuivrait après la fin du XXI^e siècle, et serait amplifié dans les régions arctiques (Alexander *et al.*, 2013). L'amplitude des réchauffements récent et projeté a conduit l'Union internationale des sciences géologiques à étudier la définition d'une nouvelle ère géologique, l'Anthropocène. Le changement climatique va-t-il altérer radicalement la biodiversité planétaire et balayer une partie des bénéfices qu'elle nous procure ?

La question des effets des changements climatiques sur la biodiversité soulève de nombreux enjeux. Certains sont universels alors que d'autres sont propres au Québec. Nous résumons ici la nature de ces enjeux en les découpant artificiellement en quatre catégories : scientifique, économique, politique et morale. Évidemment, ces catégories ne sont pas étanches. Les enjeux économiques et moraux influencent, par exemple, les enjeux politiques.

1.

LES ENJEUX SCIENTIFIQUES

La biologie des changements climatiques (en anglais *climate change biology*) analyse les nombreux liens entre les changements climatiques et les systèmes vivants. Cette discipline scientifique, située à la frontière entre l'écologie et la climatologie, est en pleine émergence et la progression de sa littérature spécialisée est stupéfiante. Les enjeux scientifiques qui lui sont propres sont nombreux, mais quatre semblent dominer.

La description et la compréhension des effets actuels et passés des changements climatiques sur la biodiversité constituent le fondement de la biologie des changements climatiques. Elles exigent

d'abord de détecter les changements en biodiversité, de discerner ceux qui sont attribuables aux changements climatiques, pour finalement établir les relations de cause à effet. Cet enjeu scientifique existait bien avant l'avènement des changements climatiques d'origine anthropique, puisque les biologistes ont compris depuis longtemps l'importance des variations climatiques dans le façonnement et l'organisation des formes de vie. Il a cependant pris une dimension nouvelle depuis que les humains influencent le climat.

Notre capacité à prédire les effets futurs des changements climatiques sur la biodiversité constitue un autre enjeu important. Il suscite des recherches très actives et très techniques où dominent les biostatistiques et la manipulation d'immenses quantités de données. Ce champ, situé à l'interface de la modélisation climatique et de la modélisation écologique, constitue un enjeu majeur, car toutes les indications qu'il nous donne quant aux transformations attendues de la biodiversité ont des conséquences directes sur la gestion de celle-ci. Ces indications ont aussi des impacts, plus flous, mais bien réels, sur la perception que nous avons de notre capacité à vivre en harmonie avec notre environnement.

La gestion de la biodiversité est également un enjeu incontournable. L'intendance des espèces à statut précaire et des espaces protégés (parcs, réserves, etc.) repose en effet grandement sur une conception statique de la biodiversité dans un climat assez stable. Par exemple, la notion d'intégrité écologique (l'état jugé caractéristique d'une région naturelle et susceptible de durer) est centrale à la gestion des parcs nationaux. On devine que le changement rapide du climat vient bousculer ce fondement important. D'autre part, la gestion de la biodiversité repose sur de nombreuses mesures (établissement de corridors, protection de berges, restauration d'écosystèmes, etc.) dont l'efficacité à long terme peut varier beaucoup selon que le climat est statique ou changeant. Finalement, la gestion de la biodiversité se fait aussi par de multiples plans d'action impliquant une population précise (p. ex. le caribou de la Gaspésie), une espèce donnée (p. ex. l'épinette noire récoltée par l'industrie forestière),

un groupe d'espèces bien identifié (p. ex. les insectes ravageurs de cultures), un écosystème entier (p. ex. un lac de villégiature), voire des paysages au complet (p. ex. un bassin versant). Dans tous ces cas, une bonne compréhension des implications des effets des changements climatiques représente un atout précieux pour prendre les meilleures décisions de gestion.

Notre ignorance de pans entiers de la biodiversité est mise cruellement en lumière par la biologie des changements climatiques et constitue un quatrième enjeu notable. Cette ignorance ne touche pas qu'à la taxonomie (la plupart des espèces n'ayant pas été décrites), mais aussi à la répartition des espèces, aux relations qu'elles ont entre elles et à l'importance de la multiplicité des formes de vie pour le fonctionnement des écosystèmes et le bien-être humain. L'approfondissement de nos connaissances sur la biodiversité était un enjeu scientifique connu avant que ne se développe la biologie des changements climatiques, mais l'importance de cet enjeu est exacerbée par les nombreuses questions nouvelles que provoque le changement rapide du climat.

Aucun de ces enjeux scientifiques n'est spécifique au Québec. Mais les climats, la biodiversité et l'utilisation du territoire du Québec ont des caractéristiques uniques qui créent des besoins de connaissances particuliers. Ces besoins commencent à être reconnus; la communauté scientifique québécoise consacre des efforts de plus en plus coordonnés pour étudier les effets des changements climatiques sur la biodiversité.

Parmi les programmes stimulant efficacement ces études, notons les Plans d'action sur les changements climatiques du gouvernement du Québec. Bien que visant principalement la réduction ou l'évitement des émissions de gaz à effet de serre, ils comportent aussi des volets visant l'adaptation aux changements climatiques. Ainsi, le Plan d'action 2006-2012 contenait parmi ses mesures un soutien pour déterminer la vulnérabilité des forêts québécoises aux changements climatiques, ainsi qu'un soutien pour développer des recherches sur la biodiversité et les écosystèmes.

Le Plan d'action 2013-2020 comporte quant à lui une priorité sur l'évaluation, la protection et la gestion de la biodiversité et des écosystèmes. Les sommes investies demeurent faibles par rapport à celles dont sont dotés d'autres secteurs comme la santé ou les infrastructures, mais elles n'en constituent pas moins de puissants leviers pour la communauté scientifique. Elles permettent en effet à de nombreux chercheurs d'inclure la question des effets des changements climatiques sur la biodiversité dans leur programmation de recherche, ainsi que de former de nouveaux experts dans le domaine.

2.

LES ENJEUX ÉCONOMIQUES

L'économie du Québec a déjà presque entièrement reposé sur sa biodiversité. Les animaux à fourrure, les arbres, les mammifères marins et les poissons ont été historiquement des ressources primordiales pour l'économie de la province. Aujourd'hui, l'économie du Québec ne repose pas que sur les ressources naturelles et dépend beaucoup des services. Cependant, la biodiversité joue encore un rôle très important, et des enjeux économiques notables sont liés à la question des effets des changements climatiques sur la biodiversité.

En 2010, plus de 60 000 emplois étaient attribués à l'industrie québécoise des produits forestiers, soit près de 15 % des emplois de l'activité manufacturière totale du Québec (MRNF, 2010, 2011). La valeur matérielle de certaines essences forestières est donc très grande. Les activités récréatives liées à la faune et à la nature sont quant à elles pratiquées par 3,4 millions de personnes, ce qui contribue à créer ou maintenir 32 100 emplois (MRNF, 2011; gouvernement du Québec, 2012a). Ce sont surtout les valeurs esthétique et spirituelle de la faune et de la nature en général qui génèrent ces activités récréatives. Les valeurs non matérielles de la biodiversité québécoise sont d'ailleurs un puissant moteur de l'économie touristique du Québec. Elles contribuent à ce qu'environ dix millions de touristes visitent la province chaque année.

Ces quelques chiffres touchent à des services directs rendus par la biodiversité du Québec. Il existe cependant de nombreux autres services, dont l'importance économique est primordiale, mais qui ne sont pas quantifiés. Par exemple, la régulation des crues par les écosystèmes forestiers et par les milieux humides a une énorme valeur, de même que le maintien de la fertilité des terres agricoles par la biodiversité des sols.

L'impossibilité actuelle de bien mesurer l'importance économique de la biodiversité empêche de saisir convenablement les enjeux monétaires liés aux effets des changements climatiques sur la biodiversité. Cependant, certains cas sont clairs. Par exemple, les changements de la forêt québécoise qui pourraient être induits par le réchauffement climatique soulèvent des enjeux économiques majeurs qu'il est urgent de bien comprendre.

3. LES ENJEUX POLITIQUES

Les enjeux politiques sont imbriqués en trois niveaux. La question des effets des changements climatiques sur la biodiversité résonne d'abord dans les opinions publiques, ce qui influence les politiques nationales, pour finalement infléchir les politiques internationales.

Les effets des changements climatiques sur la biodiversité engendrent des images puissantes. Des espèces exotiques envahissent de nouveaux territoires. La fonte de la banquise réduit l'habitat des ours blancs. Ces images restent fixées dans les esprits, elles cristallisent des peurs profondes de l'autre et du lendemain. Elles sont d'ailleurs utilisées efficacement dans les campagnes de sensibilisation des mouvements de protection de la nature, qui ont connu un essor considérable depuis 50 ans.

Le verdissement des opinions influence l'exercice du pouvoir. Aussi la grande majorité des nations bénéficie maintenant de ministères de l'Environnement ainsi que de lois, politiques et stratégies en matière de biodiversité. Nos connaissances sur la

façon dont les changements climatiques affectent les espèces et les écosystèmes finissent par percoler jusque dans ces lois, politiques et stratégies.

Au niveau international, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, adoptée lors du Sommet de la Terre de Rio en 1992, fut la première tentative de l'Organisation des Nations Unies pour remédier aux changements climatiques. La Convention reconnaît l'importance des systèmes biologiques comme indicateur de la limite de réchauffement planétaire à ne pas dépasser, celle qui nous ferait basculer dans le domaine des dangereuses interférences avec le système climatique. Cette notion de dangereuse interférence, maintenant centrale à toute discussion sur les changements climatiques, est évaluée selon trois références : la sécurité alimentaire, la protection des écosystèmes et un développement économique durable. Ainsi, les effets des changements climatiques sur la biodiversité constituent maintenant un enjeu crucial des négociations internationales. Les biologistes font face à une nouvelle responsabilité, celle de contribuer à définir la notion de « dangereuse interférence avec le système climatique ».

4. LES ENJEUX MORAUX

Nos normes morales expriment nos valeurs et sont façonnées par les conséquences, proches ou lointaines, de nos actions. Elles évoluent en fonction des nouvelles informations dont nous disposons. Ainsi, les dernières connaissances scientifiques quant aux changements climatiques et à leurs effets sur la biodiversité font vibrer au moins deux cordes morales. La première tient à notre attitude vis-à-vis des autres formes de vie. Étant donné que le changement rapide du climat risque d'avoir un effet destructeur sur des milliers d'espèces, elle pose la question de notre responsabilité vis-à-vis d'espèces créées par des centaines de milliers d'années d'évolution biologique. La seconde est liée aux disparités entre humains quant aux bénéfices qu'ils tirent de la nature. Est-il moral de réchauffer le climat si cela

change la biodiversité au point où d'autres humains encourent des pertes ou des risques importants ? Est-il moral de diminuer le patrimoine naturel dont hériteront les générations futures ?

On peut déceler une hiérarchie « en poupées russes » des normes morales : au centre l'individu, puis en s'éloignant du centre, la famille, la nation, l'humanité entière, toutes les formes de vie, voire la planète au complet. Plus on s'éloigne de l'individu, moins les normes morales sont définies et moins elles sont renforcées par des lois. En soulevant des questions quant à notre influence sur la biosphère, le changement du climat nous pousse à réfléchir aux cercles les plus larges de la réflexion morale.

Les enjeux soulevés par la question des effets des changements climatiques sur la biodiversité sont donc nombreux et variés. Certains ont une portée planétaire alors que d'autres ne touchent qu'à des questions locales. Tous appellent cependant à une meilleure compréhension des façons dont le changement du climat affecte les espèces et les écosystèmes, la partie vivante de notre patrimoine naturel.



P A R T I E

LE CADRE GÉNÉRAL

*Ce qui compte ne peut pas toujours être compté
et ce qui peut être compté ne compte pas forcément.*

Albert Einstein

C H A P I T R E

LA BIODIVERSITÉ DU QUÉBEC

Dominique Berteaux, Nicolas Casajus et Sylvie de Blois

À RETENIR

- Plusieurs millions d'espèces vivent sur la Terre et leur inventaire est fort incomplet. Soixante mille d'entre elles sont présentes au Québec, dont très peu d'endémiques.
- La biodiversité du Québec est caractérisée par sa nordicité et sa grande structuration latitudinale. Des régions écologiques distinctes se succèdent et le nombre d'espèces décroît quand on progresse vers le nord.
- Les histoires géologique, climatique et humaine du Québec ont beaucoup influencé sa biodiversité. Ce ne sont pas les écosystèmes, mais les espèces qui ont migré vers le nord à la fin de la dernière glaciation, constituant ainsi de nouvelles communautés.
- Le concept de niche écologique, qui représente l'ensemble des conditions nécessaires à la survie d'une espèce, est fondamental en écologie. La niche d'une espèce influence fortement sa répartition géographique.
- La biodiversité est importante pour les humains, ce qui a fait naître la notion de services écologiques.
- Au niveau mondial, la dynamique actuelle de la biodiversité est inquiétante, car nous provoquons peut-être la sixième crise majeure d'extinction connue sur Terre.
- Au Québec, très peu d'espèces représentent une biomasse supérieure à celle de l'espèce humaine. Cette simple considération nous aide à comprendre que nous avons une influence considérable sur les écosystèmes qui nous entourent.
- De nombreuses lois québécoises et canadiennes tentent de protéger la biodiversité. La question de la biodiversité comporte des enjeux scientifiques, économiques, politiques et moraux.

INTRODUCTION

La plus grande originalité de la planète Terre, c'est la vie. Quant à la plus grande originalité de la vie, c'est certainement sa diversité. Ainsi, la diversité biologique, ou biodiversité, est un sujet d'étude majeur pour les biologistes. Mais c'est aussi depuis 30 ans un sujet croissant de discussion chez les économistes, les sociologues, les forestiers, les agriculteurs, les citoyens en général et donc les politiciens.

La Convention sur la diversité biologique adoptée au Sommet de la Terre de Rio en 1992 définit la biodiversité comme « la variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres systèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre les espèces ainsi que celle des écosystèmes » (Nations Unies, 1992, p. 3). On reconnaît donc facilement trois niveaux de biodiversité :

- » la diversité génétique, qui correspond à la variabilité des gènes au sein d'une espèce ou population;
- » la diversité des espèces, souvent utilisée à tort comme synonyme de la biodiversité;
- » la diversité des écosystèmes.

On peut aussi ajouter la diversité des paysages et celle des groupes fonctionnels, c'est-à-dire les groupes d'espèces ayant un rôle ou une réponse similaire vis-à-vis d'un processus écologique. Toute cette diversité est le fruit de l'évolution des espèces et de leurs interactions avec l'environnement.

Dans ce chapitre, nous faisons un rapide tour d'horizon de la biodiversité mondiale et québécoise et de leurs principales caractéristiques. Nous mettons

l'accent sur la diversité des espèces, car c'est la plus étudiée dans le contexte des changements climatiques. Nous introduisons ensuite quelques concepts clés permettant de comprendre l'origine et l'organisation de la biodiversité du Québec. Enfin, nous résumons les changements qui affectent actuellement la biodiversité du Québec et les stratégies de conservation qui en émergent.

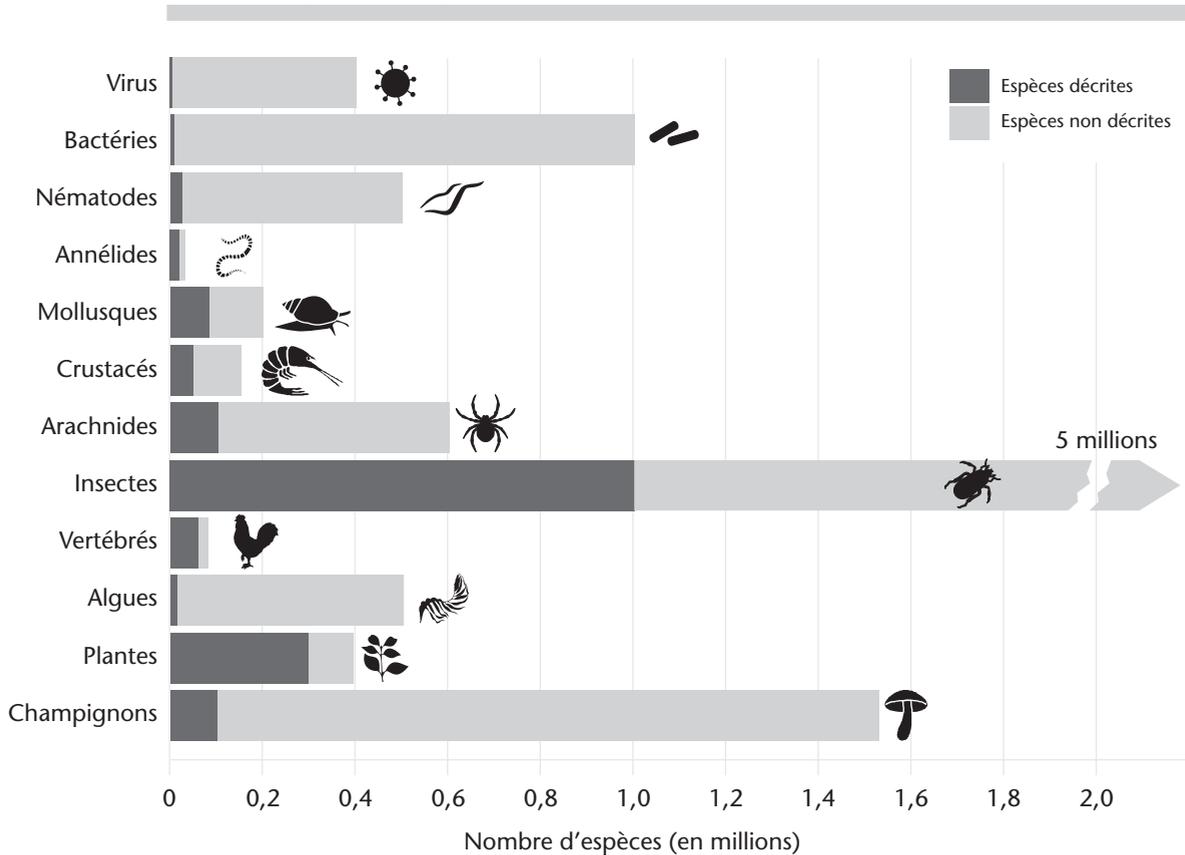
1. UNE DESCRIPTION DE LA BIODIVERSITÉ

1.1. Le catalogue de la biodiversité

Le catalogue planétaire

Environ 1,8 million d'espèces vivantes ont été décrites (UICN, 2011a) (figure 1.1). Cependant, 2 à 50 millions d'espèces pourraient exister (Scheffers *et al.*, 2012). Une énorme incertitude subsiste quant au nombre d'insectes, champignons, nématodes et organismes des grandes profondeurs océaniques.

Figure 1.1. Nombre d'espèces sur la planète Terre



Source : Chapman (2009), adaptée de Hammond (1992).

Les invertébrés représentent 75 % de toutes les espèces décrites, avec une nette dominance des insectes. Les vertébrés, groupe le mieux connu, ne représentent que 3,5 % des espèces décrites. La plupart des vertébrés sont des poissons (32 100 espèces) alors qu'il existe environ 10 000 espèces de reptiles, autant d'oiseaux, près de 7 000 espèces d'amphibiens et 5 500 espèces de mammifères (UICN, 2011a).

Les angiospermes (plantes à fleurs) forment le groupe d'espèces végétales décrites le plus diversifié (268 000 espèces), ce qui correspond à environ 85 % de tous les végétaux décrits et à 15 % de l'ensemble des espèces décrites. Les bryophytes (mousses et hépatiques), ptéridophytes (prêles, fougères et lycopes), gymnospermes, algues vertes

et algues rouges se partagent assez équitablement les 15 % des espèces végétales restantes (Scheffers *et al.*, 2012 et références citées). Un peu plus de 31 000 espèces de champignons ont été décrites et on recense actuellement plus de 17 000 espèces de lichens.

Le nombre d'espèces décrites varie suivant les auteurs, car certaines espèces ont été décrites plusieurs fois et ont ainsi des appellations synonymes (Scheffers *et al.*, 2012). Le nombre d'espèces estimées varie quant à lui selon la méthode d'estimation. La description quantitative de la biodiversité est donc loin d'être achevée.

Ajoutons que les efforts des taxonomistes sont à peu près également répartis entre les vertébrés, les plantes et les invertébrés. Pourtant, il y a dix fois

plus de plantes connues (et 100 fois plus d'invertébrés) qu'il n'y a de vertébrés. D'après Carbayo et Marques (2011), la description des espèces animales inconnues coûterait plus de 250 milliards de dollars et prendrait des siècles (voir cependant la vision plus optimiste de Costello *et al.*, 2013). Quant aux virus, bactéries et autres microorganismes, il est probable que la notion d'espèce ne leur soit pas toujours applicable et leur diversité nous est pratiquement inconnue.

Deux messages importants émergent de ce résumé. Les formes de vie sur Terre sont incroyablement diversifiées. Notre inventaire de la diversité biologique est très incomplet.

Le catalogue québécois

La liste des espèces inventoriées au Québec est longue (environ 60 000 espèces), mais la biodiversité du Québec ne représente qu'un faible échantillon de la biodiversité planétaire, 2 à 3 % tout au plus (tableau 1.1). D'autre part, peu d'espèces sont endémiques au Québec. En comparaison, la Californie contient deux fois plus de plantes vasculaires et de vertébrés et son taux d'endémisme est environ 40 fois plus grand, alors qu'elle est quatre fois plus petite que le Québec (Tardif *et al.*, 2005). Nous verrons à la section 2 de ce chapitre pourquoi la richesse spécifique du Québec est comparativement si faible.

Des pans entiers de la biodiversité québécoise n'ont pas encore été inventoriés, ce qui explique les nombreux points d'interrogation qui apparaissent au tableau 1.1. La communauté scientifique mondiale s'inquiète depuis des décennies du faible nombre de taxonomistes et le Québec n'échappe pas à cette pénurie. Malheureusement, aucune synthèse complète de l'état et des tendances de la biodiversité du Québec n'est disponible.

La caractéristique principale de la biodiversité du Québec est probablement sa nordicité. Toutes les espèces sont capables de composer avec une forte saisonnalité et une longue période froide, certaines en migrant vers le sud pour échapper à l'hiver, les autres en résistant aux basses températures de façons fort variées. Cette nordicité de la biodiversité québécoise a de nombreux corollaires,

comme la dominance des forêts résineuses sur une grande partie du territoire ou la faible diversité de certains groupes comme les amphibiens et les reptiles. Nous verrons dans ce livre qu'elle a également une très forte incidence quant aux effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec.

Un catalogue à entrées multiples

Le catalogue des espèces n'est qu'une étape dans l'analyse de la biodiversité. Il faudrait le compléter par le catalogue des autres niveaux d'organisation biologique comme les gènes et les écosystèmes. De plus, à la diversité taxonomique s'ajoute une importante diversité fonctionnelle; toutes les espèces n'ont pas les mêmes rôles (ou fonctions) dans leur environnement.

Les groupes fonctionnels sont des groupes d'espèces qui, sans être forcément proches taxonomiquement, présentent les mêmes réponses à l'environnement (résistance aux perturbations, tolérance aux variations des conditions abiotiques, etc.) ou ont des effets similaires sur les principaux processus écosystémiques (fixation d'azote, décomposition, pollinisation, filtration de l'eau, etc.). Parfois, on définit plutôt les groupes fonctionnels selon les traits que les espèces ont en commun (capacité de dispersion, taille des feuilles, longueur des racines, etc.).

Dans tous les cas, la diversité fonctionnelle est un élément très important de la biodiversité, car sa diminution a un grand impact sur le fonctionnement des écosystèmes. En somme, la diversité fonctionnelle constitue le lien entre la diversité des espèces et le fonctionnement des écosystèmes.

Des notions plus anciennes, mais toujours utilisées sont utiles à rappeler ici. Par exemple, les espèces communes sont caractérisées par une très importante biomasse. Si elles ont en plus une influence considérable sur la structure et le fonctionnement d'un écosystème, on dit qu'elles sont dominantes. Certaines espèces représentent une faible biomasse, mais leur disparition aurait de nombreuses conséquences écologiques: ce sont les espèces clés.

Tableau 1.1. Nombre approximatif d'espèces décrites dans le monde et au Québec pour certains groupes taxonomiques

Groupe taxonomique	Monde	Québec	%
Algues brunes	3 127	?	?
Champignons	31 496	2 500	7,9
Lichens	17 000	?	?
Bryophytes (mousses et hépatiques)	16 236	847	5,2
Algues rouges	6 144	?	?
Algues vertes	4 242	?	?
Ptéridophytes (fougères et lycopodes)	12 000	108	0,9
Gymnospermes (conifères)	1 052	15	1,4
Angiospermes (plantes à fleurs)	268 000	2 709	1,0
Mollusques	85 000	?	?
Crustacés	47 000	?	?
Arachnides	102 248	670	0,7
Insectes	1 000 000	25 000	2,5
Odonates	5 000	139	2,8
Coléoptères	400 000	3 800	1,0
Lépidoptères	174 250	2 960	1,7
Fourmis	12 000	100	0,8
Autres	408 750	18 000	4,4
Poissons	32 100	203	0,6
Amphibiens	6 771	21	0,3
Reptiles	9 439	17	0,2
Oiseaux	10 052	319	3,2
Mammifères	5 499	94	1,7

Les points d'interrogation indiquent des quantités inconnues pour la science ou non localisées lors de nos recherches.

Sources : Les données sur la biodiversité mondiale viennent de l'UICN (2011a). Les données sur la biodiversité québécoise viennent de McNeil, 2006 (champignons); Faubert *et al.*, 2010 (bryophytes); frère Marie-Victorin *et al.*, 2002 (plantes autres que bryophytes); Hutchinson, 2003 (arachnides); Leboeuf *et al.*, 2010 (insectes); Pilon et Lagacé, 1998 (odonates); Handfield, 2011 (lépidoptères); Francoeur *et al.*, 2010 (fourmis); ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (<<http://www.mddefp.gouv.qc.ca/faune/vertebree/index.asp>>) (poissons); Desroches et Rodrigue, 2004 (amphibiens et reptiles); Regroupement QuébecOiseaux (<<http://www.quebecoiseaux.org/files/ListeOiseauxQC.pdf>>, consulté le 6 septembre 2013) (oiseaux) et Prescott et Richard, 2004 (mammifères).

Les espèces rares sont quant à elles représentées par peu d'individus. À l'inverse des espèces clés, leur présence a souvent peu de répercussions sur l'ensemble de l'écosystème (notons que la plupart des espèces qui sont rares au Québec sont fréquentes ailleurs). On pourrait se demander pourquoi d'importants efforts de conservation leur sont consacrés. D'une part, cette protection entraîne souvent celle d'habitats et d'écosystèmes résiduels, singuliers ou peu répandus (Labrecque et Lavoie, 2002). D'autre part, la singularité génétique de chaque espèce est précieuse et constitue un héritage biologique dont la valeur pratique peut se révéler plus tard. Enfin, la diversité biologique qui nous entoure est une source inépuisable de découvertes et d'émerveillements qui enrichissent la vie des humains.

1.2. La répartition des espèces

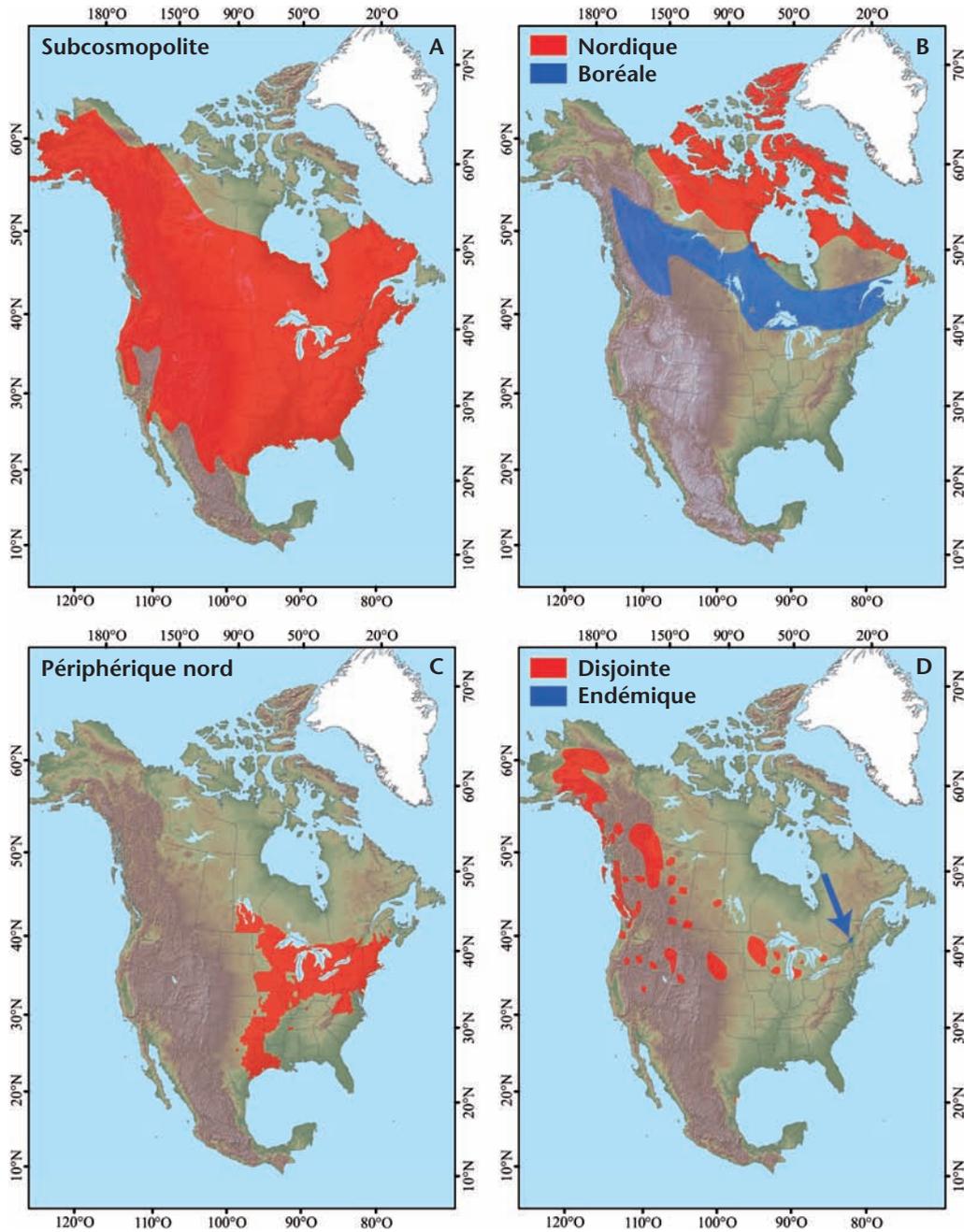
Chaque espèce a une répartition qui lui est propre, mais on peut assez facilement reconnaître quelques grands types de répartition. La superposition sur une carte des répartitions de toutes les espèces crée des gradients géographiques de biodiversité et permet de tracer les contours de régions dont la biodiversité est relativement homogène par rapport aux régions voisines. Il est indispensable, pour analyser plus tard les effets des changements climatiques, de bien comprendre les niveaux d'analyse de la biodiversité associés aux types de répartition, aux gradients de biodiversité et aux régions écologiques. Commençons par les types de répartition.

Pour qu'une espèce puisse survivre et se reproduire dans un habitat ou une région particulière, il faut que les caractéristiques des individus qui la composent (leur morphologie, leur physiologie, etc.) soient en bonne adéquation avec les conditions locales (température, type de sols, prédateurs présents, etc.). Cependant, la connaissance parfaite des caractéristiques d'une espèce et des attributs d'un milieu n'est pas suffisante pour prédire la présence et l'abondance de cette espèce dans ce milieu. De nombreux événements, parfois inconnus, ont en effet façonné la répartition des espèces. La

dérive des continents, la présence historique de glaciers, l'activité humaine et les hasards démographiques sont quelques exemples de tels événements passés. Il est donc rarement possible d'expliquer parfaitement une répartition observée. On reconnaît au Québec six grands types de répartition (figure 1.2), qui résultent chacun d'une combinaison particulière d'adaptations biologiques et d'événements historiques.

- » Les espèces subcosmopolites (figure 1.2A) ont une aire de répartition très étendue qui recouvre une grande partie du Québec, parfois l'ensemble de l'Amérique du Nord. Ces espèces tolèrent des conditions environnementales variées et ont souvent une bonne capacité de dispersion. Exemples : castor du Canada (représenté sur la figure), crapaud d'Amérique, écu-reuil roux d'Amérique, junco ardoisé.
- » Les espèces nordiques (figure 1.2B) ne sont présentes que dans l'extrême nord du Canada. Elles sont adaptées à des conditions climatiques froides rigoureuses. Exemples : lièvre arctique (représenté sur la figure), bœuf musqué, dryade arctique, cassiope tétragone, plectropane des neiges.
- » Les espèces boréales (figure 1.2B) se retrouvent principalement dans la forêt coniférienne. Exemples : roitelet à couronne dorée (répartition en période de nidification représentée sur la figure), épinette noire, sapin baumier, martre d'Amérique, caribou des bois de l'éco-type forestier.
- » Les espèces périphériques nord (figure 1.2C) sont très nombreuses au Québec. La majeure partie de leur répartition se trouve aux États-Unis, mais la limite nord de cette répartition s'étend jusqu'au sud du Québec. Exemples : rainette versicolore (représentée sur la figure), chêne blanc, renoncule à éventails, couleuvre tachetée, tohi à flancs roux.
- » Les espèces à répartition disjointe ont une ou plusieurs aires isolées très distantes de leur aire principale (figure 1.2D). Le cas apparenté des espèces sporadiques désigne celles dont la répartition est vaste, mais très discontinue.

Figure 1.2. Exemples de types de répartition géographique



Certaines dénominations (C et D) ne sont valides qu'à l'échelle du Québec. Les espèces dont les répartitions sont représentées sont indiquées dans le texte.

Exemples: cygne trompette (représenté sur la figure), nicheur en de très rares sites de l'ouest du Québec, valériane des tourbières, cyripède tête-de-bélier, polémoine de van-Brunt.

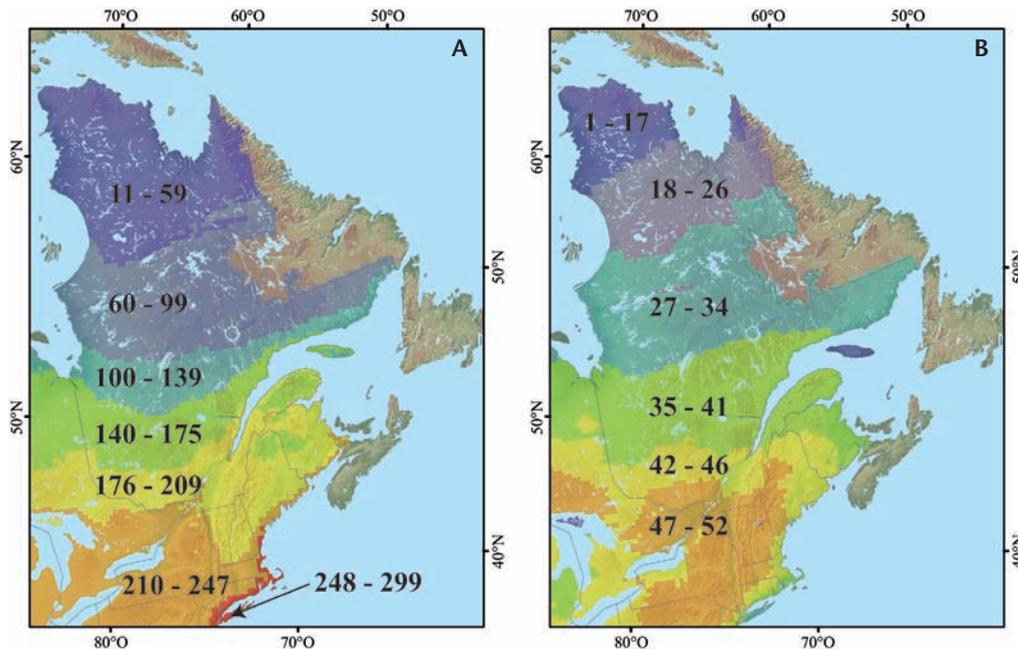
- » Enfin, les espèces endémiques (figure 1.2D) au Québec ne se retrouvent nulle part ailleurs. Exemples: chevalier cuivré (représenté sur la figure) dans la rivière Richelieu, saxifrage de Gaspésie dans les Appalaches, saule à bractées vertes dans le golfe du Saint-Laurent.

Cette classification des aires de répartition est précieuse, car elle rassemble des espèces qui n'ont pas forcément de lien taxonomique entre elles. Dans l'étude des effets des changements climatiques, elle servira à regrouper des espèces auxquelles s'appliquent des méthodes d'analyse communes, ou bien à réunir des espèces dont la réponse aux changements climatiques est semblable.

1.3. Les gradients de biodiversité

Une caractéristique remarquable de la biodiversité du Québec est sa claire structuration latitudinale, comme l'illustre la cartographie de la richesse spécifique des oiseaux et mammifères (figure 1.3). Pour chacun de ces deux groupes, le nombre d'espèces est environ cinq fois plus élevé au sud qu'au nord du Québec. Cette diminution latitudinale du nombre d'espèces s'observe pour presque tous les autres groupes taxonomiques. On la constate aussi à des échelles géographiques plus vastes. Ainsi, le nombre d'espèces au Québec est largement inférieur à celui de la Caroline du Sud. Comme nous le verrons dans le troisième chapitre consacré aux liens entre la biodiversité et le climat, cette structuration latitudinale de la biodiversité reflète celle des températures moyennes.

Figure 1.3. Gradients de richesse spécifique des oiseaux et des mammifères



A = oiseaux, B = mammifères. Les gradients sont exprimés en nombre d'espèces.

Sources: Les données sur les oiseaux viennent de Ridgely *et al.* (2007) et celles sur les mammifères de Patterson *et al.* (2007). Ces données géomatiques sont disponibles au <<http://www.natureserve.org/getData/index.jsp>> (consulté le 10 septembre 2013).

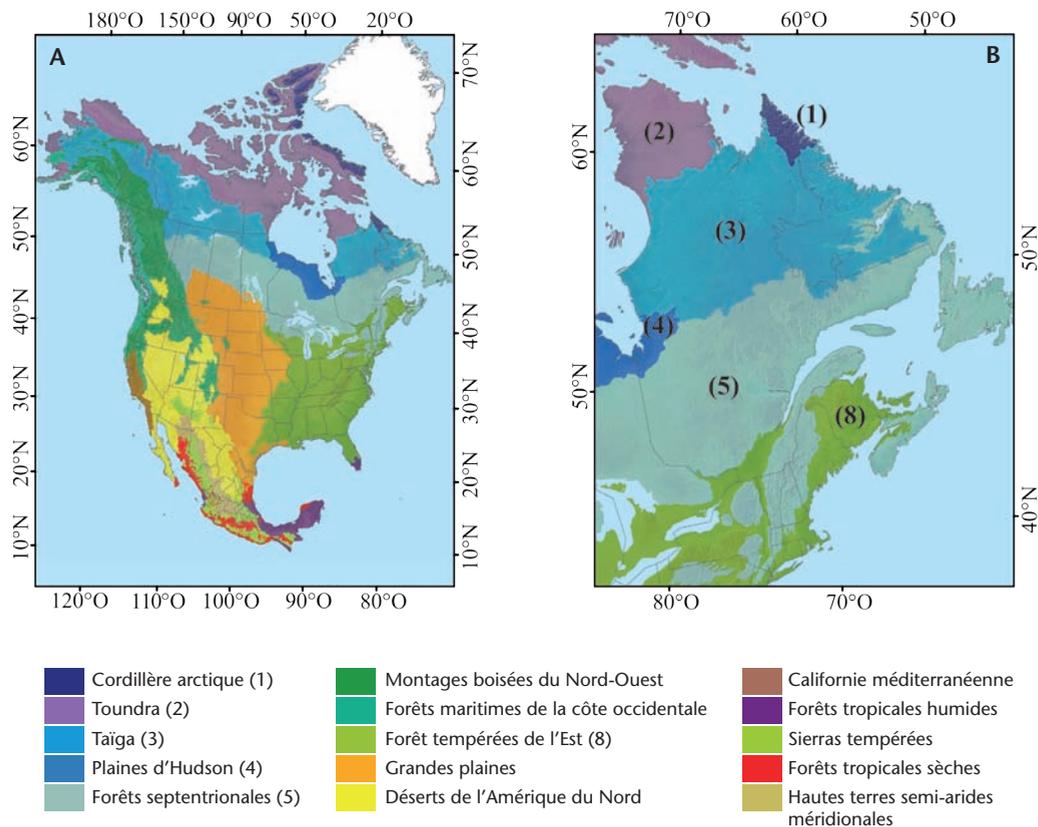
1.4. Les régions écologiques

La concordance manifeste entre la biodiversité et le climat, ainsi que la présence de grandes transitions écologiques faciles à déceler sur le terrain (par exemple, la transition entre les forêts feuillues et conifériennes), a amené depuis longtemps les naturalistes à découper le territoire en unités distinctes. De nombreux découpages existent : biomes, écozones, domaines bioclimatiques, provinces et régions naturelles, etc. Chaque découpage s'appuie sur des critères qui lui sont propres, est adapté à une échelle spatiale particulière ou vise un objectif bien défini. Un de ces découpages est celui des régions écologiques, ou écorégions.

Les écorégions sont caractérisées par leurs fortes homogénéités géologique, hydrographique, édaphique, faunique et florale. Ce système de classification comprend quatre niveaux de découpage, le niveau I étant le plus général. Ainsi, l'Amérique du Nord abrite 15 écorégions de niveau I, dont six se retrouvent au Québec : la cordillère arctique, la toundra, la taïga, les plaines d'Hudson, les forêts septentrionales et les forêts tempérées de l'Est (figure 1.4).

La toundra, qui recouvre 12 % du Québec, est la plus vaste des deux écorégions arctiques de niveau I (l'autre, la cordillère arctique, couvre moins de 1 % du territoire). Le pergélisol, qui désigne un sol dont la température se maintient en dessous de 0 °C pendant au moins deux années consécutives,

Figure 1.4. Écorégions de niveau I en Amérique du Nord et au Québec



Source : Adaptée de Commission de coopération environnementale – CCE (1997).

peut y atteindre plusieurs centaines de mètres de profondeur. La végétation est caractérisée par des arbustes nains (épinettes rabougries, bouleaux nains, etc.), des lichens et des éricacées. Le nombre d'espèces y est très faible.

La taïga recouvre 36 % du Québec et englobe une grande partie de la forêt boréale. Elle repose sur le Bouclier canadien, où la roche affleure souvent à la suite de l'érosion massive de la dernière glaciation. Cette région comporte des milliers de lacs et de milieux humides, ainsi que de nombreuses tourbières. Le pergélisol y est répandu. Les forêts, essentiellement composées d'épinettes blanches et noires, de peupliers baumiers et faux-trembles, de pins gris et de bouleaux à papier, s'éclaircissent au fur et à mesure que l'on progresse vers le nord.

Les plaines d'Hudson sont peu représentées au Québec (3 % du territoire) et sont recouvertes à 90 % de milieux humides. L'écorégion des forêts septentrionales recouvre quant à elle presque toute la moitié sud du Québec (47 % du territoire) et se distingue par ses vastes étendues de forêts boréales et un important réseau de lacs et de rivières. Cette écorégion est composée à 80 % de peuplements conifériens (épinettes blanches, épinettes noires, pins gris, sapins baumiers et mélèzes laricins), bien que sa partie sud présente de plus grandes étendues de feuillus (bouleaux à papier, peupliers, hêtres, etc.).

Enfin, la région écologique des forêts tempérées de l'Est, localisée aux basses terres du Saint-Laurent, ne représente que 2 % de la superficie du Québec. Le relief y est assez peu marqué, bien que ponctué par les collines montérégiennes. Cette écorégion est caractérisée à son état naturel par un vaste couvert forestier composé essentiellement de feuillus et de résineux. Elle présente la plus grande diversité d'espèces et de milieux du Québec. C'est aussi celle où résident la plupart des Québécois, où se sont le plus développées l'agriculture, l'industrie, l'urbanisation et les infrastructures de transport, et où l'occupation des sols a donc le plus changé.

Il existe aussi une classification des écorégions marines, de même qu'une classification des écorégions d'eau douce, bien que les catégories soient

alors moins nombreuses que pour les écorégions terrestres. Les écorégions marines et d'eau douce ne sont toutefois pas décrites, car nous nous concentrons dans ce livre sur les espèces terrestres.

2. UNE EXPLICATION DE LA BIODIVERSITÉ

Une bonne compréhension de ce qui a forgé la biodiversité actuelle est essentielle pour penser à ce qui la modifiera demain. Pour cela, deux approches sont nécessaires : une approche historique qui relate les événements marquants du passé et une approche écologique qui résume les grandes lois gouvernant l'écologie des espèces.

2.1. Un regard nécessaire vers le passé

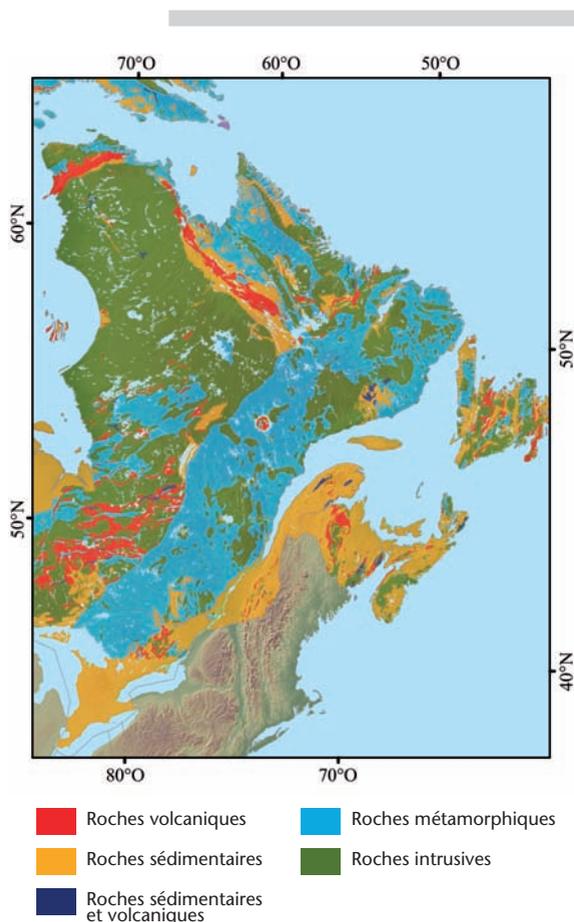
Chaque espèce a un long passé évolutif qui explique sa taille, sa forme et ses ressemblances avec d'autres espèces. L'évolution biologique fournit ainsi les éléments de base à partir desquels se constitue la biodiversité d'un territoire. La biodiversité du Québec est un sous-échantillon de la biodiversité mondiale, résultat du « tri sélectif » qu'ont opéré sur le territoire du Québec ses histoires géologique, climatique et humaine, ainsi que les multiples interactions entre espèces.

L'histoire géologique

Le substrat rocheux du Québec a été façonné par de nombreux événements comme des collisions de plaques tectoniques, des impacts de météorites, des périodes de sédimentation et des phases d'érosion. La composition chimique et la structure physique du socle rocheux québécois sont donc très variées (figure 1.5). Trois grandes régions géologiques sont reconnues : le Bouclier canadien (95 % du Québec), les Appalaches (à la frontière sud-est du Québec) et les basses terres du Saint-Laurent (moins de 20 000 km²) (Musée Redpath, 1999).

La dégradation superficielle du socle rocheux forme les sols. Chaque sol est constitué d'une fraction minérale (résultat direct de la dégradation de la roche) et d'une fraction organique (provenant de la décomposition et du métabolisme des êtres vivants). La chimie et la granulométrie des sols du Québec sont également très diversifiées. Le Bouclier canadien, qui a été façonné par les glaciers, l'eau de mer et les lacs postglaciaires, comporte de nombreux dépôts de blocs rocheux, de gravier et de sable, ainsi que d'épais dépôts argileux. Les Appalaches sont constituées de roches sédimentaires et les basses terres du Saint-Laurent sont caractérisées par des terres très fertiles.

Figure 1.5. Principaux substrats rocheux de l'est du Canada



Source : Adaptée de Commission géologique du Canada (1981).

La nature des sols influence considérablement quelles espèces, surtout parmi les plantes et les microorganismes, sont présentes en un lieu donné. Ainsi, les plantes calcicoles ont une forte affinité pour les sols calcaires (par exemple, l'anémone riparia) alors que les calcifuges colonisent des sols plus acides, souvent composés de roches siliceuses. La serpentine, riche en magnésium, favorise quant à elle la présence de plantes particulières comme la minuartie de la serpentine. L'histoire géologique d'un territoire influence donc sa biodiversité.

L'histoire climatique

Le Québec a connu plusieurs périodes glaciaires. L'apogée de la plus récente remonte à 20 000 ans. Le territoire était alors complètement recouvert de glace et ne comportait ni flore ni faune. La fonte de la calotte glaciaire, amorcée il y a 12 000 ans (marquant ainsi le début de la période de l'Holocène), a peu à peu libéré le territoire, permettant à certaines espèces réfugiées au-delà de la zone glaciaire de coloniser le Québec. Au fur et à mesure de la fonte (terminée depuis environ 6 000 ans), la biodiversité du Québec moderne s'est constituée.

Cette colonisation postglaciaire du Québec, connue grâce aux études paléoécologiques, est riche en enseignements. D'abord, elle démontre que les espèces ajustent leur répartition en fonction des variations climatiques. Plus il fait chaud, plus elles se déplacent vers les pôles. Ensuite, elle donne une indication du rythme auquel cette migration naturelle des espèces peut avoir lieu : environ 50 kilomètres par siècle pour les arbres (Iverson *et al.*, 2004 ; Malmshemer *et al.*, 2008). Enfin, et c'est l'enseignement le plus important, les espèces ne migrent pas en bloc. Il n'y a pas eu de remontée vers le nord des écosystèmes. Chaque espèce a plutôt migré individuellement, à son rythme, selon ses capacités de dispersion et la disponibilité des habitats. Des communautés et des écosystèmes nouveaux se sont ainsi constitués, des processus écologiques nouveaux sont apparus, au fil des nouvelles associations d'espèces qui s'établissaient.

L'histoire humaine

Comme beaucoup d'autres, notre espèce est arrivée peu après la déglaciation sur le territoire qui constitue aujourd'hui le Québec. Durant des milliers d'années, les humains ont chassé et pêché (caribous, mastodontes, mammifères marins, poissons), cueilli, mais aussi cultivé des plantes importées du sud (citrouille, maïs, haricots) ou trouvées localement.

Entre les années 1600 et 1800, la colonisation européenne marque l'exploitation à plus grande échelle de la biodiversité (Simard *et al.*, 2010). La chasse aux mammifères marins, le piégeage d'animaux à fourrure et la pêche à la morue soutiennent le développement économique européen. De grandes populations animales sont affaiblies par la chasse excessive, comme celles du grand pingouin et de l'eider du Labrador (disparus officiellement en 1844 et 1875). Les aires de répartition du morse et de la baleine noire se contractent considérablement. De nombreuses espèces sont introduites, volontairement ou non, comme le pissenlit, le plantain majeur, le pigeon biset, l'abeille domestique, la mouche domestique et certains lombrics.

La période 1800-1930 marque le début de l'industrialisation et l'intensification de l'exploitation des ressources naturelles (Simard *et al.*, 2010). L'agriculture et la foresterie se développent, des barrages sont construits sur les rivières. L'empreinte écologique humaine devient beaucoup plus importante, car des habitats sont transformés, ce qui favorise certaines espèces (ours noir, orignal, cerf de Virginie, gélinotte huppée), mais en défavorise d'autres (caribou, carcajou, saumon de l'Atlantique). Des espèces disparaissent (tourte migratrice en 1914, patelle des zostères en 1929) et les introductions se poursuivent (salicaire pourpre en 1830, spongieuse en 1875, moineau domestique et étourneau sansonnet en 1890, truite arc-en-ciel en 1893, carpe allemande en 1908) (Simard *et al.*, 2010).

Depuis 1930, des modifications majeures des habitats ont lieu dans le sud du Québec. Les développements agricole, forestier, industriel, urbain, hydroélectrique et routier changent l'utilisation des sols sur de grandes superficies, souvent aux endroits

où la biodiversité était la plus grande. Le sort de nouvelles espèces devient préoccupant alors que les introductions d'espèces exotiques se poursuivent. L'ère de la mondialisation débute, les navires et les avions qui parcourent le globe accélèrent le brassage des espèces. Il y a ainsi eu au Québec 43 introductions de ravageurs forestiers exotiques depuis 1882 (Turbis *et al.*, 2010), alors que près de 900 espèces de plantes vasculaires exotiques se sont naturalisées depuis 1600 (Lavoie, 2012).

Aujourd'hui 8 millions d'humains habitent le Québec (c'est neuf fois plus qu'en 1850 et deux fois plus qu'en 1950), ce qui représente une biomasse d'environ 600 000 tonnes, dépassée par très peu d'autres espèces. L'influence des humains sur la biodiversité du Québec est devenue majeure. C'est particulièrement le cas dans l'extrême sud de la province et le long du Saint-Laurent, où vivent 80 % des Québécois.

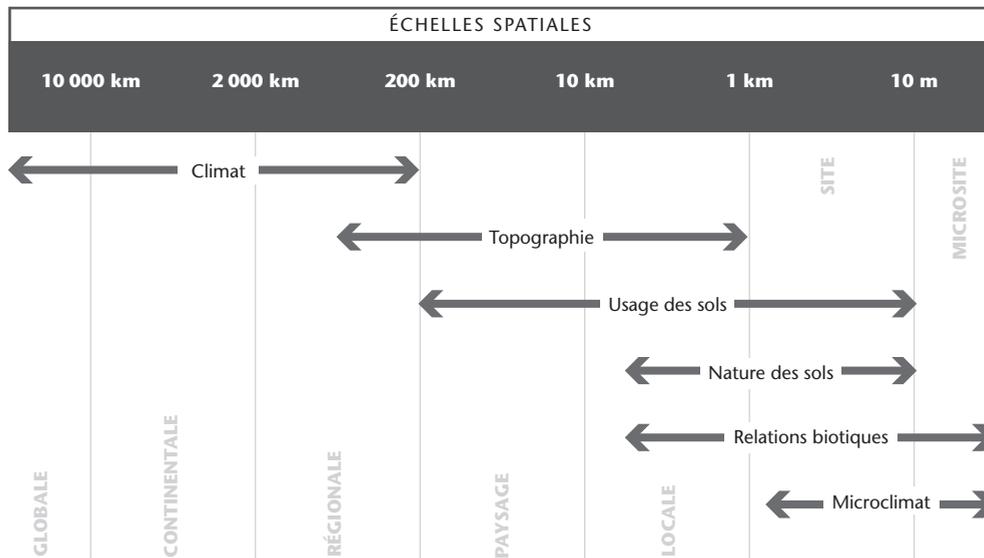
2.2.

La hiérarchie des facteurs écologiques

La géologie, le climat et les humains continuent d'influencer la biodiversité du Québec à travers d'innombrables facteurs écologiques tels que la nature des sols et l'usage que nous en faisons, la température et l'humidité de l'air. Chaque espèce interagit aussi avec d'autres espèces qui influencent sa répartition par compétition, prédation, facilitation, mutualisme, etc. Ces facteurs écologiques n'agissent pas tous à la même échelle (figure 1.6). Le climat est le principal facteur de contrôle à large échelle spatiale. Par exemple, la limite nordique de nombreuses espèces est directement déterminée par la température.

À une échelle plus régionale ou à celle du paysage, la topographie joue un rôle important. Ainsi l'altitude et l'exposition des versants offrent des conditions variées. À l'échelle locale et à celles du site et du microsite, la nature des sols, les interactions biotiques et le microclimat ont un effet prédominant sur la présence des espèces.

Figure 1.6. Échelles spatiales d'influence de certains facteurs écologiques



Source : Adaptée de Pearson et Dawson (2003).

Cette hiérarchie des facteurs écologiques est très importante pour les biologistes. Lorsque l'on tente d'expliquer la répartition d'une espèce, les facteurs que l'on mesure doivent en effet bien correspondre à l'échelle spatiale pour laquelle on veut expliquer cette répartition.

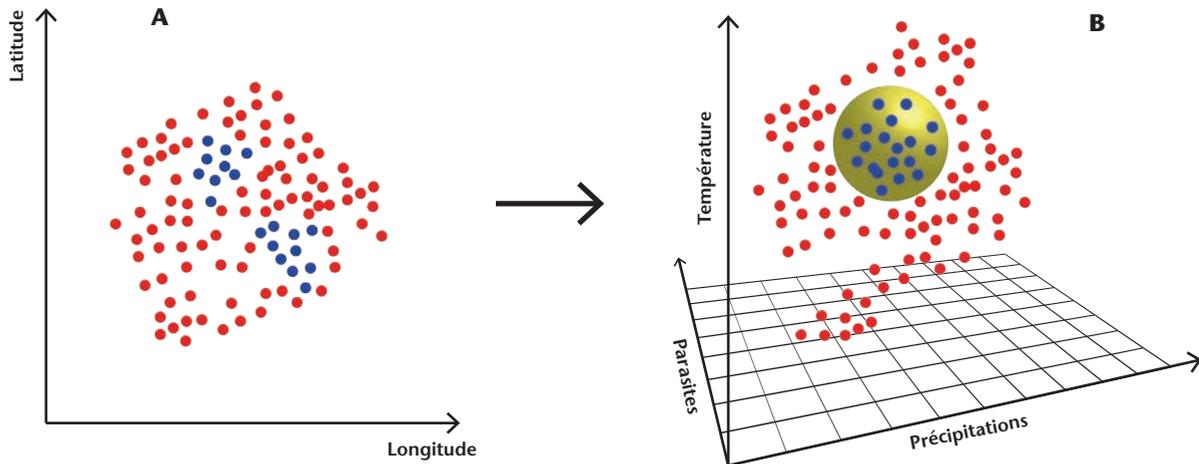
2.3. Le concept fondamental de niche écologique

Le concept de niche écologique est central en écologie et dans tout cet ouvrage. On distingue deux variantes. La niche écologique fondamentale correspond à l'ensemble des ressources et conditions environnementales nécessaires à l'existence d'une espèce, mais ne considère pas les interactions avec d'autres organismes (comme la compétition). La niche écologique réalisée est une portion de la niche fondamentale à laquelle l'espèce est restreinte par les interactions biotiques et par ses capacités de dispersion.

En général, un échantillonnage de terrain (figure 1.7) ne permet de décrire que la niche réalisée d'une espèce, puisque sa présence aux sites d'étude est contrainte à la fois par les conditions environnementales et par les interactions biotiques. Notons finalement que l'on parle de niche climatique (ou enveloppe climatique) quand la niche écologique d'une espèce est décrite seulement en fonction de variables climatiques.

La niche écologique d'une espèce détermine sa répartition géographique. Cependant, une espèce n'occupe pas souvent tout l'espace qu'il lui serait possible d'occuper d'après les paramètres de sa niche. On distingue donc la répartition géographique réelle de l'espèce de sa répartition géographique potentielle. La répartition géographique réelle est souvent plus restreinte que la répartition potentielle, car des compétiteurs ou des barrières géographiques infranchissables empêchent l'espèce d'occuper tous les lieux où sa survie serait possible. Parfois, comme dans le cas des espèces nouvellement introduites, un laps de temps trop court a été disponible pour que l'espèce colonise l'ensemble de son aire favorable.

Figure 1.7. Illustration de la niche écologique d'une espèce



Dans cet exemple, la présence de l'espèce a été vérifiée à 100 sites (A). Les 25 présences sont notées en bleu et les 75 absences en rouge. La température, l'humidité et l'abondance d'un parasite ont également été notées à chacun des 100 sites, ce qui permet de délimiter la niche de l'espèce (représentée ici par une sphère) selon trois dimensions environnementales (B).

3. LA GESTION ET LA CONSERVATION DE LA BIODIVERSITÉ

3.1. À quoi sert la biodiversité ?

Les systèmes vivants nous rendent des services indispensables. Cette reconnaissance a mené à l'émergence d'un nouveau paradigme, celui des services écologiques (ou services écosystémiques). Ceux-ci ont été classés à diverses reprises (Limoges, 2009), notamment lors de l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire commandée par le Secrétaire général des Nations Unies (MEA, 2005). On reconnaît jusqu'à 40 types de services écologiques, que l'on peut regrouper en cinq catégories :

- » Les services de soutien maintiennent des conditions favorables à la vie sur Terre. Cela inclut de multiples processus comme le cycle des éléments nutritifs, le cycle du carbone, la production primaire, le recyclage de la nécromasse, la pollinisation, la filtration de l'eau et la formation des sols.
- » Les services de régulation contrôlent et modèrent le fonctionnement des écosystèmes. Ils comprennent par exemple la régulation du climat, la réduction des maladies ou des déprédateurs, le contrôle de l'érosion et des inondations.
- » Les services d'approvisionnement nous fournissent des biens matériels comme des aliments, tissus, médicaments, matériaux de construction, combustibles, ressources génétiques.
- » Les services socioculturels nous procurent quant à eux des bénéfices non matériels, tels que l'enrichissement spirituel, des expériences esthétiques ou du divertissement.

- » Enfin, les services ontogéniques contribuent au développement de l'individu, par exemple au niveau immunitaire et cognitif ou à celui du sentiment d'appartenance.

En développant l'agriculture et l'élevage et en perfectionnant les méthodes de prélèvement des ressources naturelles (comme le bois et le poisson), les humains ont depuis des millénaires cherché à maximiser les services écologiques d'approvisionnement. Notre colonisation de l'ensemble de la planète et notre forte croissance démographique reflètent notre succès en ce domaine. Des pans entiers de la science, comme l'agronomie, les sciences vétérinaires, la bio-ingénierie, la foresterie et l'aquaculture, sont encore aujourd'hui consacrés à cette entreprise.

Cependant, notre capacité à maximiser les services écologiques d'approvisionnement nous a conduits à simplifier les écosystèmes en diminuant le nombre et l'abondance des génotypes, populations, espèces, types fonctionnels, communautés et unités paysagères. La biodiversité planétaire s'érode sous l'effet des pertes d'habitats, de la pollution, de la surexploitation et de l'introduction d'espèces dans de nouveaux milieux. Le rythme de disparition des espèces est 10 à 100 fois plus rapide que les taux naturels estimés pour le passé (MEA, 2005).

Ces changements de biodiversité ont souvent des effets négatifs sur les autres types de services écologiques. Par exemple, l'agriculture industrielle fournit des aliments à faibles coûts, mais réduit radicalement la biodiversité, ce qui entraîne une diminution de la pollinisation (service de soutien), une moindre capacité des écosystèmes à réguler le climat (service de régulation) et une perte esthétique dans le paysage (service socioculturel).

L'évaluation des écosystèmes pour le millénaire (MEA, 2005) a mis en évidence un important paradoxe. Depuis 50 ans, beaucoup de ressources biologiques ont diminué, de nombreux écosystèmes se sont dégradés et la plupart des services écologiques ont décliné. Pourtant, le bien-être humain (espérance de vie, niveau de vie, etc.) a globalement augmenté. Comment expliquer cette contradiction? Raudsepp-Hearne *et al.* (2010) ont proposé trois hypothèses. D'abord, le bien-être humain pourrait

surtout dépendre des services alimentaires fournis par les écosystèmes, qui sont en augmentation contrairement à la plupart des autres services écologiques. Ensuite, la technologie et les innovations pourraient nous rendre de plus en plus indépendants des services écologiques dont on constate la diminution. Enfin, il pourrait y avoir un délai entre la perte de biodiversité et ses conséquences sur le bien-être humain. Selon cette dernière hypothèse, nous serions actuellement dans une phase de développement non durable. Nous consommerions le capital écologique planétaire plus vite qu'il ne peut se renouveler, accumulant ainsi une importante dette écologique qui empêchera les générations futures d'accéder au même bien-être que les générations actuelles. La validité de ces trois hypothèses varie probablement d'un endroit à l'autre sur la planète.

Le besoin de comprendre la relation complexe qui existe entre la biodiversité et les services écologiques a récemment fait prendre à la science de l'écologie un essor considérable. Certains de ses constats les plus importants au sujet de la biodiversité sont les suivants (Díaz *et al.*, 2005; Cardinale *et al.*, 2012):

- » une plus grande biodiversité favorise la production et la décomposition de la biomasse, la capture, la rétention et le recyclage des nutriments, ainsi que la résistance aux invasions et maladies;
- » en plus de favoriser ces processus écologiques, une plus grande biodiversité les stabilise dans le temps;
- » c'est la multiplication des groupes fonctionnels qui procure à une augmentation de biodiversité son effet positif sur les processus écologiques;
- » une diminution de biodiversité peut avoir des effets non linéaires sur les processus écologiques, si bien que des conséquences graves peuvent être observées quand certains seuils de diminution sont franchis;
- » le maintien des interactions entre espèces est essentiel pour préserver les processus écologiques.

Il reste de nombreuses questions quant aux effets de la diversité biologique sur le fonctionnement des écosystèmes. C'est surtout le cas dans les écosystèmes les plus diversifiés et dans ceux dominés par des plantes à longue durée de vie, car ils sont les plus difficiles à étudier. De plus, il est encore généralement impossible d'évaluer l'importance relative pour le bien-être humain des différents services écologiques qu'engendre un écosystème.

3.2. Les inquiétudes que soulève la dynamique actuelle de la biodiversité

Nous vivons, selon certains, la sixième crise majeure d'extinction de la biodiversité, les cinq crises précédentes ayant défini les transitions entre les grandes périodes géologiques passées, avant l'existence des humains (Barnovsky *et al.*, 2011). Nous serions ainsi entrés dans une nouvelle époque, celle de l'Anthropocène, caractérisée par la prédominance de l'influence humaine sur le système terrestre. Le besoin de décrire cette dynamique négative de la biodiversité planétaire fait émerger de nouveaux concepts, dérivés de la comptabilité financière (tableau 1.2). Nous utiliserons abondamment ces concepts dans les derniers chapitres du livre.

Au Québec, les pressions qui s'exercent sur la biodiversité reflètent ce qui se passe à l'échelle globale. Sur plus de 60 000 espèces, au moins 500 sont en situation précaire (ce chiffre serait bien plus grand si la situation de chaque espèce était mieux connue), alors que plus de 1 000 ont été introduites (Lavoie, 2012; Turbis *et al.*, 2010). Les remaniements de biodiversité sont surtout importants dans le sud de la province, où la pression humaine est la plus forte, mais cette influence s'étend de plus en plus vers le nord. Dans certaines localités très développées du sud de la province, il est probable que des extinctions différées soient inévitables et qu'une dette d'extinction importante ait été accumulée.

3.3. La gestion de la biodiversité au Québec

Cinq lois principales ont été adoptées au Québec en vue de protéger la diversité biologique :

- » La Loi sur les réserves écologiques (1974) pour préserver certaines parties du territoire représentatives de la diversité de la richesse écologique et génétique du patrimoine naturel.
- » La Loi sur les parcs (1977) qui régleme la création de parcs au Québec (encadré 1.1). Elle stipule notamment que toute forme de prospection, d'utilisation et d'exploitation des ressources à des fins de production forestière, minière ou énergétique, de même que le passage d'oléoduc, de gazoduc et de ligne de transport d'énergie sont interdits dans les parcs. Toute forme de chasse ou de piégeage y est également interdite.
- » La Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune (1983) pour conserver la faune et son habitat, leur mise en valeur dans une perspective de développement durable et la reconnaissance à toute personne du droit de chasser, de pêcher et de piéger, conformément à la loi.
- » La Loi sur les espèces menacées et vulnérables (1989) pour sauvegarder la biodiversité du Québec. La loi vise à empêcher la disparition d'espèces sur le sol québécois et à rétablir les populations et les habitats des espèces désignées menacées ou vulnérables.
- » La Loi sur la conservation du patrimoine naturel (2002) qui propose des mesures visant à favoriser la mise en place d'un réseau d'aires protégées représentatives de la biodiversité du Québec.

Au Québec, les espèces à statut précaire sont classées en trois catégories officielles: les espèces

Tableau 1.2. Concepts utiles pour décrire la dynamique de la biodiversité

-
- **Pression** : tout événement qui cause l'extinction ou l'immigration d'une ou plusieurs populations ou espèces, que ce soit dans l'immédiat ou de façon différée.
 - **Remaniement de biodiversité** : changements dans une communauté (principalement sous forme de remplacements d'espèces) provoqués par une pression.
 - **Gain de biodiversité** : augmentation nette du nombre d'espèces à la suite d'une pression.
 - **Perte de biodiversité** : diminution nette du nombre d'espèces à la suite d'une pression.
 - **Immigration différée** : phénomène selon lequel l'immigration causée par une pression ne se produit pas immédiatement, mais plutôt une ou plusieurs générations après la pression.
 - **Délai d'immigration** : temps qui s'écoule entre le moment où une pression causant l'immigration d'une espèce a lieu et le moment où cette immigration survient réellement.
 - **Crédit d'immigration** : nombre d'espèces promises à une immigration prochaine suivant une pression.
 - **Extinction différée** : phénomène selon lequel l'extinction causée par une pression ne se produit pas immédiatement, mais plutôt une ou plusieurs générations après la pression.
 - **Délai d'extinction** : temps qui s'écoule entre le moment où une pression causant l'extinction d'une espèce a lieu et le moment où cette extinction survient réellement.
 - **Dettes d'extinction** : nombre d'espèces vouées à une extinction prochaine suivant une pression.
 - **Déficit de biodiversité** : diminution transitoire du nombre d'espèces suivant une pression.
 - **Excédent de biodiversité** : augmentation transitoire du nombre d'espèces suivant une pression.
 - **Biodiversité à l'équilibre** : nombre d'espèces dans un système une fois qu'il a atteint son équilibre.
 - **Bilan de biodiversité** : différence nette entre le crédit d'immigration et la dette d'extinction une fois que la biodiversité à l'équilibre a été atteinte.
-

Source : Adapté de Jackson et Sax (2010).

menacées sont celles dont la disparition est appréhendée, les espèces vulnérables sont celles dont la survie est précaire (même si la disparition n'est pas appréhendée) et les espèces susceptibles d'être désignées menacées ou vulnérables sont celles faisant l'objet d'une attention particulière sans pour autant que leur statut ne justifie l'une des deux catégories précédentes. Ce classement repose notamment sur la taille de la répartition géographique ainsi que sur l'effectif et le déclin de la population.

En 2013, 544 espèces étaient en situation précaire au Québec : 7 amphibiens (33% des espèces de ce groupe présentes au Québec), 14 reptiles (82%), 9 bivalves, 3 gastéropodes, 35 insectes, 18 mammifères (20%), 33 oiseaux (10%), 32 poissons (16%) et 393 plantes. Ces espèces sont surtout des périphériques nord (figure 1.2C) bien que certaines, notamment végétales, soient restreintes à des sols calcicoles ou serpenticoles (Tardif *et al.*, 2005).

Le Québec fut la première province canadienne à ratifier la Convention sur la diversité biologique, en 1992 au Sommet de la Terre de Rio, et a dès lors élaboré la Stratégie québécoise sur la biodiversité pour favoriser la conservation des espèces et des habitats et l'utilisation durable des ressources naturelles. Le secrétariat de la Convention est à Montréal.

Le gouvernement canadien a aussi adopté des lois encadrant la gestion et la conservation de la biodiversité, dont voici les principales :

- » La Loi sur les parcs nationaux du Canada (1930, modifiée depuis) qui vise à conserver intactes, pour le bénéfice des générations à venir, des aires naturelles d'importance nationale afin d'en favoriser la compréhension, l'appréciation et la jouissance par le public.
- » La Loi sur les espèces sauvages du Canada (1973) qui autorise le gouvernement fédéral

à acquérir des terres pour créer des réserves fauniques nationales, des refuges protégés contre la chasse et autres perturbations des habitats.

- » La Loi sur la Convention concernant les oiseaux migrateurs (révisée en 1994) qui interdit de faire le trafic des oiseaux migrateurs et de les chasser à des fins commerciales. Elle autorise aussi le gouvernement à établir des refuges pour les oiseaux migrateurs.
- » La Loi concernant la protection d'espèces animales et végétales sauvages et la réglementation de leur commerce international et interprovincial (1996). Elle vise à enrayer le commerce illégal des espèces animales et végétales et de mettre un terme au commerce des espèces menacées.
- » La Loi sur les océans (1997) qui définit une zone économique exclusive au Canada dans laquelle le pays a toute souveraineté pour faire

respecter ses droits et doit assumer ses responsabilités quant à l'exploration et à l'exploitation des ressources biologiques et non biologiques. Le Canada peut en outre établir des zones de protection marine.

- » La Loi sur les espèces en péril (2002) pour prévenir la disparition d'espèces sauvages du Canada et permettre le rétablissement de celles qui, par suite de l'activité humaine, sont devenues des espèces disparues du pays, en voie de disparition ou menacées.

De nombreuses organisations non gouvernementales mènent aussi des actions concrètes en matière de conservation et de gestion de la biodiversité québécoise. Par exemple, Canards Illimités Canada, Conservation de la nature Canada, l'Institut québécois de la biodiversité, la Fondation de la faune et Nature Québec sont particulièrement actifs au Québec en matière de protection et de gestion de la biodiversité.

Encadré 1.1. LES AIRES PROTÉGÉES DU QUÉBEC

Une aire protégée est une zone où des mesures particulières de gestion sont mises en œuvre. Ses objectifs sont la protection, la restauration et la gestion des habitats naturels et des espèces. Les parcs nationaux sont les aires protégées les plus connues. Au Québec, leur gestion est assurée par Parcs Québec, Parcs Canada et Parcs Nunavik. Cependant, l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) a défini plusieurs catégories d'aires protégées (ci-dessous) selon l'intensité et l'objectif de la protection :

- Ia** (réserve naturelle intégrale) : objectifs scientifiques ou de surveillance continue de l'environnement.
- Ib** (zone de nature sauvage) : objectifs de protection des ressources sauvages.
- II** (parc national) : objectifs de protection de l'intégrité écologique des écosystèmes dans un souci de représentativité de la biodiversité. Objectifs également récréatifs.
- III** (monument naturel) : objectifs de préservation d'éléments naturels d'importance exceptionnelle.
- IV** (aire de gestion des habitats ou des espèces) : objectifs de conservation nécessitant une intervention active au niveau de la gestion.
- V** (paysage terrestre ou marin protégé) : objectifs de conservation de paysages terrestres ou marins façonnés par l'homme au fil du temps.
- VI** (aire protégée de ressources naturelles gérée) : objectifs de maintien de la biodiversité garantissant une utilisation durable des écosystèmes naturels.

La conservation de la biodiversité se fait généralement par la protection des espèces ou par celle des espaces. L'approche écosystémique, qui vise à protéger des écosystèmes entiers, se développe également. La conservation de la biodiversité nécessite une concertation entre tous les acteurs concernés par la conservation du patrimoine naturel, ce qui entraîne des conflits fréquents entre usagers.

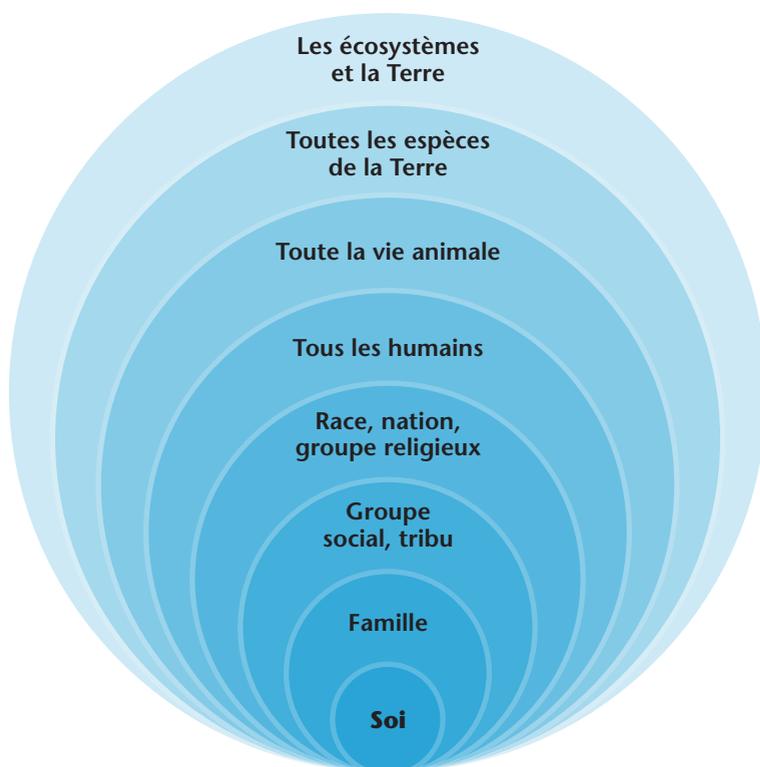
Les changements climatiques imposent une nouvelle réflexion dans notre vision à long terme de la conservation de la biodiversité. Une question principale émerge : nos approches de conservation de la biodiversité, qui déjà manquent souvent d'efficacité, sont-elles adaptées à un contexte de changements climatiques rapides ?

CONCLUSION

La biodiversité est une partie du patrimoine naturel du Québec qui est encore mal décrite. Les services qu'elle rend aux Québécois et à l'humanité tout entière sont cependant de plus en plus reconnus, même si personne ne peut encore en mesurer la pleine valeur. Il est cependant clair que la diminution globale de la biodiversité pose la question morale fondamentale de notre rapport avec les autres formes de vie et de notre responsabilité dans leur maintien (Levêque et Mounolou, 2001). Au-delà des enjeux scientifiques, économiques et politiques de la question de la biodiversité, nous devons comprendre que nous sommes solidaires de tout ce qui vit sur la planète et que les niveaux de moralité ne s'arrêtent pas à notre propre espèce (figure 1.8).

Dans ce contexte, les changements climatiques posent des questions importantes sur l'évolution du patrimoine naturel du Québec et la façon dont nous devrions le gérer. Le prochain chapitre expose la nature de ces changements climatiques, alors que le suivant détaille les liens profonds qui existent entre la biodiversité et les climats du Québec.

Figure 1.8. Extension des niveaux de moralité



Source : Adaptée de Noss (1992).

Ma maison, ce n'est pas ma maison, c'est froidure.

Gilles Vigneault

As human beings, we are vulnerable to confusing the unprecedented with the improbable.

Albert Arnold Gore Jr.

C H A P I T R E

2

LES CLIMATS DU QUÉBEC

*Dominique Berteaux, Nicolas Casajus,
Sylvie de Blois et Travis Logan*

À RETENIR

- La météo définit les conditions atmosphériques à court terme. Le climat représente la description statistique de la météo sur 30 ans.
- L'imposante superficie du Québec nous oblige à parler des climats, plutôt que du climat du Québec. Les climats du Québec sont tous caractérisés par une longue saison froide et une grande saisonnalité.
- Le climat terrestre varie naturellement. À cette variation naturelle s'est superposée récemment une variation d'origine humaine, provoquée par les gaz à effet de serre rejetés principalement lors de la combustion des énergies fossiles.
- L'atmosphère terrestre s'est réchauffée en moyenne de 0,13 °C par décennie au cours des 50 dernières années, alors que ce réchauffement a atteint dans le sud du Québec 0,28 °C par décennie pendant la même période. Nous sommes clairement entrés dans l'ère du réchauffement climatique.
- Les modèles climatiques permettent de projeter les changements climatiques à venir en utilisant des scénarios plausibles d'émissions de gaz à effet de serre. Certains de ces modèles établissent des projections climatiques à l'échelle régionale. Ce sont les plus utiles pour les biologistes.
- Comme les modèles ne permettent pas de faire des projections certaines, il faut estimer l'incertitude associée, puis la prendre en compte pour anticiper les effets des changements climatiques sur la biodiversité.
- Au Québec, l'augmentation des températures moyennes devrait se situer entre 2 °C et 8 °C au cours du XXI^e siècle. Les précipitations augmenteront aussi, mais les projections sont plus incertaines.
- Les climats des écorégions situées dans la moitié nord du Québec seront ceux qui changeront le plus. Le climat d'une région donnée se déplacera de 250 à 750 km vers le nord au cours du siècle, ce qui est considérable.

INTRODUCTION

La climatologie est une science très quantitative manipulant de grandes masses de données. Son volet prospectif utilise des modèles complexes qui sont sans cesse raffinés. Les principales conclusions sur le changement des climats terrestres, rassemblées régulièrement dans les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), sont alarmantes et ont des échos aux plus hauts niveaux politiques. Pour toutes ces raisons, la climatologie est une science intimidante dans laquelle il peut être difficile de se plonger.

Une difficulté supplémentaire ralentit l'apprentissage de la climatologie : ses résultats diffèrent selon la géographie, les saisons et les variables météorologiques. Les climats et les changements climatiques ne sont pas les mêmes au Québec et en France. Ils diffèrent selon les régions du Québec. Les précipitations peuvent augmenter au fil des décennies pour une saison et diminuer pour une autre. Voilà plusieurs casse-tête pour les biologistes soucieux de comprendre les effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec.

Ce chapitre est un cours de climatologie 101 pour les biologistes. Il résume les bases nécessaires pour comprendre les climats du Québec et les changements qu'ils subissent. Il donne aussi les outils indispensables pour saisir comment nous avons développé une vision de la biodiversité du Québec dans un climat futur, un climat nettement plus chaud.

1. LES CLIMATS ACTUELS DU QUÉBEC

1.1. Le climat versus la météo

Le climat et la météo sont souvent confondus. Le climat est habituellement défini comme la description statistique (moyenne et variabilité) sur une période d'au moins 30 ans, de différents paramètres atmosphériques comme la température, les précipitations, l'ensoleillement, l'humidité ou la vitesse du vent. Une longue période de mesures est nécessaire pour bien définir le climat d'une région, car les conditions climatiques sont très variables d'une année à l'autre, voire d'une décennie à l'autre. Pourquoi 30 ans ? C'est une convention établie par l'Organisation météorologique mondiale qui considère que des statistiques calculées sur des durées

inférieures ne sont pas assez représentatives. Il arrive parfois que des données observées sur une période inférieure à 30 ans soient utilisées, faute de mieux. Il faut alors garder en tête qu'elles peuvent ne pas refléter le changement climatique, mais plutôt la variabilité naturelle.

La météo définit également les conditions atmosphériques, mais à beaucoup plus court terme (de quelques heures à quelques jours). Les prévisions météorologiques sont souvent locales, bien qu'elles puissent aussi être déterminées sur de grandes régions. On parlera donc du climat de la Gaspésie à la fin du xx^e siècle, mais de la météo de Gaspé le matin du 25 décembre 1998.

1.2. Ce qui caractérise les climats du Québec

Le Québec s'étend sur environ 2 000 km du nord au sud et 1 500 km d'ouest en est. Sa superficie, qui dépasse 1,5 million de km^2 , permet à plusieurs climats de coexister sur le territoire. Chaque climat est déterminé par de très nombreux facteurs. Des phénomènes planétaires comme la variation latitudinale de l'ensoleillement jouent un rôle essentiel. Mais il existe aussi de nombreuses influences régionales, comme la présence de montagnes ou la proximité de masses d'eau. Il n'est donc pas surprenant de constater une forte structuration spatiale des climats du Québec.

Les températures au Québec augmentent du nord au sud alors que les précipitations augmentent plutôt du nord-ouest au sud-est (figure 2.1). À cette variation géographique s'ajoutent d'importants contrastes saisonniers. Suivant les régions, la température moyenne varie ainsi de 3 °C à 20 °C en été, alors qu'elle varie de -25 °C à -8 °C en hiver (Desjarlais *et al.*, 2010). Quant aux précipitations totales (pluie et neige), elles sont, en été, d'environ 120 mm dans le nord du Québec et 450 mm dans

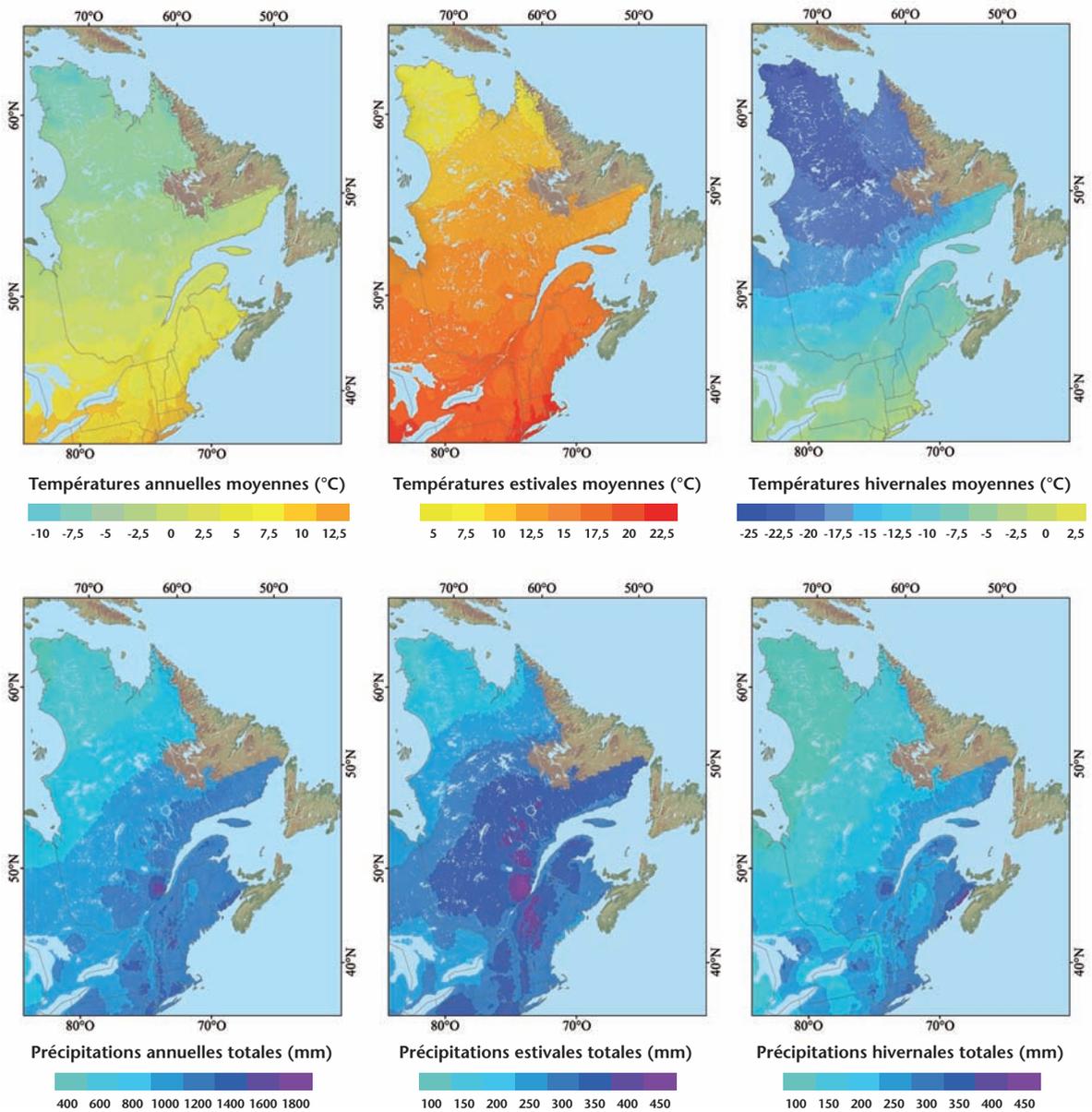
le sud (figure 2.1). Par contre, seulement 50 mm d'équivalent en eau sont enregistrés dans le nord du Québec en hiver, tandis que la chaîne appalachienne et les Laurentides peuvent recevoir jusqu'à 350 mm durant cette saison. Notons pour terminer ce rapide portrait que la circulation atmosphérique qui prévaut sur la planète entre les 30^e et 60^e degrés de latitude impose des vents dominants d'ouest dans la majeure partie du Québec.

Les gradients climatiques tels que ceux représentés à la figure 2.1 sont souvent difficiles à mémoriser. Nous retenons mieux l'information quand elle est classée en catégories. Ainsi, de nombreuses classifications des climats ont été inventées. Celle de Köppen-Geiger, fondée sur les précipitations et les températures, est l'une des plus reconnues. Elle est utilisée en climatologie, hydrologie, biologie, géographie et agriculture. Cette classification divise le Québec en cinq grandes zones climatiques (figure 2.2).

Le climat de toundra (*ET* sur la figure 2.2) caractérise l'extrême nord du Québec. La température moyenne du mois le plus chaud est comprise entre 0 °C et 10 °C et la saison d'été est très peu marquée. Le climat continental froid avec été sec (*Dsc*) n'est représenté que très localement, entre la baie d'Hudson et le lac à l'Eau Claire. Le climat continental froid sans saison sèche (*Df*) occupe donc la vaste majorité du territoire québécois. La température moyenne du mois le plus froid y est inférieure à -3 °C alors que la température moyenne du mois le plus chaud dépasse 10 °C. L'été et l'hiver sont bien définis, mais les précipitations sont assez bien réparties au cours de l'année. Cette immense zone climatique se divise en trois sous-climats, surtout en fonction des températures estivales. Chacun est bien représenté au Québec.

Le climat continental froid avec un été court et frais (*Dfc*) occupe le centre du Québec, le climat continental froid avec un été tempéré (*Dfb*) est situé dans sa partie sud et le climat continental froid avec un été chaud (*Dfa*) est restreint à la région de Montréal (figure 2.2).

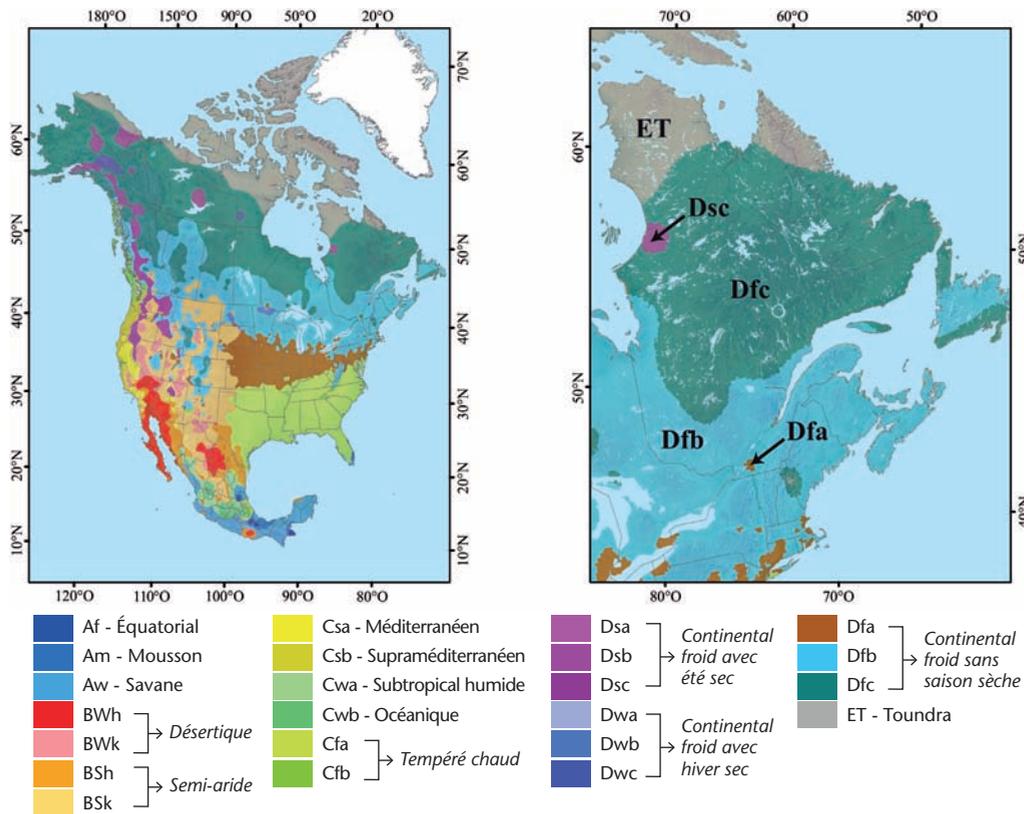
Figure 2.1. Températures et précipitations au Québec et en périphérie en 1961-1990



Les données ayant servi à la réalisation des cartes viennent d'observations mensuelles à des stations météorologiques canadiennes et américaines. Ces données ponctuelles ont été interpolées spatialement grâce au logiciel ANUSPLIN sur une grille d'une résolution horizontale de 10 km × 10 km. La période estivale correspond aux mois de juin, juillet et août (période hivernale : décembre, janvier et février). Les moyennes ont été calculées sur la période de référence 1961-1990 pour chaque cellule de la grille 10 km × 10 km.

Source : Données tirées de McKenney et al. (2006).

Figure 2.2. Zones climatiques de l'Amérique du Nord



Source : D'après la classification de Köppen-Geiger (Kottek *et al.*, 2006).

2. LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES RÉCENTS

Le système climatique de la Terre change naturellement au cours du temps. Plusieurs facteurs expliquent ces variations qui ont lieu à des échelles de temps fort variées. Par exemple, les éruptions volcaniques, qui peuvent libérer d'immenses quantités de cendres bloquant le rayonnement solaire, sont une source de variabilité climatique sur une ou deux années. Le cycle solaire module la quantité d'énergie libérée par le soleil sur une période d'environ onze ans, en plus de varier sur de plus longues périodes. À l'échelle de dizaines, voire de centaines de milliers d'années, la forme de l'orbite terrestre et

la direction de l'axe de rotation de la Terre par rapport à cette orbite sont variables et modifient la quantité et la distribution de l'énergie solaire reçue. Enfin, l'activité biologique terrestre a influencé le climat tout au long de l'histoire de la Terre en modifiant la concentration de certaines molécules dans l'atmosphère. Cependant, à ces changements naturels du système climatique terrestre se sont récemment ajoutés des changements d'origine anthropique (humaine).

Depuis la révolution industrielle du XIX^e siècle, la combustion d'énergies fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) rejette dans l'atmosphère des quantités massives de gaz tels le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O). L'augmentation artificielle des concentrations de ces

gaz à effet de serre amplifie l'effet de serre naturel qui permet à la surface terrestre d'avoisiner une température moyenne de 14 °C (au lieu de -19 °C sans ce phénomène). Ce forçage radiatif (encadré 2.1) d'origine anthropique a entraîné un réchauffement moyen du globe de 0,74 °C entre 1906 et 2005 – ou 0,074 °C par décennie (Solomon *et al.*, 2007) –, réchauffement qui s'est accéléré pour atteindre 0,13 °C par décennie au cours des 50 dernières années (Solomon *et al.*, 2007).

2.1. Les tendances observées au Québec

Le Québec a-t-il suivi la tendance au réchauffement observée à l'échelle planétaire? Entre 1961 et 2005, la température annuelle moyenne du Québec a

Encadré 2.1. LE FORÇAGE RADIATIF

Le forçage radiatif est une mesure de l'impact des principaux facteurs externes qui affectent l'équilibre énergétique du système climatique terrestre à la tropopause (Solomon *et al.*, 2007). Il est dit positif quand il entraîne un accroissement de l'énergie du système climatique, c'est-à-dire un réchauffement du climat. Inversement, un forçage radiatif négatif entraîne un refroidissement. Les gaz à effet de serre tels que le CO₂, le CH₄ et le N₂O induisent un forçage radiatif positif alors que les aérosols et l'ozone (O₃) stratosphérique induisent un forçage négatif. L'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ est le facteur ayant le plus affecté le forçage radiatif entre 1750 et 2011 (Alexander *et al.*, 2013).

augmenté de 0,28 °C par décennie. Ce réchauffement a été plus important l'été (0,34 °C par décennie) et le printemps (0,33 °C) que l'hiver (0,25 °C) et l'automne (0,19 °C). Le régime des précipitations a également changé, avec une augmentation moyenne de 18 mm par décennie pour l'ensemble du Québec sur la même période¹. Évidemment, toutes les variables climatiques dérivées, comme la durée de la saison de gel ou le nombre de degrés-jours de croissance (qui est une mesure de la quantité totale annuelle de chaleur disponible pour la croissance des végétaux), ont aussi changé. Nous y reviendrons au chapitre 3 quand nous résumerons la pertinence biologique des changements climatiques.

Il nous est difficile de percevoir directement le changement du climat. Comment déceler une augmentation d'un quart de degré par décennie? Nos mémoires sont trop imprécises et nos vies sont trop courtes. Pourtant, certains effets des changements climatiques deviennent maintenant facilement perceptibles. Prenons l'exemple du pergélisol, qui est omniprésent dans l'Arctique québécois. Entre 1994 et 2007, sa température à 4 m de profondeur a augmenté de 1,9 °C et celle mesurée à 20 m a augmenté de 1,1 °C (Allard *et al.*, 2008). Ce réchauffement a entraîné un affaissement des sols sur lesquels reposent de nombreuses constructions humaines.

D'autres effets du changement climatique global se font sentir au Québec. Par exemple, le niveau marin dans le sud du golfe du Saint-Laurent a augmenté de 17 cm au cours du siècle dernier tandis que la côte s'est abaissée de 15 cm durant cette période, entraînant une hausse du niveau relatif de la mer de 32 cm (McCulloch *et al.*, 2002; Forbes *et al.*, 2004). La couverture de glace, qui apparaît généralement de la mi-janvier à la mi-avril, a diminué. Depuis les années 1960, l'inhibition des vagues par la banquise a décliné de 30 % (Savard *et al.*, 2008). L'érosion des berges dans le golfe du Saint-Laurent a ainsi considérablement augmenté.

1. Les valeurs décrivant les tendances contemporaines des changements de températures et de précipitations ont été calculées à partir des données de McKenney *et al.* (2006) (voir la note au bas de la figure 2.1). Les tendances ont été calculées entre 1961 et 2005 pour l'ensemble du territoire (voir la section 2.1) ainsi que pour chaque écorégion (tableau 2.1).

2.2. Des changements régionalisés

Les changements climatiques ne sont pas les mêmes partout sur le territoire du Québec. De 1961 à 2005, les deux écorégions du sud de la province (la forêt septentrionale et la forêt tempérée de l'Est; voir la carte des écorégions à la figure 1.4 du chapitre précédent) ont vu leur température annuelle moyenne augmenter d'environ 0,23 °C et 0,16 °C par décennie, respectivement (tableau 2.1). Les quatre autres écorégions, localisées dans la moitié nord du Québec, ont subi un réchauffement plus important, notamment l'écorégion des plaines d'Hudson dont la température annuelle moyenne a augmenté de 0,36 °C par décennie. Le nombre de degrés-jours de croissance suit les mêmes tendances que la température annuelle moyenne (tableau 2.1).

Les précipitations annuelles totales n'ont augmenté significativement que dans les trois écorégions du nord de la province (cordillère arctique, toundra et taïga). Bien que les précipitations soient difficiles à bien mesurer et qu'il existe peu de stations météorologiques dans le nord du Québec, il

semblerait que la cordillère arctique et la toundra aient connu une hausse particulièrement importante de près de 50 mm par décennie (tableau 2.1).

3. LES PROJECTIONS CLIMATIQUES

Les tendances climatiques récentes suscitent de grandes interrogations quant aux changements climatiques futurs. Quelle sera l'amplitude du changement à venir? Quelle sera sa rapidité? Certaines parties du Québec seront-elles plus exposées que d'autres? Les réponses à ces questions sont essentielles pour prendre des mesures d'atténuation (qui limiteront l'amplitude des changements climatiques) et d'adaptation (qui limiteront la vulnérabilité des sociétés et des écosystèmes aux changements climatiques). Le défi scientifique posé par ces questions est immense, mais l'état actuel des connaissances nous permet tout de même d'avoir une bonne idée de ce qui nous attend. Aussi, les scénarios de changements climatiques sont-ils

Tableau 2.1. Changements de températures et précipitations observés entre 1961 et 2005 dans les six écorégions de niveau I du Québec

Écorégions (superficie au Québec)	Température (°C/décennie)	Précipitations (mm/décennie)	Degrés-jours de croissance (par décennie)
Cordillère arctique (13 565 km ²)	+ 0,28	+ 49,0 (+ 7,6 %)	+ 32,1 (+ 17,1 %)
Toundra (187 538 km ²)	+ 0,30	+ 45,0 (+ 10,0 %)	+ 42,8 (+ 16,7 %)
Taïga (530 861 km ²)	+ 0,33	+ 28,3 (+ 4,1 %)	+ 43,2 (+ 8,1 %)
Plaines d'Hudson (37 058 km ²)	+ 0,36	+ 14,8 (+ 2,0 %) ^{ns}	+ 64,4 (+ 6,4 %)
Forêts septentrionales (702 508 km ²)	+ 0,23	+ 0,2 (+ 0,0 %) ^{ns}	+ 30,9 (+ 2,8 %)
Forêts tempérées de l'Est (32 186 km ²)	+ 0,16	+ 10,1 (+ 1,0 %) ^{ns}	+ 25,7 (+ 1,4 %)

Toutes les tendances de température annuelle moyenne, de précipitations annuelles totales et de nombre de degrés-jours de croissance sont significatives (seuil de 5 %) sauf indication contraire (ns). Les valeurs entre parenthèses expriment les pourcentages d'augmentation par décennie par rapport à la moyenne annuelle de la période 1961-2005 (voir note 1).

devenus une source d'information incontournable pour les biologistes qui s'intéressent au devenir de la biodiversité.

Nous expliquons dans cette section les bases des projections et scénarios climatiques et résumons les résultats les plus pertinents pour l'étude de la biodiversité du Québec. Comme la science du climat constitue un domaine hautement spécialisé, un imposant jargon s'est développé. La figure 2.3 permet de visualiser les principaux concepts utilisés dans la suite du chapitre. Leur signification, leur importance et leurs relations apparaîtront au fur et à mesure de la lecture.

La climatologie évolue rapidement. Ce chapitre est conforme au quatrième rapport du GIEC (Solomon *et al.*, 2007). Certains progrès scientifiques apparaissant dans le cinquième rapport (Alexander *et al.*, 2013) ne sont donc pas décrits, bien que nous les évoquions à quelques reprises quand cela nous semble utile.

3.1.

Les modèles climatiques globaux

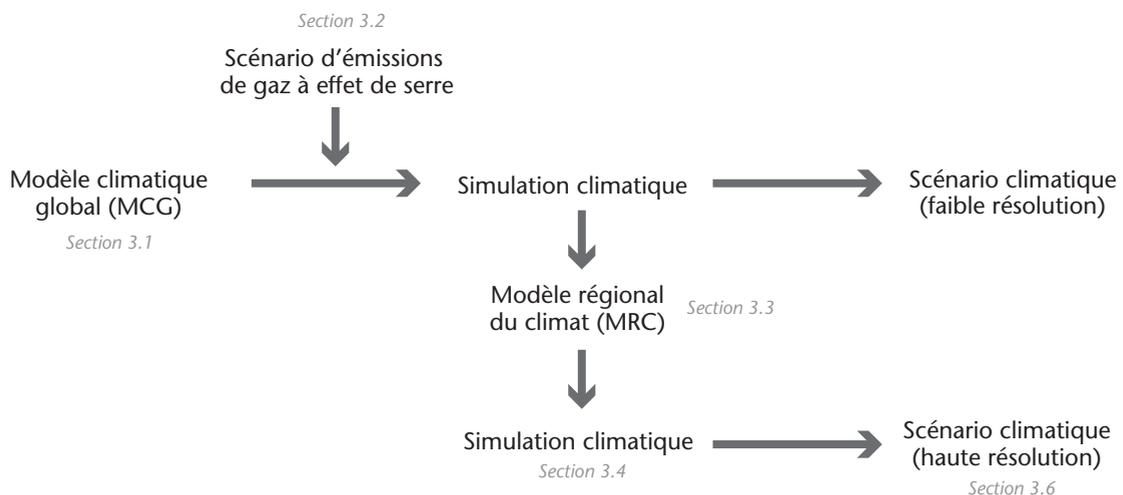
Les modèles climatiques globaux (MCG, aussi appelés «modèles de circulation générale») reproduisent

sur ordinateur le fonctionnement du système climatique. Ils servent entre autres à simuler le climat futur du globe.

Les MCG sont des modèles numériques basés sur les principes fondamentaux de la physique tels que la mécanique des fluides, la thermodynamique et les transferts radiatifs, ainsi que sur les propriétés chimiques et biologiques des composantes du système climatique. Ils simulent les mouvements de masse et d'énergie entre les différentes composantes du système climatique, principalement l'atmosphère et les océans, mais également le reste de l'hydrosphère, la cryosphère, la surface et la biosphère. En modélisant les processus de circulations atmosphérique et océanique à l'aide d'équations mathématiques, ils permettent de déterminer la valeur de variables climatiques (température, précipitation, humidité, pression, etc.) en un point et à un instant donné.

La description du fonctionnement global du système climatique demande que les équations soient résolues en un très grand nombre de points géographiques selon un pas de temps moyen d'environ 20 minutes. Pour des raisons de puissance et de vitesse de calcul, la planète est découpée en une multitude de cellules définissant une grille à

Figure 2.3. Principaux concepts de climatologie prédictive abordés



trois dimensions (deux dimensions horizontales et une dimension verticale). Les différentes caractéristiques climatiques sont estimées à l'intérieur de chaque cellule. Typiquement, une cellule présente une résolution horizontale de 150 à 350 km et une résolution verticale de quelques centaines de mètres.

De nombreuses équipes ont développé des MCG dans les dernières décennies, principalement dans des universités, des centres de recherche et des services météorologiques nationaux. Le GIEC a retenu dans son quatrième rapport d'évaluation 23 modèles climatiques globaux issus de 18 équipes différentes (Solomon *et al.*, 2007). Parmi les plus connus et les plus couramment utilisés figurent le Hadley Centre Coupled Model (Royaume-Uni), le Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Coupled Climate Model (Australie) et le modèle couplé du climat du globe (MCCG) du Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique. Ces modèles sont tous basés sur les mêmes principes de fonctionnement, ils représentent de façon générale les mêmes processus climatiques et ils ont tous été validés par la communauté scientifique. Cependant, ils diffèrent dans leur complexité, leur traitement et leur estimation des paramètres, ainsi que dans certaines spécificités propres aux équations qu'ils utilisent.

Le développement d'un MCG comporte une phase de validation qui permet de juger de la précision et de la fiabilité du modèle. Durant cette phase, les climatologues utilisent les modèles afin de reproduire les climats passé et contemporain de la Terre. Les simulations obtenues sont confrontées aux observations des stations météorologiques, des satellites et au climat reconstitué par des proxy telles les carottes glaciaires. Un modèle capable de reproduire fidèlement le climat des dernières décennies ou siècles donne une meilleure confiance quant à sa capacité à simuler le climat futur. Par exemple, le refroidissement provoqué par l'éruption volcanique du mont Pinatubo en 1991, qui a propulsé une grande quantité de particules dans les hautes couches atmosphériques, est précisément reproduit par les modèles.

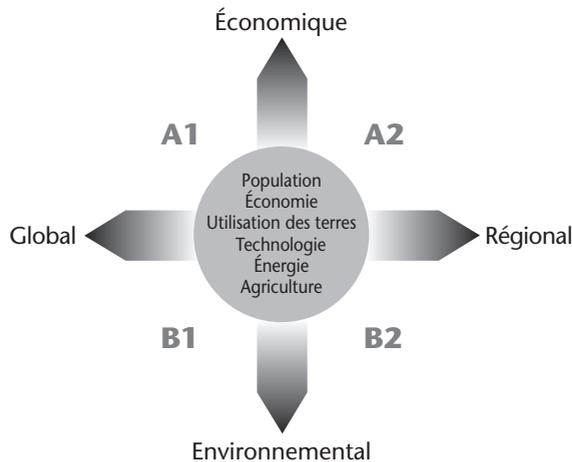
3.2. Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre

Les MCG permettent de faire des calculs complexes pour prédire le climat d'une période choisie se terminant à un moment que l'on appelle le temps t . Les simulations débutent au temps 0, en posant le plus près possible de la réalité les conditions initiales du système climatique (conditions atmosphériques, océaniques, de surface). Pour calculer le changement climatique entre le temps 0 et le temps t , les modèles ont aussi besoin des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre durant la période. Ces concentrations déterminent en grande partie la façon dont le modèle fera évoluer le climat durant la simulation.

Cependant, personne ne connaît les concentrations futures de gaz à effet de serre. Elles dépendront de nos comportements individuels, de nos décisions collectives et des développements technologiques. Le GIEC a donc préparé 40 scénarios d'émissions de gaz à effet de serre qui ont été utilisés dans les troisième et quatrième rapports d'évaluation. Ils sont regroupés en quatre grandes familles (figure 2.4). Ces scénarios fournissent les concentrations atmosphériques futures potentielles selon différentes voies de développement des sociétés humaines, qui dépendent de facteurs démographiques, économiques, technologiques et énergétiques. Tous ces scénarios sont possibles, mais seul l'avenir dira lequel est le plus semblable à la réalité.

La famille A1 envisage un monde caractérisé par une croissance économique très rapide et une réduction des différences régionales dans le revenu par habitant. Cette famille est divisée en trois groupes selon l'évolution technologique dans le domaine énergétique: grande utilisation de combustibles fossiles (A1FI), grande utilisation d'énergies autres que fossiles (A1T) et équilibre entre ces sources d'énergie (A1B). La famille B1 envisage un monde aussi globalisé que celui de la famille A1, mais avec l'utilisation de technologies propres et la

Figure 2.4. Familles de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre



Les quatre familles de scénarios représentées, ainsi que les principaux thèmes sous-jacents utilisés pour dresser ces familles, sont celles utilisées dans les troisième et quatrième rapports d'évaluation du GIEC.

Source : Adaptée de Nakicenovic *et al.* (2000).

mise en place rapide d'une économie de services et d'information. La famille B2 correspond à un monde privilégiant l'action locale pour assurer une durabilité économique, sociale et environnementale. Enfin, la famille A2 décrit un monde très régionalisé avec un faible développement économique et de lents progrès technologiques.

Pour simplifier, on dit souvent que les scénarios A1 (ou *business as usual*) sont pessimistes, car ils engendreraient des changements climatiques importants, alors que les scénarios B1 sont optimistes, car ils génèreraient des changements plus modérés (A2 et B2 sont intermédiaires). Jusqu'à présent, les scénarios qualifiés de pessimistes se révèlent les plus réalistes. Notons pour terminer que le cinquième rapport d'évaluation du GIEC, publié en même temps que ce livre, utilise une approche un peu différente, en respectant toutefois la logique présentée ci-dessus.

3.3. Les réductions d'échelle

Nous avons vu plus haut qu'à cause de leur complexité et du grand temps de calcul qu'ils requièrent, les MCG effectuent leurs opérations sur des cellules assez grandes, de 150 à 350 km de côté. Cette faible résolution spatiale ne permet pas de prendre en compte les phénomènes qui influencent le climat au niveau régional, comme la topographie ou la présence de grands lacs. Or, l'étude des impacts des changements climatiques sur la biodiversité a besoin d'information à fine échelle. C'est souvent localement que se prennent les décisions en matière d'adaptation.

Plusieurs méthodes de réduction d'échelle spatiale sont disponibles pour augmenter la résolution des simulations climatiques des MCG. Elles se répartissent en deux grandes familles : les méthodes statistiques et les méthodes dynamiques. Les méthodes statistiques (aussi appelées « méthodes empiriques ») reposent sur des calculs d'interpolation : on crée des cellules plus petites que celles du MCG dont on veut augmenter la résolution, puis on assume que le climat dans chacune de ces petites cellules peut être estimé en fonction du climat des cellules environnantes du MCG. Ces techniques sont rapides et peu coûteuses, mais elles ne prennent pas en compte les processus physiques sous-jacents et supposent que les relations entre les échelles plus grossières et celles plus fines demeureront constantes avec les changements climatiques.

Les méthodes dynamiques, appelées aussi modèles régionaux du climat (MRC), sont beaucoup plus sophistiquées, car elles simulent le climat de petites cellules de la même façon que les MCG, soit en représentant les processus physiques. Cependant, du fait de leur plus haute résolution spatiale (environ 50 km) qui exige une énorme quantité de calculs, un MRC donné ne permet de simuler le climat futur que pour une sous-région du globe. Ces modèles régionaux requièrent donc de l'information aux frontières de leur zone d'application

pour alimenter leurs projections régionales. Cette information est généralement fournie par un MCG : on dit qu'un modèle régional est piloté par un modèle global. Les MRC sont plus précis que les méthodes statistiques, mais comme ils nécessitent beaucoup plus de puissance de calcul, ils sont très coûteux et plus lents à produire.

L'Université du Québec à Montréal a développé, en partenariat avec le consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques (encadré 2.2), le Modèle régional canadien du climat version 4 dont nous utilisons les projections à 45 km de résolution horizontale (figure 2.5) pour un pas de temps de 15 minutes. Cette résolution spatiale permet de mieux simuler les particularités régionales et locales. La représentation de la topographie et des contrastes terre-mer est par exemple beaucoup plus fine que dans un modèle global. Le Modèle régional canadien du climat est piloté entre autres par le MCCG3 du Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique. Il constitue l'un des modèles numériques de simulation du climat à la fine pointe de la climatologie régionale.

3.4. Les simulations climatiques

Nous avons vu que le climat se définit sur une période d'au moins 30 ans. Pour étudier le climat futur, il est d'usage de choisir des périodes types, comme la période 2041-2070 (que l'on nomme l'« horizon 2050 ») et la période 2071-2100 (horizon 2080). Pour quantifier les changements climatiques à venir, on compare le climat de ces horizons à celui d'une période de référence, dans notre cas 1961-1990. Nous avons aussi vu que pour simuler le climat futur, un modèle climatique génère les conditions météorologiques dans chacune des cellules de sa grille de calcul, à chaque pas de temps. Par exemple, un modèle dont le pas de temps est de 20 minutes et qui prédit le climat à l'horizon 2050 en étant initialisé avec les conditions météorologiques du 1^{er} janvier 2000 à 00 h 00, produit d'abord les conditions météorologiques du 1^{er} janvier 2000 à 00 h 20, puis du 1^{er} janvier 2000 à 00 h 40, etc.,

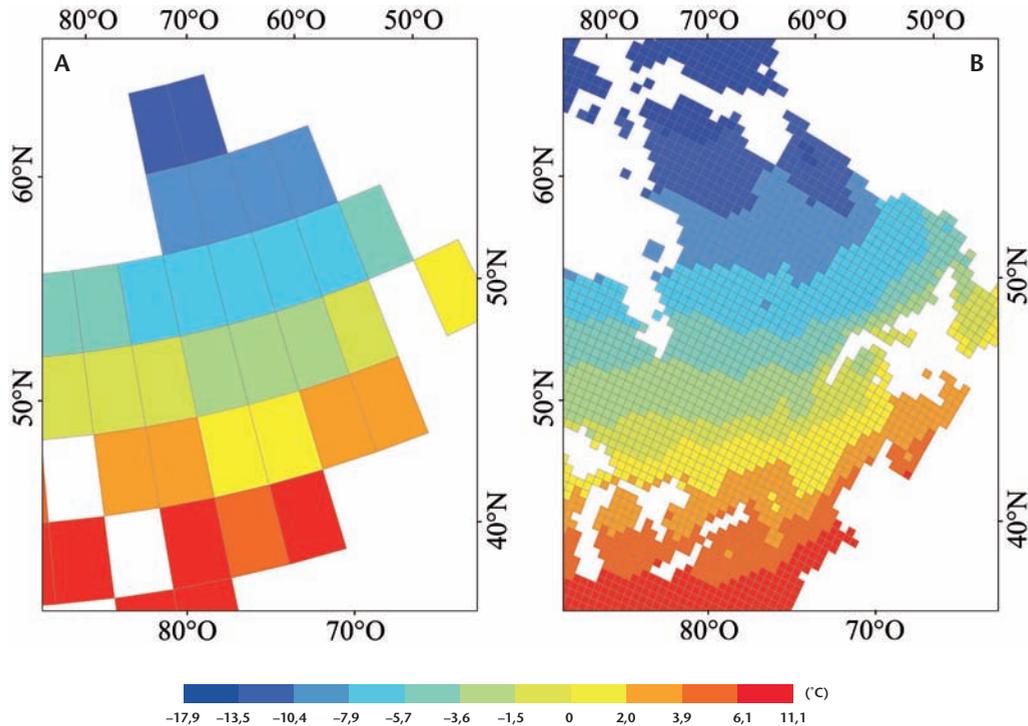
Encadré 2.2. LE CONSORTIUM OURANOS

Dans la mythologie grecque, Ouranos est une divinité personnifiant le ciel. Plus près de nous, Ouranos (<<http://www.ouranos.ca>>, consulté le 10 septembre 2013) est aussi depuis 2001 le consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, un organisme privé à but non lucratif né de la vision commune du gouvernement du Québec, d'Hydro-Québec et d'Environnement Canada. Son objectif est d'aider la société à faire face aux changements climatiques. Ouranos a ainsi doté le Québec d'un organisme capable d'assurer la complémentarité entre la science du climat et les besoins en adaptation de la société. Mettant en réseau quelques 400 scientifiques et professionnels issus de différentes disciplines, Ouranos informe les décideurs sur l'évolution du climat et les conseille pour identifier, évaluer, promouvoir et mettre en œuvre des stratégies d'adaptation locales et régionales. Ouranos dispose de trois superordinateurs dont la capacité de calcul excède 200 gigaflops et dont la mémoire d'archivage est de 880 téraoctets. Les recherches résumées dans ce livre sont largement issues du projet CC-Bio, qui fut le premier projet catalysé par Ouranos dans le domaine de la biodiversité et des écosystèmes.

jusqu'au 31 décembre 2070 à minuit. Chacune des conditions météorologiques ainsi produites forme une simulation climatique.

Pour une question d'espace mémoire, les simulations climatiques ne sont pas toutes archivées. Les variables sont plutôt conservées à une fréquence d'archivage donnée, par exemple 6 heures. Ces variables conservées peuvent être des valeurs instantanées, des moyennes ou encore des extrêmes

Figure 2.5. Représentation selon les cellules d'un modèle climatique global et d'un modèle régional du climat des températures annuelles moyennes du Québec et de sa périphérie



La température annuelle moyenne représentée est celle de la période 1961-1990. La carte A est la représentation selon les cellules de 250 km × 250 km du Modèle couplé du climat du globe du Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique (MCCG3), et la carte B est la représentation selon les cellules de 45 km × 45 km du Modèle régional canadien du climat version 4. La comparaison entre les deux représentations illustre la différence typique de résolution spatiale qui existe entre un modèle climatique global et un modèle régional du climat. Les données ayant servi à représenter la résolution horizontale du modèle canadien couplé du climat global (A) proviennent du World Climate Research Programme's Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (Meehl et al., 2007). Ce programme donne accès à de nombreux scénarios climatiques issus de plusieurs MCG et de plusieurs scénarios d'émissions de gaz à effet de serre pour différents horizons futurs, ainsi que pour le climat simulé pour la période de référence (1961-1990) à l'échelle mondiale. Les données ayant servi à illustrer la résolution horizontale du Modèle régional canadien du climat version 4 (B) proviennent d'Ouranos. Ce modèle fut initialement développé par Caya et Laprise (1999). Les simulations utilisées sont pilotées par le Modèle couplé du climat du globe du Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique (MCCG3) et les projections du climat futur sont disponibles pour le scénario d'émissions de gaz à effet de serre A2.

durant chaque période d'archivage. Les valeurs quotidiennes ou mensuelles sont ensuite extraites de ces archives pour calculer le climat sur une période choisie de 30 ans. Par exemple, en calculant la moyenne des températures quotidiennes obtenues du 1^{er} janvier 2041 au 31 décembre 2070, on obtient un climat des températures à l'horizon 2050. On peut alors bâtir des scénarios climatiques adaptés à

nos besoins en calculant de nouveaux indices climatiques, en comparant les changements climatiques simulés aux observations passées, ou encore en traçant des cartes rapportant des variables d'intérêt. Comme le montre bien la figure 2.3, les simulations climatiques sont donc les blocs de construction permettant de produire les scénarios climatiques.

3.5. L'incertitude associée aux scénarios climatiques

Les projections climatiques ne prédisent pas toutes la même amplitude de changement climatique. Bien que semblables jusqu'en 2050 au niveau du réchauffement global projeté, elles diffèrent de quelques degrés à la fin du siècle et nous ne connaissons qu'à ce moment lesquelles sont les plus réalistes. En attendant, on parle d'incertitude pour qualifier les écarts entre les projections climatiques. Les causes de cette incertitude sont multiples. La plus importante pour la fin du siècle provient des écarts entre les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Comme nous l'avons vu à la section 3.2, les quantités de gaz à effet de serre émises dans les prochaines décennies dépendront de plusieurs facteurs. Pour l'instant, les hypothèses prises en compte à ce sujet sont toutes plausibles, même si certaines deviendront de plus en plus improbables avec le temps.

La seconde source d'incertitude provient des différences qui existent parmi la vingtaine de MCG ayant été développés dans le monde. Chaque modèle tente de reproduire les mêmes processus climatiques, mais le fait à sa façon, en utilisant des équations et des paramétrages qui lui sont propres.

Une autre source d'incertitude, moins importante que les deux précédentes, vient des conditions météorologiques initiales sur lesquelles le modèle s'appuie pour démarrer ses calculs. Différentes conditions initiales conduiront un même modèle utilisant un même scénario d'émissions de gaz à effet de serre à générer des projections climatiques légèrement différentes. De plus, chaque modèle est constamment amélioré et existe en différentes versions, chacune pouvant donner des résultats quelque peu différents : voilà une autre source d'incertitude. Enfin, nous avons vu qu'il existait plusieurs méthodes de réduction d'échelle spatiale pour augmenter la résolution des simulations climatiques. Ceci introduit encore une autre source d'incertitude au niveau des scénarios, qui est cette fois propre à la modélisation régionale du climat.

Que faire de toute cette incertitude inhérente aux scénarios climatiques ? La réponse est simple : il suffit de ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier et de tenir compte de toutes les projections. La solution préconisée est donc d'adopter une approche multiscénarios climatiques, en considérant plusieurs modèles climatiques, plusieurs versions de ces modèles, plusieurs scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, plusieurs méthodes de réduction d'échelle spatiale, etc. En suivant cette approche, nous disposons pour prédire le climat futur d'un éventail de scénarios climatiques dont on peut extraire la tendance centrale et une mesure de la variance. Si, malgré l'incertitude, ces scénarios vont tous dans le même sens, par exemple celui d'un réchauffement marqué de la température, on peut être confiant dans les projections.

Les biologistes sont habitués à composer avec la variabilité des systèmes vivants. Pour réfléchir aux effets des changements climatiques sur la biodiversité, il faut également composer avec la variabilité des projections climatiques.

3.6. Les climats du Québec à la fin du XXI^e siècle

D'après le GIEC (Solomon *et al.*, 2007), le système climatique terrestre devrait se réchauffer globalement de 1,1 °C à 6,4 °C pour la décennie 2090-2099 par rapport à la moyenne 1980-1999, selon les modèles climatiques et scénarios d'émissions considérés. Dans ce contexte, comment évolueront les climats du Québec durant le XXI^e siècle ?

Les scénarios de changements climatiques prévoient pour le Québec une augmentation des températures moyennes de 1,1 °C à 5,4 °C à l'horizon 2050 et de 1,9 °C à 8,2 °C à l'horizon 2080 (par rapport à 1961-1990) (voir la note au bas du tableau 2.2). Cette augmentation sera moins marquée en été qu'en hiver. Le nord de la province devrait subir un réchauffement plus prononcé, suivant la tendance déjà observée. Les modèles prévoient aussi des changements en précipitations,

avec une augmentation des précipitations plus marquée au nord qu'au sud en saison hivernale, entraînant ainsi une couverture neigeuse de plus en plus grande dans l'extrême nord. En été, les précipitations devraient peu changer au sud alors que le nord du Québec verrait, comme en hiver, ses précipitations augmenter.

Comme c'était le cas au cours des dernières décennies (voir le tableau 2.1), les changements climatiques à venir ne seront pas égaux pour toutes les écorégions du Québec (tableau 2.2). Ainsi, les écorégions de la moitié nord du Québec devraient connaître les plus fortes augmentations de température. Par contre, le nombre de degrés-jours de croissance devrait augmenter nettement plus dans les écorégions situées les plus au sud (tableau 2.2). Cet apparent paradoxe s'explique par le fait que seules les températures situées au-dessus de 5 °C sont incluses dans le calcul des degrés-jours de

croissance. Une partie du réchauffement nordique ne contribue donc pas à augmenter le nombre de degrés-jours de croissance.

Pour nous aider à interpréter plus facilement les projections des modèles, nous avons cartographié les endroits où l'on prédit pour 2080 un climat semblable (en termes de températures moyennes et de précipitations totales) à celui observé récemment à Montréal (figure 2.6, haut). Les résultats sont saisissants. En effet, les scénarios sont largement en accord sur le fait que le climat de Montréal se retrouverait beaucoup plus au nord, par exemple à Roberval, sur les pourtours du lac Saint-Jean. Certains scénarios prédisent même que le climat de Montréal pourrait se retrouver à Baie-Comeau.

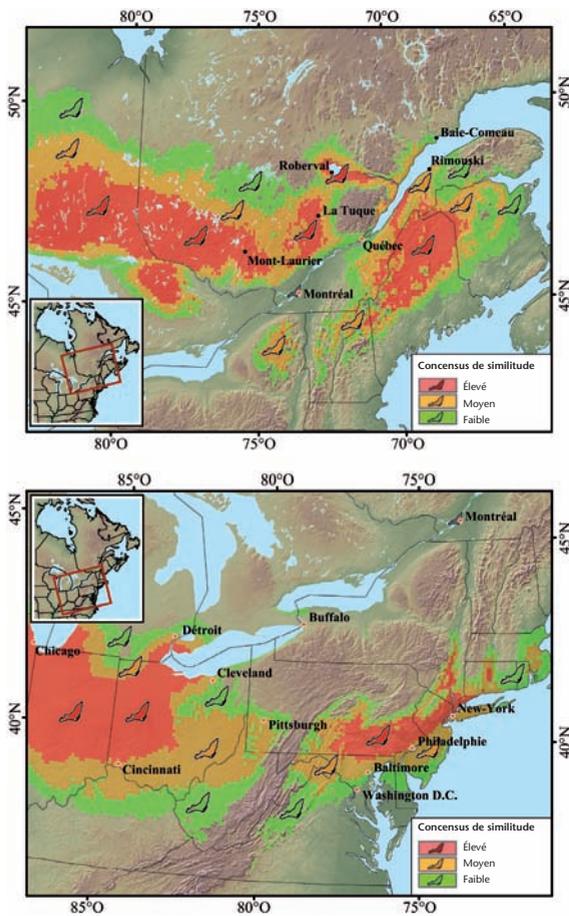
On peut maintenant se demander où se trouvait récemment le climat que Montréal devrait connaître à l'horizon 2080. Là encore, les résultats sont frappants, puisque les scénarios sont en accord

Tableau 2.2. Changements climatiques prévus entre 1961-1990 et 2071-2100 dans les six écorégions de niveau I du Québec

Écorégions	Température (en °C)	Précipitations (en mm)	Degrés-jours de croissance
Cordillère arctique	+ 4,1 ± 1,6	+ 100,0 ± 62,8 (+ 14,6%)	+ 206,2 ± 180,3 (+ 93,6%)
Toundra	+ 4,5 ± 1,5	+ 107,8 ± 48,0 (+ 17,8%)	+ 207,3 ± 189,1 (+ 108,9%)
Taïga	+ 3,9 ± 1,3	+ 115,4 ± 52,5 (+ 14,4%)	+ 338,9 ± 200,5 (+ 85,5%)
Plaines d'Hudson	+ 4,2 ± 1,3	+ 115,1 ± 52,0 (+ 14,7%)	+ 452,7 ± 228,7 (+ 72,0%)
Forêts septentrionales	+ 3,7 ± 1,1	+ 107,0 ± 48,7 (+ 11,1%)	+ 489,0 ± 216,5 (+ 56,7%)
Forêts tempérées de l'Est	+ 3,6 ± 1,1	+ 92,2 ± 48,0 (+ 8,7%)	+ 598,7 ± 233,4 (+ 45,9%)

Les mesures d'incertitude de la température annuelle moyenne, des précipitations annuelles totales et du nombre de degrés-jours de croissance correspondent aux écarts-types calculés sur 70 scénarios climatiques. Les augmentations relatives des précipitations et des degrés-jours de croissance (par rapport à la moyenne de la période 1961-1990) sont indiquées entre parenthèses. Les données ayant permis la réalisation du tableau proviennent de 70 scénarios climatiques issus de 15 MCG et du Modèle régional canadien du climat version 4, lesquels ont été couplés avec trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (familles A2, A1B et B1) et exécutés à partir de différentes conditions initiales. Ces scénarios climatiques issus des MCG proviennent du World Climate Research Programme's Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (Meehl *et al.*, 2007). Les données issues des MCG, initialement disponibles à une résolution horizontale d'environ 250 km × 250 km, et celles provenant du MRCC, disponibles à une résolution de 45 km × 45 km, ont toutes été interpolées par lissage spatial sur une grille de 20 km × 20 km (réduction d'échelle statistique). Les différences (ou « deltas ») de températures, précipitations et degrés-jours présentés dans le tableau correspondent aux écarts entre les valeurs prédites pour 2071-2100 et celles de la période de référence 1961-1990, simulées par le même modèle. Les valeurs données correspondent à la médiane des 70 deltas calculés. Dans le texte, les changements projetés pour 2050 et 2080 sur l'ensemble du territoire correspondent aux changements minimums et maximums calculés sur les 70 scénarios climatiques. À noter que les projections présentées dans ce livre sont très similaires à celles fournies dans Logan *et al.* (2011).

Figure 2.6. Illustration du déplacement prévu des climats dans le sud du Québec durant le xxi^e siècle



Carte du haut : localisation à la fin du xxi^e siècle du climat que l'on retrouvait sur l'île de Montréal en 1961-1990. Carte du bas : localisation en 1961-1990 du climat que l'on retrouvera à Montréal à la fin du xxi^e siècle. Les zones en rouge sont celles pour lesquelles les 70 scénarios climatiques utilisés présentent des projections similaires (consensus de similitude élevé). Celles en vert sont celles pour lesquelles les scénarios climatiques présentent des projections plus divergentes (consensus de similitude faible). Les silhouettes de l'île de Montréal qui apparaissent sur la carte ne servent qu'à illustrer l'idée du déplacement du climat de Montréal. Les données ayant permis la réalisation des cartes proviennent de deux sources différentes. Les données décrivant le climat pour la période 1961-1990 sont issues de McKenney et al. (2006) (voir la note au bas de la figure 2.1). Celles fournissant le climat pour 2071-2100 sont les mêmes que les données utilisées pour le tableau 2.2. Ces données ont été interpolées spatialement grâce au logiciel ANUSPLIN sur une grille d'une résolution horizontale de $10\text{ km} \times 10\text{ km}$. Pour chaque cellule et chacun des 70 scénarios climatiques, la distance entre les climats de la période 1961-1990 et de la période 2071-2100 a été calculée grâce à la méthode de Zech et Aslan (2003). Cette méthode permet de calculer une distance sur des données multidimensionnelles tout en intégrant la variabilité inter-annuelle (calcul réalisé sur les variables de températures moyennes et de précipitations totales mensuelles). Cette distance a par la suite été convertie en mesure de similarité (inverse de la distance). Enfin, pour chaque cellule, nous avons calculé la médiane des 70 mesures de similarité (une par scénario climatique) afin d'obtenir un consensus de similarité. Trois classes de consensus de similarité ont finalement été cartographiées. Les régions en rouge représentent le premier percentile des cellules avec les plus fortes valeurs de consensus de similarité. Les régions en orange correspondent au second percentile et les régions en vert, au troisième.

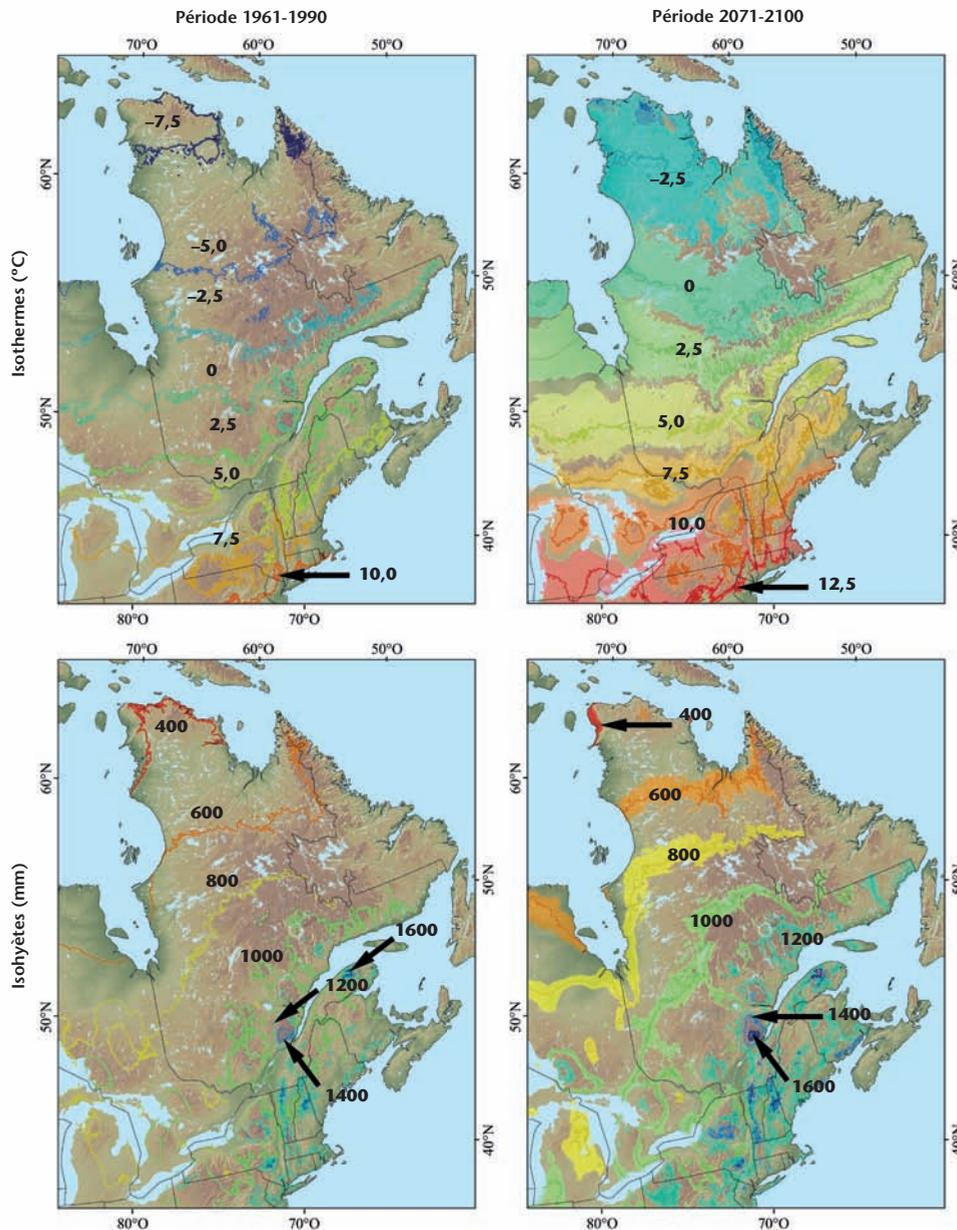
pour prédire que le climat de Montréal en 2080 devrait ressembler à celui qui régnait à Chicago ou à Philadelphie à la fin du xx^e siècle (figure 2.6, bas). Certains scénarios prédisent même qu'il pourrait ressembler à celui de Washington.

Une autre façon éclairante de représenter les changements climatiques consiste à tracer les isothermes (lignes reliant les endroits de même température) et les isohyètes (lignes reliant les points ayant les mêmes précipitations), puis à observer comment ils devraient migrer au cours du siècle. L'amplitude de ces migrations est stupéfiante (figure 2.7 et tableau 2.3). L'isotherme de $5\text{ }^\circ\text{C}$ qui caractérisait la température annuelle moyenne de

l'île de Montréal entre 1961 et 1990 devrait migrer 240 km plus au nord à l'horizon 2080, alors que l'isotherme des températures annuelles moyennes de $-2,5\text{ }^\circ\text{C}$ (actuellement au cœur de la forêt boréale) devrait migrer 750 km vers le nord et se retrouver dans le Haut-Arctique. Pour les isohyètes, les modifications sont moins spectaculaires, car l'amplitude des changements prévus est plus faible.

On comprend maintenant que les climats du Québec vont en quelque sorte se déplacer. Comme on le verra au chapitre suivant, les espèces essaieront de suivre ce mouvement général des conditions climatiques. Il est donc utile de terminer notre analyse des climats du Québec en étudiant la vitesse

Figure 2.7. Isothermes et isohyètes annuelles en 1961-1990 et 2071-2100 pour le Québec et sa périphérie



Les larges bandes de couleur sur les deux cartes de droite représentent les incertitudes des projections. Les données ayant servi à produire les deux cartes de gauche proviennent de Rehfeldt (2006). Il s'agit d'observations mensuelles faites à des stations météorologiques canadiennes et américaines entre 1961 et 1990. Ces données ponctuelles ont été interpolées spatialement grâce au logiciel ANUSPLIN sur une grille d'une résolution horizontale de 1 km × 1 km. Une fois interpolées, ces données ont été agrégées sur une grille de 20 km × 20 km. Les deux cartes de droite ont été réalisées grâce à 70 scénarios climatiques (voir la note au bas du tableau 2.2). Les bandes de couleur correspondent aux enveloppes d'incertitude délimitées par les 25^e et 75^e percentiles, alors que le trait plein correspond à la médiane calculée sur les 70 scénarios climatiques.

Tableau 2.3. Déplacements latitudinaux des isothermes annuelles entre 1961-1990 et 2041-2070 et entre 1961-1990 et 2071-2100

Isotherme	Déplacement pour 2050 (en km)	Déplacement pour 2080 (en km)
-5,0 °C	328 (243-364)	650 (373-?)
-2,5 °C	450 (221-560)	746 (522-887)
0,0 °C	142 (124-217)	313 (189-677)
2,5 °C	153 (137-212)	230 (198-327)
5,0 °C	142 (103-186)	240 (171-360)
7,5 °C	120 (90-161)	191 (150-318)
10,0 °C	104 (96-162)	197 (157-338)
12,5 °C	117 (81-145)	165 (142-274)

Les valeurs entre parenthèses correspondent aux mesures d'incertitude des projections. Les déplacements latitudinaux médians ont été calculés sur 70 scénarios climatiques (voir la note au bas du tableau 2.2). Les valeurs entre parenthèses correspondent aux 25^e et 75^e percentiles, respectivement.

de déplacement (ou vitesse) des climats du Québec. La vitesse climatique est un outil précieux pour les biologistes, mais qui est parfois difficile à comprendre. Disons, pour simplifier, qu'il s'agit de la vitesse à laquelle les isothermes se déplacent en chaque point du Québec.

La figure 2.8 illustre les étapes qui permettent de calculer la vitesse des climats du Québec entre la période récente et l'horizon 2080. Dans un premier temps (figure 2.8A), nous représentons les températures moyennes annuelles du Québec. Comme nous l'avons vu précédemment, elles diminuent en allant vers le nord. Dans un second temps (figure 2.8B), nous représentons la vitesse (en °C par année) à laquelle ces températures se réchaufferont au cours du siècle (aussi appelé « gradient temporel »). Comme nous l'avons également déjà vu, le climat se réchauffera plus vite au nord qu'au sud. Dans un troisième temps (figure 2.8C), nous représentons le gradient spatial des températures moyennes annuelles (en °C par km), c'est-à-dire la différence de température entre sites proches. Logiquement, ce gradient spatial est plus élevé en milieu montagneux, où l'on trouve des températures très différentes à quelques kilomètres de distance.

La vitesse climatique (figure 2.8D) dépend à la fois des gradients temporel et spatial de température. Elle augmente évidemment avec le gradient temporel (plus le réchauffement est rapide, plus les isothermes se déplacent vite), mais elle diminue avec le gradient spatial (le climat qui règne en un lieu pourra se retrouver à la fin du siècle en un lieu assez proche s'il y a de fortes différences climatiques entre ces deux endroits, par exemple en montagne). La figure 2.8D montre ainsi des vitesses très grandes dans l'ouest du Nunavik, mais assez faibles dans les Chics-Chocs. Un examen détaillé de cette carte donnerait une première indication des régions où le changement climatique exercera les plus fortes pressions de changement sur la répartition de la biodiversité.

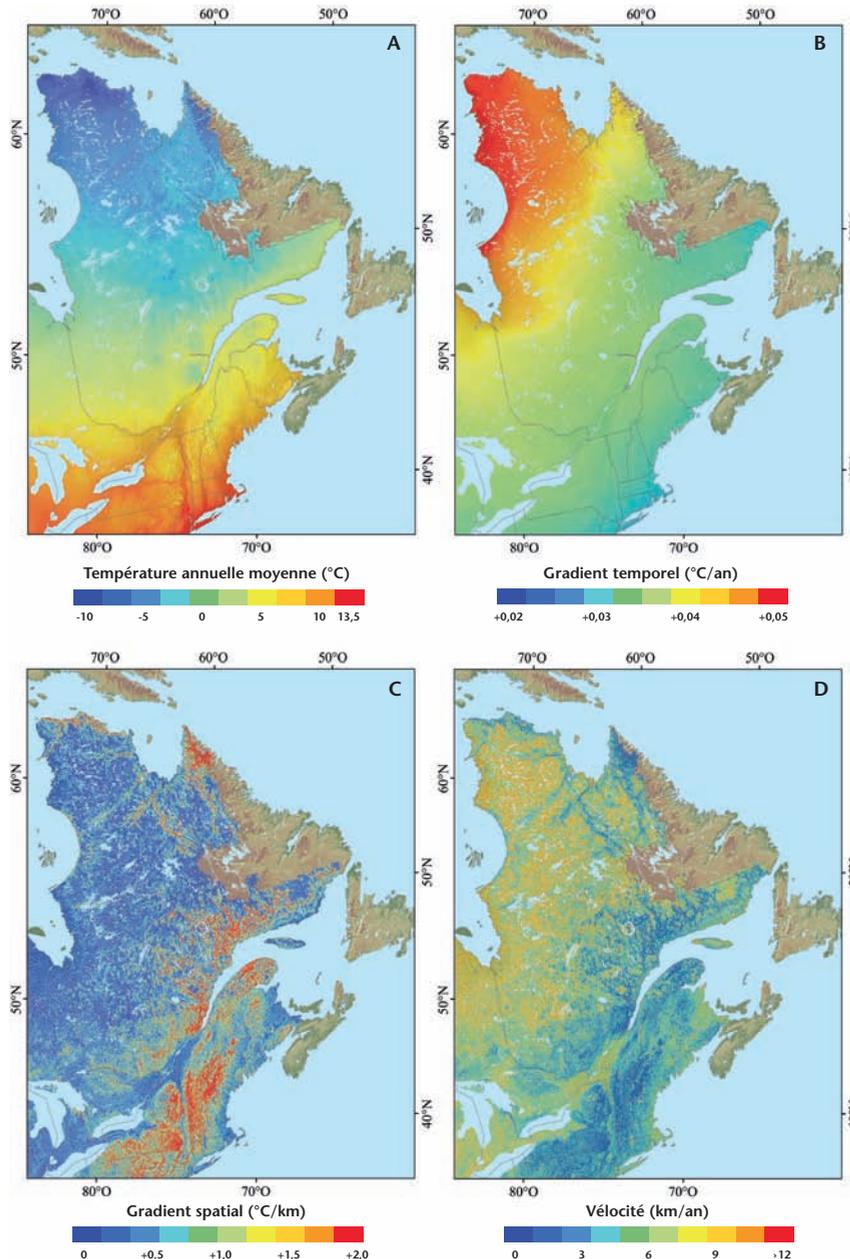
CONCLUSION

Notre compréhension du système climatique terrestre, combinée à l'énorme puissance de calcul maintenant disponible, nous permet de prédire les climats auxquels le Québec sera confronté dans moins d'un siècle, tout en identifiant le degré d'incertitude

associé aux prédictions. Un siècle, c'est la vie d'un arbre. En termes écologiques, c'est demain. Le prochain chapitre révélera à quel point les projections des climatologues nous forcent à une réflexion

profonde et urgente sur la trajectoire future de la biodiversité du Québec et sur le devenir de notre patrimoine naturel.

Figure 2.8. Gradients de température et vitesse climatique au Québec et dans certaines régions voisines entre 1961-1990 et 2071-2100



La carte A montre la température annuelle moyenne pour la période 1961-1990 à une résolution de 1 km × 1 km. Les données viennent de Rehfeldt (2006) (voir la note au bas de la figure 2.7). Nous avons créé la carte B en utilisant les deltas (voir la note au bas du tableau 2.2) des températures annuelles moyennes calculés entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100 pour chacun des 70 scénarios climatiques. Nous avons ensuite calculé, pour chaque cellule et chaque scénario, le taux de changement de la température moyenne en divisant la valeur de delta par le nombre d'années séparant les deux horizons temporels (soit 110 ans). Ces taux de changements ont par la suite été interpolés sur la grille de 1 km × 1 km pour chaque scénario climatique. La médiane a finalement été calculée pour résumer, en une seule valeur par cellule, l'ensemble des 70 valeurs de taux de changement de la température moyenne. La carte C montre le gradient spatial (°C/km) calculé à partir des données climatiques de Rehfeldt (2006) pour la période 1961-1990, à une résolution de 1 km × 1 km, en utilisant la fonction TIN slope d'ArcGIS. Nous avons produit la carte D en suivant la méthodologie de Loarie et al. (2009), qui divise le gradient temporel (carte B) par le gradient spatial (carte C). La résultante est la vitesse des changements climatiques pour la période 2071-2100, exprimée en km/an.

Le vin est de l'eau emplie de soleil.

Galilée

C H A P I T R E

L'IMPORTANCE BIOLOGIQUE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Dominique Berteaux, Nicolas Casajus et Sylvie de Blois

À RETENIR

- La température est le facteur climatique le plus structurant de la biodiversité du Québec. Les basses températures hivernales et la courte saison estivale limitent la répartition nordique de beaucoup d'espèces.
- Les précipitations imposent également des limites à la répartition des espèces, mais ces limites sont souvent influencées par la température à cause des phénomènes de gel et d'évaporation.
- Les relations entre espèces modulent les influences du climat sur la biodiversité. Ces relations biotiques sont complexes et brouillent les effets du climat sur les écosystèmes, surtout aux échelles locales.
- Le réchauffement climatique des dernières décennies a déjà influencé la biodiversité québécoise. Les événements printaniers des cycles de vie deviennent plus hâtifs et certaines espèces remontent vers le nord ou en altitude. Au nord du Québec, la structure même des écosystèmes est modifiée par la fonte du pergélisol.
- Cette signature écologique des changements climatiques est néanmoins encore difficile à détecter, car le suivi systématique de la biodiversité est trop peu organisé et dépend souvent du travail bénévole des naturalistes.
- Les isothermes subiront au cours du siècle un déplacement nordique de centaines de kilomètres. Cela soulève de nombreuses questions quant aux effets à venir des changements climatiques sur la biodiversité du Québec.
- Il existe donc un fort besoin d'anticiper les effets écologiques futurs des changements climatiques, ce qui crée des attentes importantes envers la communauté scientifique.

INTRODUCTION

Nous avons vu au premier chapitre que l'organisation géographique de la biodiversité était liée à la répartition des climats. Nous allons maintenant résumer les mécanismes biologiques qui expliquent cette correspondance. Une hypothèse importante va alors émerger : puisque le climat change au Québec depuis plusieurs décennies, nous devrions déjà pouvoir observer les effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec.

Nous évaluerons cette hypothèse grâce à des dizaines de milliers d'observations de plantes et d'animaux effectuées au Québec depuis plus de quatre décennies. Nous concluons que le patrimoine naturel du Québec a déjà commencé à se transformer sous l'effet des changements climatiques récents, et que l'ampleur des changements climatiques à venir laisse présager des effets plus importants encore. Nous serons alors prêts à aborder, dans les chapitres suivants, ce qui constitue notre principal objectif : anticiper les changements à venir.

1. LES MÉCANISMES D'INFLUENCE DU CLIMAT SUR LA BIODIVERSITÉ

Les influences du climat sur la biodiversité sont nombreuses et enchevêtrées. Un important manuel d'écologie ne suffirait pas à en faire le tour. Nous pouvons cependant isoler quelques principes universels ainsi que plusieurs éléments propres au territoire du Québec. La température et les précipitations sont clairement les facteurs climatiques dominants qui structurent la biodiversité sur la planète. Au Québec, c'est toutefois la température qui

joue un rôle prépondérant, en raison des climats froids de la province. De plus, la température est le facteur climatique qui changera le plus au cours de ce siècle. Nous expliquerons donc plus en détail le rôle qu'elle joue dans la répartition des espèces et la structuration de la biodiversité.

1.1. La température

Les protéines et l'ADN commencent à se dénaturer au-delà de 40 °C. Inversement, en deçà de 0 °C, la formation de cristaux de glace peut ralentir les processus vitaux et endommager les structures cellulaires. La gamme de températures favorables au foisonnement de la vie est donc limitée par des bornes imposées par la biochimie cellulaire. À l'intérieur de cette zone de tolérance, l'augmentation de la température accélère la vitesse de toutes les réactions chimiques (en accord avec la loi d'Arrhenius qui décrit la thermodynamique des réactions chimiques), et donc l'exécution par les organismes des fonctions essentielles de respiration, de photosynthèse, de digestion, de locomotion, de croissance, d'excrétion, etc. Ainsi, la température contrôle le métabolisme de tous les êtres vivants.

Au Québec, la température de l'air ne dépasse jamais 40 °C pendant plus de quelques heures

consécutives. Par contre, elle peut demeurer sous le point de congélation pendant des mois. Les basses températures imposent donc les limites les plus exigeantes pour la survie des espèces. On trouve ainsi au Québec à peu près toutes les adaptations au froid qui sont connues dans le monde vivant : des mécanismes permettant de supporter la congélation des fluides corporels, la production de glycérol servant d'antigel dans les cellules, des fourrures et couches de graisse isolantes, des migrations sur de grandes distances pour échapper à l'hiver, l'activité photosynthétique sous la neige, l'hibernation, la torpeur, etc.

Les hivers longs et rigoureux ne sont pas la seule contrainte des climats froids du Québec. Les étés courts et frais imposent également des limites, puisque l'essentiel de la croissance des organismes est confiné à cette brève période, ce qui entraîne une cascade de conséquences importantes pour les cycles de vie. La nordicité du Québec agit donc comme un filtre à l'établissement des espèces. Lors de la colonisation postglaciaire, la page de la biodiversité québécoise n'a pu être écrite que par les espèces adaptées aux climats froids. Parmi elles, seules quelques-unes ont pu parvenir jusqu'au nord du territoire, où les conditions sont les plus exigeantes. De nombreux exemples bien documentés illustrent les points qui précèdent.

En Amérique du Nord, la limite nordique de répartition hivernale des oiseaux passereaux est souvent corrélée avec les températures minimales moyennes de janvier (Root, 1988). Par exemple, elle correspond à un seuil d'environ -1 °C pour la paruline masquée, -9 °C pour le bruant à couronne blanche et -18 °C pour le chardonneret jaune. Cette limite est imposée par les besoins énergétiques des oiseaux à basse température. Lorsqu'il fait froid, un métabolisme élevé est nécessaire pour maintenir la chaleur corporelle, mais la capacité des oiseaux à trouver et digérer suffisamment de nourriture limite leur budget énergétique. Les caractéristiques écologiques et physiologiques étant propres à chaque espèce, celles-ci doivent composer avec des contraintes énergétiques qui leur sont également propres, d'où la grande disparité dans les limites nordiques de répartition hivernale.

Le même mécanisme s'applique à certains mammifères. Le petit polatouche est une des deux espèces d'écureuils volants du Québec. C'est un mammifère de petite taille qui vit la nuit et se déplace en planant d'arbre en arbre, ce qui l'expose à de grandes dépenses énergétiques lors des basses températures hivernales. Pour conserver l'énergie, les petits polatouches partagent des nids situés dans des arbres creux. Cependant, au-delà d'environ 45 degrés de latitude nord, la quantité d'énergie nécessaire au maintien de leur température corporelle dépasse leur capacité de production de chaleur, même en groupe (Stapp *et al.*, 1991).

Contrairement aux oiseaux et aux mammifères, les insectes n'ont pas de mécanisme de régulation interne de la température, bien que les abeilles et les papillons de nuit puissent produire de la chaleur par contraction musculaire. Leur survie hivernale est donc encore plus directement dépendante de la température ambiante. Par exemple, le seuil de température en dessous duquel meurent 50% des individus du sachem, un petit papillon orangé présent dans le sud du Québec, est d'environ -6 °C (Crozier, 2003). Le papillon monarque, quant à lui, ne résiste pas du tout au gel et doit quitter le Québec avant l'hiver. La tordeuse du bourgeon de l'épinette, par contre, est capable de produire du glycérol qui empêche ses fluides corporels de geler, ce qui lui permet de survivre à de très basses températures.

Les animaux qui hibernent n'échappent pas non plus aux contraintes de l'hiver. Même s'ils jeûnent, restent immobiles et diminuent leur température corporelle pendant la saison froide, la quantité de graisse emmagasinée en automne, la température de l'hibernacle et la longueur de la période d'hibernation doivent être précisément ajustées. Trop peu de réserves, un refuge trop froid ou un hiver trop long entraînent la mort. Chez la petite chauve-souris brune, la connaissance détaillée de tous ces paramètres permet de savoir où se trouvent les habitats les plus nordiques où l'espèce peut hiberner : au Québec, il s'agit de la moitié sud de la forêt boréale (Humphries *et al.*, 2002).

La relation entre la température et la survie est parfois plus subtile. Ainsi, chez la spongieuse, un

autre papillon présent au Québec (bien qu'introduit), les chenilles ont, en dessous de 10 °C, un métabolisme assez bas pour supporter le jeûne. Elles doivent cependant impérativement se nourrir de feuilles tendres et nutritives dès que la température dépasse ce seuil, sinon elles meurent de faim. Les printemps très hâtifs qui amènent de beaux jours avant que les feuilles n'apparaissent déciment ainsi les populations (Hunter, 1993). Un phénomène analogue se produit chez de nombreuses espèces de plantes : un réveil trop tôt au printemps, entraîné par des chaleurs inhabituelles, provoque le débournement des bourgeons qui meurent ensuite si un gel tardif survient.

Chez les plantes, des processus physiologiques complexes de préparation à l'hiver sont nécessaires pour que les individus survivent en période froide. Cette acclimatation saisonnière permet par exemple à un rameau de saule de survivre à des températures inférieures à -100 °C si on l'expose expérimentalement à ces températures en hiver, alors que le même rameau meurt à -5 °C si on fait le test en été (Sakai, 1970). L'acclimatation à l'hiver se fait en plusieurs étapes, qui marquent notamment l'arrêt de la croissance, la redistribution de l'eau et des glucides, l'altération chimique des membranes cellulaires et

la concentration de certaines molécules (Halfpenny et Ozanne, 1989). L'ampleur de ces transformations et leur degré d'efficacité varient beaucoup entre espèces. Cela entraîne de grandes différences dans la rigueur des hivers que les plantes peuvent supporter, avec des effets évidents sur leur répartition. Par exemple, les bourgeons de l'épinette blanche, que l'on trouve à la limite nordique des arbres au Québec, survivent à des températures de -80 °C. Ceux du frêne de Pennsylvanie résistent jusqu'à -30 °C; les populations québécoises les plus nordiques ne se trouvent donc pas au-delà du lac Saint-Jean. Quant aux bourgeons du chêne vert, ils meurent en dessous de -8 °C et la répartition de l'espèce n'atteint même pas le Québec (Sakai et Weiser, 1973; Farrar, 1996). Ces différences entre espèces ont de grandes implications en agriculture, horticulture et jardinage, si bien que des zones de rusticité ont été définies pour toutes les plantes cultivées (encadré 3.1).

Les exemples illustrant les contraintes imposées par les fraîches températures estivales sont tout aussi nombreux. Beaucoup d'espèces de plantes ont besoin d'un certain nombre de degrés-jours pour produire des graines. Si le besoin est de 1 200 degrés-jours, comme pour l'épinette blanche

Encadré 3.1. LES ZONES DE RUSTICITÉ DES PLANTES

Les jardiniers connaissent bien les zones de rusticité des plantes. Au Québec, ces zones sont numérotées de 0 à 5, chaque catégorie étant divisée en trois niveaux (a, b, c). La région de Montréal est dans la zone 5a alors que le nord du Nunavik est dans la zone 0 (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2008). Chaque zone est propice à la survie de certaines espèces végétales et les zones de rusticité de chaque espèce cultivée sont indiquées dans les manuels d'horticulture. Ce système très pratique de classification est la meilleure illustration de la grande dépendance des plantes envers la température. La première carte des zones de rusticité de l'Amérique du Nord fut publiée par le ministère de l'Agriculture des États-Unis en 1960 et ne tenait compte que des températures hivernales minimales. En 1967, Agriculture Canada a créé une carte des zones de rusticité du Canada en utilisant des données sur la survie de différentes espèces végétales et en tenant compte d'un plus grand nombre de facteurs climatiques, comme les températures hivernales minimales, la durée de la période sans gel, les précipitations estivales, les températures maximales, l'enneigement, les pluies de janvier et la vitesse maximale des vents. Récemment, le Service canadien des forêts et Ressources naturelles Canada ont mis à jour la cartographie de ces zones de rusticité en intégrant des données climatiques plus récentes (1961-1990) (McKenney *et al.*, 2001).

(les degrés-jours sont définis dans cet exemple par la somme des températures moyennes quotidiennes des jours où celles-ci sont supérieures à 5 °C), la formation des graines peut se faire grâce à 100 jours à 12 °C, 80 jours à 15 °C, ou toute autre combinaison totalisant 1 200 degrés-jours. Quand la saison de croissance est trop courte, l'accumulation de ressources est insuffisante pour que le cycle de reproduction, de la fleur à la graine, soit complet. Ainsi, dans les environnements arctique et alpin, les plantes annuelles sont peu communes et beaucoup d'espèces pérennes ne se propagent que de façon végétative. C'est le cas des épinettes noires et blanches à la limite des arbres dans le nord du Québec. Les individus les plus avancés dans la toundra, poussés à la limite de leur potentiel de croissance verticale, adoptent des formes rabougries (les *krummholz*) qui ne se propagent que par marcottage: les branches les plus basses s'enracinent, puis produisent de nouvelles tiges plus ou moins érigées qui à leur tour formeront des branches qui s'enracineront, et ainsi de suite (Payette et Lavoie, 1994).

Les insectes fournissent aussi de bons exemples pour illustrer les contraintes imposées par les fraîches températures estivales. Au Québec, les adultes des odonates (libellules et demoiselles) ont une vie aérienne de courte durée destinée à la reproduction (Pilon et Lagacé, 1998). La température de l'eau au printemps conditionne le développement larvaire et influence la date d'émergence des adultes, alors que la température de l'air automnal détermine pour sa part la fin de la saison de vol (Savard, 1986). Ces mécanismes de contrôle sont différents pour chaque espèce, si bien qu'un calendrier d'observations permet aux naturalistes de savoir quand rechercher chaque espèce. Par exemple, une cinquantaine d'espèces d'odonates fréquentent le marais Léon-Provancher dans la région de Québec. Les espèces les plus printanières y émergent à la mi-mai, alors que les plus tardives volent jusqu'au début novembre (Perron et Ruel, 2002). Entre ces deux dates s'étalent les saisons de vol de chaque espèce.

La température est également l'un des principaux facteurs environnementaux influençant la croissance, la fructification, la production de spores, la mobilité et la survie des microorganismes. En fait,

les microorganismes ont souvent été utilisés pour étudier en laboratoire les effets de la température sur les processus biologiques. Un cas bien connu au Québec est celui des cyanobactéries (souvent appelées algues bleues) qui sont présentes dans tous les plans d'eau québécois. Leur croissance est lente dans les eaux froides, mais s'accélère aux températures plus élevées, au point de former parfois d'imposants agrégats toxiques (les « fleurs d'eau ») quand les eaux sont calmes et riches en nutriments (GRIL, 2007; Vescovi *et al.*, 2009).

La température est donc, au Québec, un facteur extrêmement important de la présence et de l'abondance d'une espèce donnée en un lieu donné. Elle joue un rôle de premier plan dans la richesse et la composition de la biodiversité de chacune des régions du Québec. On peut se demander quelles sont les mesures de température les plus pertinentes pour expliquer les limites de répartition d'une espèce. Les températures journalières minimales, maximales ou moyennes? Les températures hivernales, estivales ou printanières? Il n'y a pas de règle absolue. Suivant les mécanismes biologiques en cause, tous ces aspects de la température peuvent limiter la présence et l'abondance d'une espèce. Ce sera un point à retenir quand viendra le temps d'anticiper les effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec.

1.2.

Les autres facteurs climatiques

L'eau constitue plus de 80% du contenu des cellules et joue un rôle essentiel dans la plupart des processus métaboliques. C'est l'eau qui permet la circulation dans les organismes des solutés, des gaz, des sels et des matières en suspension. Elle est aussi un outil crucial du contrôle de la température corporelle pour les individus, car elle conduit rapidement la chaleur et absorbe beaucoup d'énergie quand elle s'évapore. La régulation des flux d'eau est donc une priorité pour tous les êtres vivants, ce qui fait des précipitations un facteur climatique important pour la biodiversité.

Bien qu'aucune région québécoise ne souffre d'un déficit de précipitations qui la qualifierait de désert, au moins trois raisons font de l'eau un facteur limitant pour de nombreuses espèces. Premièrement, les grands froids imposent de fortes contraintes hydriques puisque l'air sec, souvent combiné aux forts vents et à l'importante radiation solaire, déshydrate les tissus au moment où l'eau liquide n'est pas disponible pour remplacer les pertes par évaporation (Marchand, 1996). Les limites latitudinales et altitudinales des arbres dépendraient en partie de ce facteur : à cause des basses températures estivales, les feuilles ne peuvent pousser assez vite pour produire une épaisse cuticule, ce qui les expose à la déshydratation quand les basses températures hivernales provoquent l'assèchement de l'air et le gel du sol (Tranquillini, 1979).

Deuxièmement, la relation entre les précipitations et la température détermine l'importance des chutes de neige, de même que la persistance, l'épaisseur et la densité de la couche de neige au sol. Les effets de la neige varient selon les espèces. Elle est indispensable à la survie hivernale de petits mammifères, de plantes herbacées et d'arthropodes, car elle les protège des températures extrêmes. Mais elle constitue un important facteur limitant pour d'autres espèces. Une couche supérieure à une trentaine de centimètres empêche le cerf de Virginie de se déplacer pour se nourrir et de fuir les prédateurs. Les hivers très enneigés entraînent de fortes mortalités à sa limite nordique de répartition (Potvin *et al.*, 1981).

Troisièmement, certaines espèces, comme les amphibiens ou les plantes de marais (et *a fortiori* toutes les espèces aquatiques), ont de très fortes exigences en eau qui les rendent strictement dépendantes des milieux humides. Or, l'existence de ces milieux reflète un équilibre entre les précipitations et l'évaporation. Une baisse des premières ou une augmentation de la dernière peut assécher les milieux.

On voit que les effets des précipitations sur la répartition des espèces dépendent souvent de la température qui, sous nos climats, fait fréquemment passer l'eau de l'état solide à l'état liquide ou de

l'état liquide à la vapeur. Les relations qu'entretiennent les organismes vivants avec l'eau peuvent donc moduler fortement les effets du réchauffement climatique sur la biodiversité.

Outre la température et les précipitations, d'autres facteurs climatiques, comme le vent, affectent directement la biodiversité en limitant la présence de certaines espèces en certains lieux. La combinaison des variables climatiques détermine également des processus physiques d'une importance primordiale pour le fonctionnement des écosystèmes et la diversité des espèces qui les constituent. Par exemple, la présence de pergélisol et la fréquence des feux, qui façonnent les écosystèmes nordiques, découlent directement du climat. Les influences directes du climat sur la biodiversité sont donc nombreuses. Il existe cependant aussi, comme le montre la prochaine section, beaucoup de chemins indirects qui lient la biodiversité au climat.

1.3.

Les nombreux effets indirects

Les effets indirects du climat sur la biodiversité découlent souvent des interactions biotiques. En rendant possible ou impossible la survie d'une espèce en un lieu donné, ou en influençant son abondance, le climat déclenche une cascade d'effets sur d'autres espèces.

La compétition, la prédation, l'herbivorie, le mutualisme et le parasitisme sont les principaux types de relations qu'entretiennent entre eux les organismes vivants. Ces relations amplifient ou atténuent les effets directs du climat sur chaque espèce. Par exemple, les trichogrammes sont de petites guêpes parasitoïdes qui s'attaquent aux œufs d'autres insectes, ce qui peut se traduire par des effets marqués sur leurs populations. On les utilise d'ailleurs au Québec en lutte biologique. Cependant, leur efficacité dépend de la température et de l'humidité de l'air (Bourchier et Smith, 1996) : la guêpe se déplace plus rapidement quand il fait chaud et sec et elle pond, dans ces conditions, plus d'œufs dans ceux des espèces hôtes.

Les relations entre espèces sont si nombreuses dans un écosystème qu'il est impossible de toutes les représenter en une seule image (figure 3.1). Comme un grand nombre de ces relations sont sensibles au climat, on anticipe déjà qu'il sera impossible de prédire parfaitement les effets des changements climatiques sur tout un écosystème.

1.4. Des mécanismes menant à une hypothèse simple et claire

Nous arrivons maintenant à un tournant dans la longue histoire naturelle et scientifique que ce livre raconte. Le chapitre 1 a bien montré la richesse de la biodiversité du Québec et les grandes différences régionales qui caractérisent cette biodiversité. Il a aussi décrit les fortes corrélations observées entre la température et la biodiversité. Le chapitre 2 a brossé le tableau des climats du Québec en insistant sur les changements climatiques en cours et à venir. Nous avons vu que les climats sont véritablement en train de se déplacer (principalement vers le nord) et que l'ampleur de ces déplacements risque d'être spectaculaire au cours du XXI^e siècle. Nous avons alors commencé à entrevoir que le changement du climat pourrait avoir des répercussions sur la biodiversité du Québec. Le début du chapitre 3 a exposé les mécanismes biologiques qui, au Québec, lient la biodiversité aux climats. Il a renforcé notre conviction que le changement climatique est un facteur essentiel à prendre en compte pour comprendre les transformations à venir de la biodiversité québécoise.

Puisque le changement climatique n'est pas un phénomène lointain qui se produira un jour, mais une réalité dans laquelle nous sommes déjà plongés, nous pouvons maintenant logiquement faire l'hypothèse que les changements climatiques récents ont déjà eu des effets sur la biodiversité québécoise. Cette hypothèse scientifique, simple et claire, découle de tout ce que nous venons de voir depuis le début du livre. Nous allons l'évaluer dans la section qui suit.

2. LES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DÉJÀ OBSERVÉS AU QUÉBEC

Nous progresserons en quatre étapes pour évaluer l'hypothèse de la section 1.4. Dans un premier temps, nous rappellerons quelles sont les deux conditions nécessaires au soutien de cette hypothèse: il faut d'abord montrer que des changements écologiques ont eu lieu récemment au Québec (c'est la détection), puis il faut prouver que ces changements sont causés par la modification du climat (c'est l'attribution). Dans un deuxième puis un troisième temps, nous analyserons deux réponses universelles au changement climatique, largement documentées dans le monde, soit l'avancée de la phénologie printanière et le déplacement nordique (ou altitudinal) des aires de répartition. Enfin, nous tenterons de déceler si des changements écosystémiques importants ont eu lieu au Québec dans les dernières décennies à cause des changements climatiques.

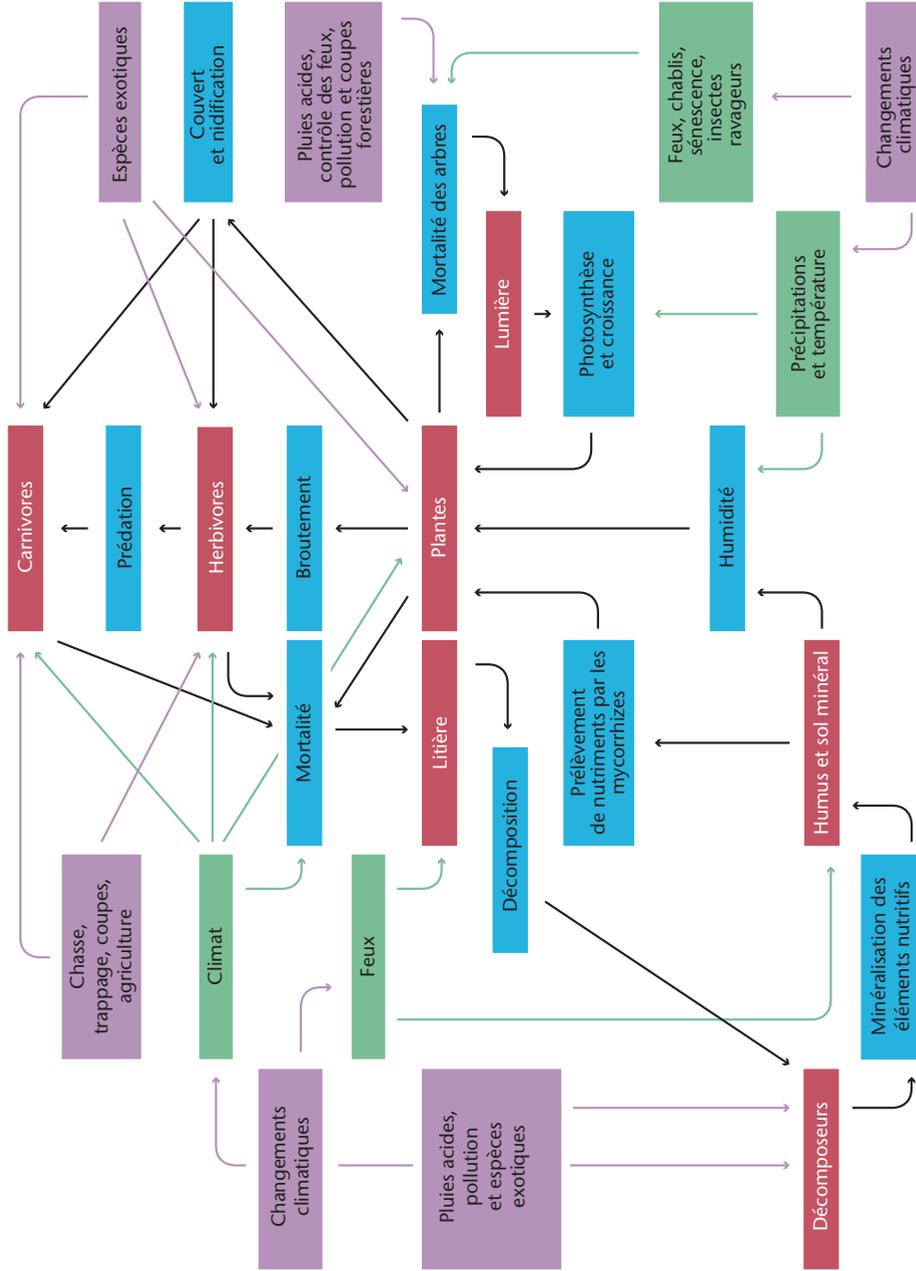
2.1. Les difficultés de détection et d'attribution

La détection des changements écologiques, puis leur attribution aux changements climatiques posent de sérieux défis aux scientifiques. L'énumération des principales difficultés nous aidera ensuite à mieux analyser les éléments soutenant ou réfutant notre hypothèse.

Les difficultés de détection

Difficulté de détection n° 1: il n'existe à peu près aucune étude s'étalant sur plusieurs dizaines d'années dont l'objectif de départ était de détecter les effets écologiques des changements climatiques. Ceci

Figure 3.1. Interactions écologiques et influences climatiques dans un écosystème forestier du sud du Québec



Les composantes (cases rouges) et les processus (cases bleues) de l'écosystème apparaissent au centre, alors que les agents naturels (cases vertes) et anthropiques (cases mauves) de contrôle et de perturbation apparaissent à la périphérie. Cette figure complexe a demandé une réflexion approfondie par de nombreux experts. Elle n'est pourtant qu'une simplification grossière de la réalité.

Source : Claude Samson (communication personnelle), Agence Parcs Canada, Division de la surveillance et de l'information écologique.

s'explique par la relative nouveauté de cette question. Quelques solutions permettent de contourner la quasi-absence de longues études consacrées à la détection des effets des changements climatiques. On peut utiliser des données de suivis écologiques qui furent initialement mis en place pour d'autres raisons que l'étude des changements climatiques. On peut aussi analyser les observations de naturalistes, si elles ont été archivées dans des banques de données ou dans des musées tels que des herbiers ou des collections d'insectes (Lavoie, 2013). Il existe enfin des techniques, comme la dendrochronologie ou la palynologie, qui permettent de remonter dans le temps. Cela dit, les programmes de suivi destinés à détecter les effets écologiques des changements climatiques peuvent apporter des informations irremplaçables (Lepetz *et al.*, 2009), surtout quand ils incluent des mesures détaillées de la physiologie des organismes et des microclimats.

Difficulté de détection n° 2 : la plupart des changements écologiques sont lents à l'échelle d'une vie humaine. Ceci s'ajoute à la difficulté n° 1 et impose des contraintes importantes à la faisabilité des solutions proposées, puisque des données récoltées sur de nombreuses années sont nécessaires pour mettre en évidence les effets écologiques des changements climatiques.

Difficulté de détection n° 3 : il existe beaucoup de variabilité dans la nature. Ce que l'on observe à un endroit diffère souvent de ce que l'on observe ailleurs (variation spatiale). Ce que l'on observe à un moment diffère souvent de ce que l'on observe à un autre moment (variation temporelle). Par exemple, il y a souvent dans les tendances à long terme des ralentissements, des pauses, voire des renversements passagers. Ces variations brouillent les signaux du changement à long terme. Une solution consiste à ne retenir pour analyse que les données de grande ampleur spatiale (plusieurs régions) et temporelle (plusieurs décennies). Les signaux biologiques importants ressortent alors du bruit de fond causé par la variation biologique. Cela restreint cependant, encore une fois, le nombre de séries temporelles disponibles pour l'analyse.

Difficulté de détection n° 4 : il n'y a pas de règle absolue pour déterminer ce qui constitue une tendance claire. Un changement de 0,001 % par décennie d'une variable biologique apparaîtrait comme un effet négligeable des changements climatiques, alors qu'un changement de 100 % serait évidemment jugé important. Mais qu'en est-il d'un changement de 1 % ? Une solution consiste à parler de tendance claire quand cette tendance aurait eu peu de chances de se produire par hasard (elle est alors statistiquement significative) et qu'elle dépasse la variabilité habituelle. Encore faut-il connaître la variabilité naturelle, ce qui peut être ardu.

Les difficultés d'attribution

Difficulté d'attribution n° 1 : le changement climatique n'est pas le seul facteur pouvant entraîner des modifications écologiques. La perturbation des habitats par les humains explique par exemple le changement de répartition de nombreuses espèces. Une corrélation entre un changement écologique et un changement climatique n'est donc pas suffisante pour conduire à une attribution certaine (Bertheaux *et al.*, 2006). Une solution consiste à réaliser des expériences pour prouver que le changement écologique observé est bien causé par le changement du climat. Malheureusement, c'est seulement possible à des échelles temporelles et spatiales restreintes, ce qui limite la portée des questions qui peuvent être étudiées. Une autre solution consiste à faire des analyses statistiques sophistiquées pour démontrer que la corrélation ne peut être expliquée que par une relation de cause à effet. Là encore, c'est difficile, car les jeux de données appropriés pour ces analyses sont rares. Enfin, on peut examiner une à une les causes possibles du changement écologique détecté, éliminer par raisonnement toutes celles qui sont improbables, et évaluer si la seule qui reste en lice est le changement climatique. Cette démarche n'est pas parfaite, mais elle gagne en crédibilité si le même changement écologique est observé à maintes reprises et que la conclusion quant à ses causes est toujours la même. La cohérence de la signature écologique des changements climatiques entre régions

et groupes taxonomiques donne ainsi une valeur de quasi-preuve aux corrélations observées (Berteaux, 2005). La démonstration est de plus renforcée si on comprend bien quels mécanismes biologiques sont susceptibles de lier le changement écologique et le changement climatique.

Difficulté d'attribution n° 2: les exemples suggérant un effet écologique des changements climatiques sont plus souvent publiés dans la littérature scientifique que ceux suggérant une absence d'effet. Un chercheur est par exemple plus motivé à rédiger un article s'il observe un changement de répartition nordique (en parfait accord avec nos attentes concernant les effets du réchauffement climatique), que s'il n'observe aucun changement. L'accumulation de tels biais de publication est renforcée quand le processus d'acceptation des articles favorise les résultats « positifs » par rapport aux résultats « négatifs ». Ces biais sont bien connus en science (Berteaux *et al.*, 2007). Ils peuvent influencer les conclusions des synthèses bibliographiques et induire en erreur la communauté scientifique concernant l'attribution d'une réponse biologique au changement climatique. La réplication des études et l'examen critique des preuves sont la principale solution à cette difficulté d'attribution.

L'énumération des difficultés qui précède pourrait sembler quelque peu décourageante. Il faut toutefois plutôt la voir comme un éveil à l'esprit critique face à l'analyse d'un phénomène complexe, ainsi que comme une invitation à améliorer les outils scientifiques dont nous disposons pour détecter les changements écologiques survenant au Québec et, le cas échéant, les attribuer aux changements climatiques.

2.2. Les changements de phénologie des espèces

Le changement du climat dans une région peut avoir trois effets sur les populations d'êtres vivants qui y sont établies. Celles-ci peuvent subsister dans la région en s'ajustant aux nouvelles conditions, elles peuvent disparaître de la région et se reformer

ailleurs par dispersion de certains individus, ou elles peuvent disparaître totalement si elles ne réussissent ni à s'ajuster ni à se déplacer.

L'ajustement d'une population à de nouvelles conditions peut faire intervenir deux mécanismes. Le premier, l'acclimatation des individus (ou plasticité phénotypique), représente la tolérance naturelle des individus à des conditions climatiques variables. Le second, l'adaptation, représente l'évolution rapide de la population par sélection naturelle. À l'échelle de temps de quelques décennies qui nous intéresse, la plasticité phénotypique est le mécanisme d'ajustement le plus influent, même si une microévolution rapide peut aussi parfois être mise en évidence (Berteaux *et al.*, 2004).

La phénologie décrit les phénomènes périodiques qui marquent le cycle de vie des espèces au cours de l'année (floraison, feuillaison, fructification, arrivée et départ des oiseaux migrateurs, nidification, entrée en hibernation, etc.). Dans les climats où les saisons d'activités optimales sont courtes, la phénologie printanière arrive en tête de liste de tous les caractères biologiques qui doivent s'ajuster rapidement à un signal climatique. En effet, la date à laquelle débutent au printemps les processus de croissance et de reproduction a de grands effets sur la capacité des individus à survivre ou à se multiplier. Les individus trop en avance sont menacés par les gels tardifs ou le manque de nourriture. Les retardataires sont quant à eux désavantagés dans la compétition avec leurs congénères, ou ils risquent de manquer de temps pour achever certaines étapes de leur cycle vital. Par exemple, les dates de floraison, de ponte, de débourrement des bourgeons, d'arrivée migratoire, de sortie d'hibernation et de premiers chants conditionnent fortement les chances de réussir à produire des descendants viables, à emmagasiner suffisamment de réserves avant l'hiver, à trouver des partenaires sexuels ou à maintenir un territoire.

La phénologie est en général facile à mesurer et constitue donc un paramètre commun à de nombreuses études. L'analyse des informations publiées montre une forte réponse aux changements climatiques à l'échelle mondiale (Walther *et al.*, 2002;

Parmesan et Yohe, 2003; Root *et al.*, 2003). En effet, bien que l'amplitude des avancées printanières mesurées soit très variable selon les espèces, les méta-analyses citées ci-dessus, qui portent sur des centaines d'études, obtiennent des moyennes d'avancement de l'ordre de 2 à 5 jours par décennie. La phénologie printanière est ainsi devenue une signature biologique universelle du réchauffement de la planète. Notons que la phénologie automnale est également modifiée par le réchauffement climatique, une majorité d'études montrant un retardement des événements, en bon accord avec l'allongement des saisons de croissance (voir Kausrud *et al.*, 2008, pour un exemple traitant des champignons en Europe).

Au Québec, les données de phénologie printanière disponibles sont conformes aux données planétaires résumées ci-dessus. Chez les plantes, Lavoie et Lachance (2006) et Houle (2007) ont étudié les

changements des dates de floraison de plusieurs espèces en analysant les spécimens entreposés dans des herbiers. Lavoie et Lachance (2006) se sont concentrés sur les dates de floraison d'une des plantes les plus précoces du sud du Québec, le tussilage pas-d'âne (figure 3.2). En analysant plus de 200 spécimens récoltés au Québec entre 1920 et les années 2000, ils ont montré que cette espèce fleurit 15 à 31 jours plus tôt maintenant qu'au début du xx^e siècle, une avancée comparable à celle observée en Europe pour la même espèce. Cette forte tendance n'a toutefois été observée que dans les grandes villes (Montréal, Québec), où l'urbanisation a localement amplifié le réchauffement climatique. Houle (2007) a fait un exercice similaire avec 18 espèces de plantes herbacées des régions de Gatineau-Ottawa, Montréal et Québec (la figure 3.2 montre trois de ces espèces: la dicentre capuchon-jaune, le trille blanc et le trille rouge). Les dates de floraison ont globalement avancé de 2 à 6 jours en 100 ans,

avec des variations notables entre régions et espèces. Dans une étude du même type réalisée au Massachusetts, Primack *et al.* (2004) ont montré une avancée des dates de floraison d'environ 8 jours entre 1900-1920 et 1980-2002. Dans ces deux dernières études, l'effet des îlots de chaleur créés par les villes pouvait être prépondérant, car tous les spécimens provenaient de régions urbaines.

Nous ne connaissons pas de recherche publiée quant aux effets des changements climatiques sur la phénologie des populations animales du Québec. Nous avons cependant, dans le cadre du projet CC-Bio, analysé les informations contenues dans deux bases de données (encadré 3.2) rassemblant les observations d'oiseaux (Étude des populations d'oiseaux du Québec) et celles d'amphibiens et de reptiles (Atlas des amphibiens et des reptiles du Québec).

Figure 3.2. Quatre espèces de plantes dont la floraison au Québec est devenue plus précoce durant le xx^e siècle



Sources: Tussilage pas-d'âne (en haut à gauche) = Andreas Trepte (<<http://www.bien-etre-naturel.info/plantes/tussilage.html>>, consulté le 10 septembre 2013); Dicentre capuchon-jaune (en haut à droite) = Jacques Brisson; Trille blanc (en bas à gauche) = Jacques Brisson; Trille rouge (en bas à droite) = Francine Riez.

Encadré 3.2. L'APPORT PRÉCIEUX DES NATURALISTES

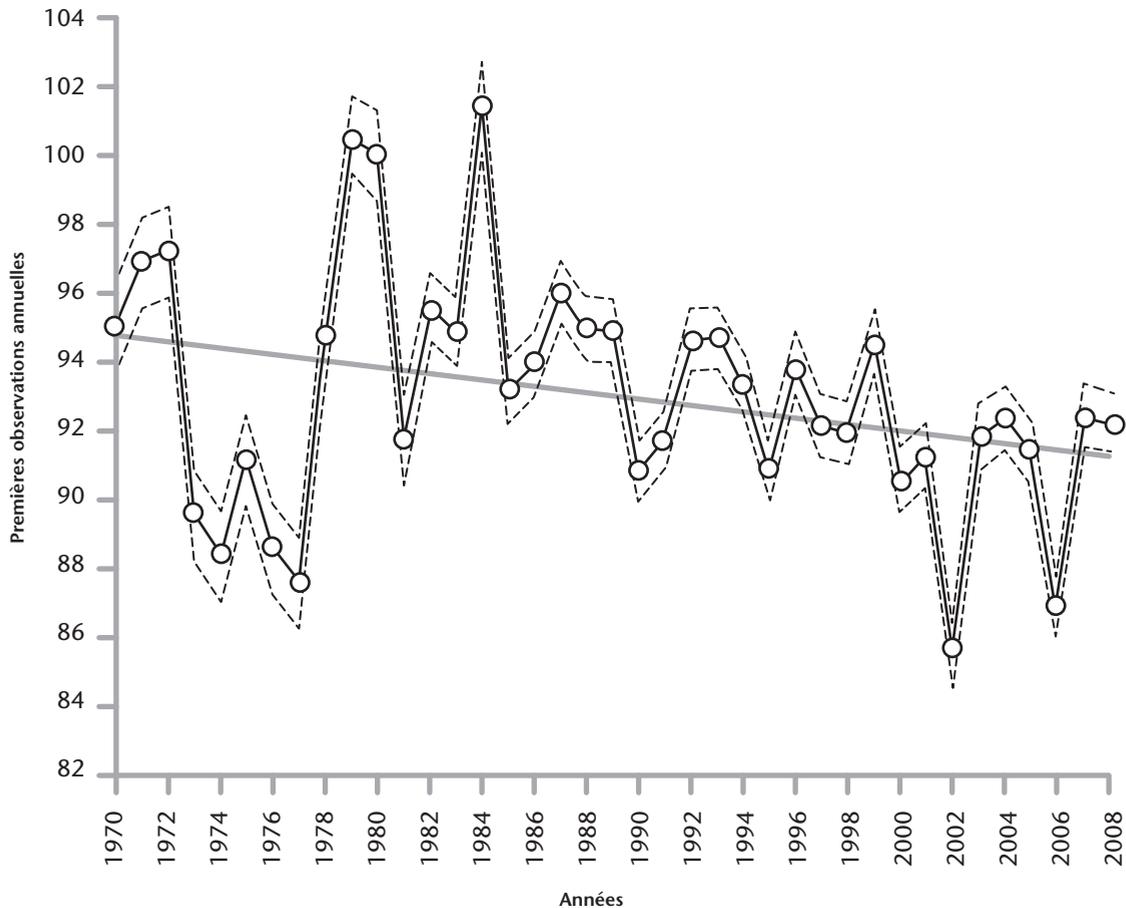
La détection des effets écologiques des changements climatiques est difficile, car elle demande de nombreuses observations précises étalées sur des dizaines d'années. Or, les suivis écologiques à très long terme sont rares. La communauté scientifique est en effet soutenue par des subsides de courte durée exigeant des résultats rapides, alors que les institutions gouvernementales priorisent rarement les programmes de suivi écologique. Dans ce contexte, les observations naturalistes archivées prennent une valeur inestimable. L'Étude des populations d'oiseaux du Québec (ÉPOQ) et l'Atlas des amphibiens et des reptiles du Québec (AARQ) sont deux exemples remarquables de banques de données acquises par des naturalistes. ÉPOQ (<<http://www.oiseauxqc.org/epoq.jsp>>, consulté le 10 septembre 2013) est gérée par le Regroupement QuébecOiseaux, un organisme à but non lucratif qui rassemble des amateurs intéressés par les oiseaux du Québec. Au moment de rédiger ce texte, ÉPOQ recense plus de sept millions de mentions d'environ 500 espèces et sous-espèces d'oiseaux, obtenues sur près de 8 000 sites par 20 000 observateurs entre 1833 et 2008. Il s'agit du plus ancien programme de compilation de feuillets d'observation d'oiseaux en Amérique du Nord. L'AARQ (<<http://www.atlasamphibiensreptiles.qc.ca/>>, consulté le 10 septembre 2013) est géré par le zoo Ecomuseum de la Société d'histoire naturelle de la vallée du Saint-Laurent, un organisme à but non lucratif. Il documente la biologie et la répartition des amphibiens et reptiles du Québec et contient environ 80 000 mentions provenant de plus de 300 herpétologues amateurs. Les naturalistes qui alimentent ces deux programmes d'archivage le font par passion et par conviction. Les observations consignées proviennent surtout des naturalistes les plus expérimentés, qui développent de remarquables expertises taxonomiques et écologiques. Des vérifications limitent l'inclusion dans les archives d'observations erronées. Des programmes similaires se sont mis en place récemment pour consigner les observations d'autres groupes d'espèces, comme les papillons et les libellules. Souhaitons qu'ils se développent.

Dans le cas des oiseaux, nous avons étudié les dates d'arrivée printanière de 113 espèces migratrices. Nous avons inclus dans l'analyse toutes les observations faites entre 1970 et 2008 au sud du 47^e parallèle, en prenant soin d'exclure les observations qui ne correspondaient pas à certains critères de qualité exigeants que nous nous étions imposés (Francoeur, 2012). Près de 80 % des espèces ont devancé leur date d'arrivée printanière au Québec durant la période étudiée. En moyenne, les espèces ont devancé leur date d'arrivée de 3 jours et demi, soit 0,9 jour par décennie (figure 3.3). De façon très intéressante, les espèces migratrices qui passent l'hiver au loin (par exemple en Amérique du Sud) ont moins avancé leur date d'arrivée que celles qui restent dans des États américains proches du Québec. Cette disparité pourrait être due à des différences dans les mécanismes qui déclenchent la migration

printanière des oiseaux. Ceux qui hivernent près du Québec se fieraient à la température alors que ceux qui hivernent loin seraient davantage influencés par la photopériode.

En ce qui concerne les amphibiens et les reptiles, les premiers chants (amphibiens) et les premières observations (reptiles) de l'année sont de bons indicateurs du démarrage de la période d'activité printanière. Cependant, l'Atlas des amphibiens et des reptiles du Québec étant assez récent, la plupart des espèces n'ont pas encore assez de mentions dans la base de données pour être analysées avec confiance (c'est un problème de détection). Nous avons donc restreint notre analyse à l'espèce la plus commune et la plus remarquable au printemps, la rainette crucifère. Entre 1987 et 2005, 11 095 mentions de l'espèce ont été enregistrées (soit un peu plus du quart de toutes les mentions

Figure 3.3. Changement de la date d'arrivée printanière de 113 espèces d'oiseaux migrateurs nichant au Québec

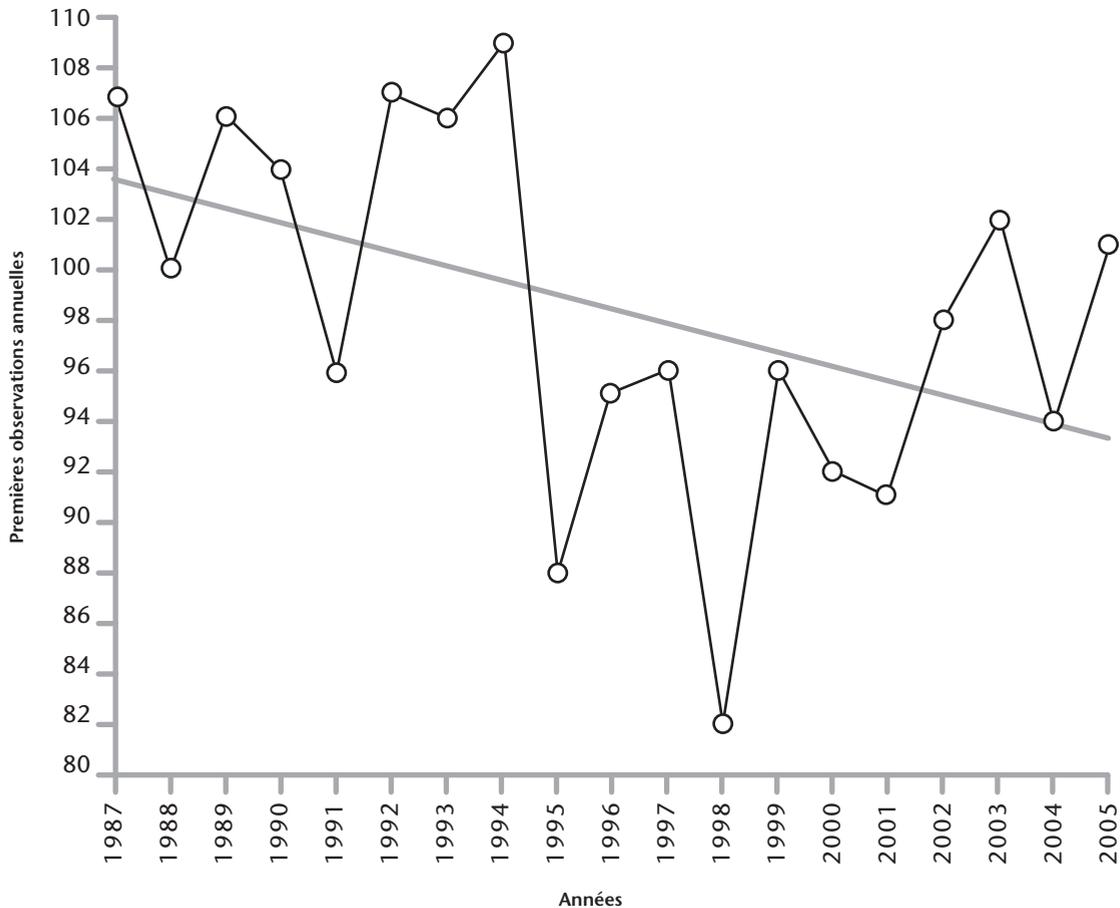


La date d'arrivée de chaque espèce est estimée selon la première observation d'un individu. Chaque point représente la moyenne des espèces et est exprimé en jours juliens (1^{er} avril = 91^e jour julien lors d'une année non bissextile). Les pointillés indiquent l'écart-type autour de la moyenne. Les données proviennent de la banque de données ÉPOQ (Étude des populations d'oiseaux du Québec). Paramètres de la régression : $R^2 = 0,09$; $p = 0,07$.

dans la base de données durant cette période) et les dates de premier chant ont avancé d'une dizaine de jours, soit 5,7 jours par décennie (figure 3.4).

Quelques conclusions émergent de cette section sur la phénologie des espèces. Tout d'abord, comme l'ont montré plusieurs méta-analyses s'appuyant sur des centaines d'études publiées à travers le monde, l'avancée de la phénologie printanière est une empreinte globale que les changements

climatiques ont déjà imprimée sur la biodiversité. Des avancées phénologiques printanières ont aussi été observées au Québec chez quelques espèces de plantes et d'animaux, avec une ampleur qui semble correspondre à ce qui a été mesuré ailleurs. Cependant, peu d'études ont été réalisées au Québec et beaucoup de variation existe entre les populations. Les données permettant de faire de telles recherches sont en effet assez rares, et il est clair que notre

Figure 3.4. Changement de la date de premier chant de la rainette crucifère dans le sud du Québec

Les dates sont exprimées en jours juliens (1^{er} avril = 91^e jour julien lors d'une année non bissextile). Les données proviennent de la banque de données de l'Atlas des amphibiens et des reptiles du Québec (AARQ). Paramètres de la régression : $R^2 = 0,20$; $p = 0,06$.

capacité à détecter les changements phénologiques est plutôt faible. D'autre part, des questions importantes restent sans réponse :

- » Les ajustements phénologiques observés permettent-ils aux espèces de rester bien synchronisées avec leur environnement, ou ces dernières sont-elles en train d'accumuler du retard par rapport à l'avancée rapide du printemps ?
- » La variation observée entre les espèces (par exemple, parmi les oiseaux) indique-t-elle que

certaines espèces ont moins besoin d'ajuster leur phénologie ou plutôt qu'elles sont moins capables de le faire ?

- » L'arrivée plus hâtive du printemps et l'ajustement phénologique que cela entraîne ont-ils des conséquences positives ou négatives pour les espèces ?
- » Les changements de phénologie observés chez les espèces ont-ils des conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes, en particulier les réseaux alimentaires ?

Ces questions font l'objet de recherches approfondies dans le monde entier. Il est en effet clair qu'un bouleversement complet des cycles de vie des espèces et une désynchronisation marquée de leurs besoins par rapport à la disponibilité des ressources auraient des effets négatifs prononcés sur la viabilité des populations et le fonctionnement des écosystèmes.

2.3. Les changements de répartition des espèces

La répartition géographique des espèces est le second paramètre biologique dont l'ajustement devrait se faire rapidement quand le climat change. En effet, une région dont le climat est tout juste propice à la survie d'une espèce devient franchement inhospitalière si le climat se dégrade. Inversement, une région dont le climat est inadéquat pour une espèce peut être vite colonisée si le climat devient plus favorable. La combinaison de ces deux phénomènes (l'extinction là où le climat se détériore et la colonisation là où il s'améliore) conduit au déplacement des aires de répartition. Dans l'hémisphère nord, le réchauffement climatique devrait améliorer les conditions à la limite nord de répartition de nombreuses espèces, mais les détériorer à leur limite sud. Nous devrions donc observer des glissements vers le nord des aires de répartition, plus ou moins rapides selon la capacité de colonisation de nouveaux milieux par les espèces.

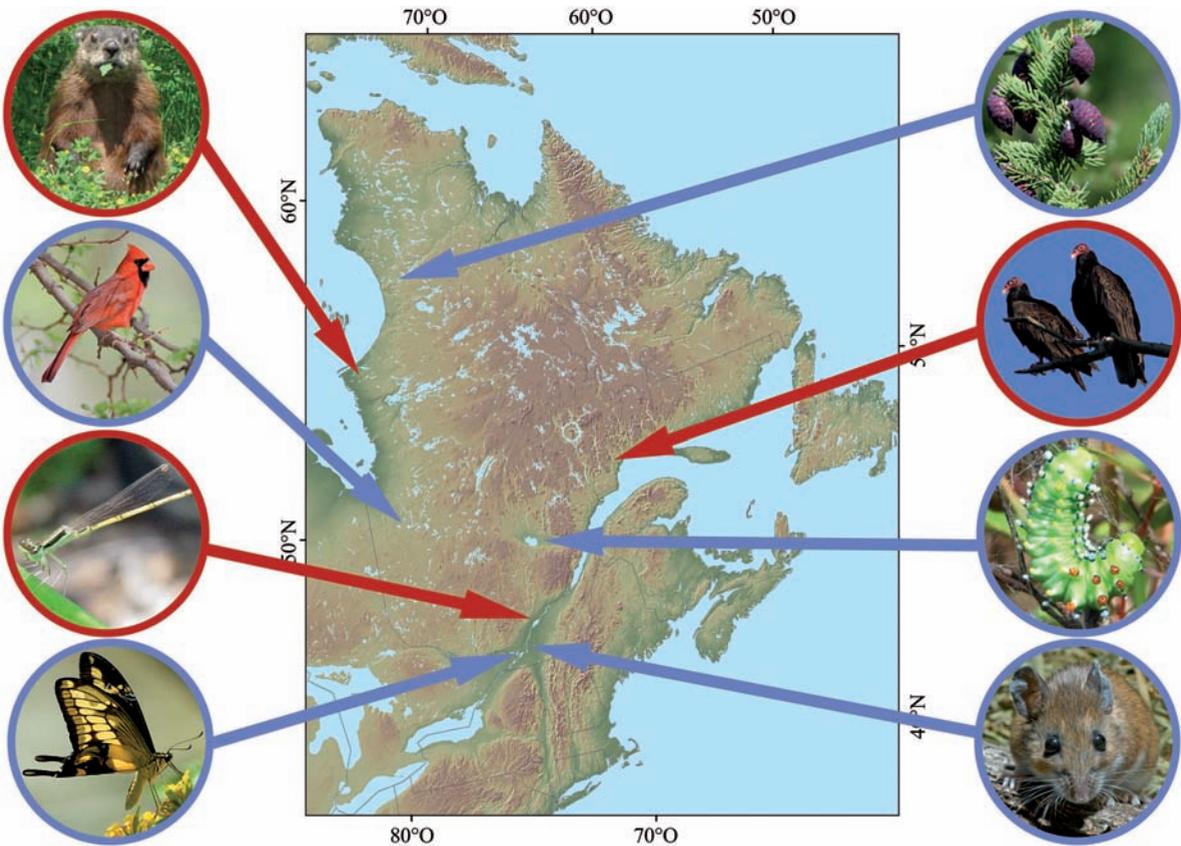
La répartition des espèces est beaucoup plus difficile à mesurer que leur phénologie. En effet, une aire de répartition n'est jamais un bloc homogène et bien délimité. Elle ressemble plutôt à un nuage diffus et hétérogène dont les limites sont floues. Pourtant, de nombreuses observations dans le monde montrent que les répartitions des espèces ont tendance depuis quelques décennies à se déplacer vers les pôles ou en altitude. La dernière synthèse sur le sujet (Chen *et al.*, 2011) suggère que les répartitions des espèces ont récemment glissé de 17 km par décennie vers les pôles et de 11 m par décennie en altitude. Ces valeurs sont des médianes et cachent

une immense variabilité entre les espèces. Leur intérêt est cependant renforcé par le fait qu'elles s'appuient sur des masses de données impressionnantes (764 espèces pour les changements latitudinaux et 1 367 pour les changements altitudinaux) et que l'ampleur des déplacements de répartition est supérieure là où le réchauffement climatique est plus intense. Les changements de répartition des espèces constituent donc la deuxième signature biologique universelle du réchauffement de la planète.

Il existe peu de données disponibles pour tester de façon robuste si les tendances observées mondialement sont aussi présentes au Québec. Certes, beaucoup d'observations anecdotiques semblent confirmer la tendance globale (figure 3.5) et ces dernières sont tout à fait cohérentes avec notre connaissance de la biologie des espèces. Mais des biais de détection pourraient nous donner une image faussée de la réalité, en concentrant notre attention sur les cas qui semblent conformes à notre hypothèse de départ. Aussi, l'attribution définitive au réchauffement climatique des déplacements de répartition observés demanderait des preuves supplémentaires.

Certains oiseaux fournissent cependant des exemples spectaculaires de remontées nordiques. C'est le cas du cardinal rouge, qui était confiné à la région de Montréal dans les années 1960. À cette époque, seulement 0,1 % des feuillets d'observation des ornithologues du Québec mentionnaient l'espèce. Le cardinal s'est toutefois profondément implanté au Québec en quelques décennies : dans les années 2000, il apparaissait sur 12 % des feuillets d'observation. L'espèce a en outre été observée de plus en plus au nord (figure 3.6), bien que les ornithologues n'aient pas notablement changé leurs habitudes d'observation. L'assiduité des observateurs d'oiseaux (518 449 feuillets d'observations consignés dans ÉPOQ entre 1960 et 2009) a ainsi permis de détecter l'imposant changement de répartition du cardinal. La connaissance de la biologie de cet oiseau donne, quant à elle, une bonne confiance dans l'attribution du changement au réchauffement climatique, même si d'autres facteurs, comme la popularité croissante des mangeoires, ont aussi pu y contribuer.

Figure 3.5. Déplacements nordiques récents d'aires de répartition au Québec



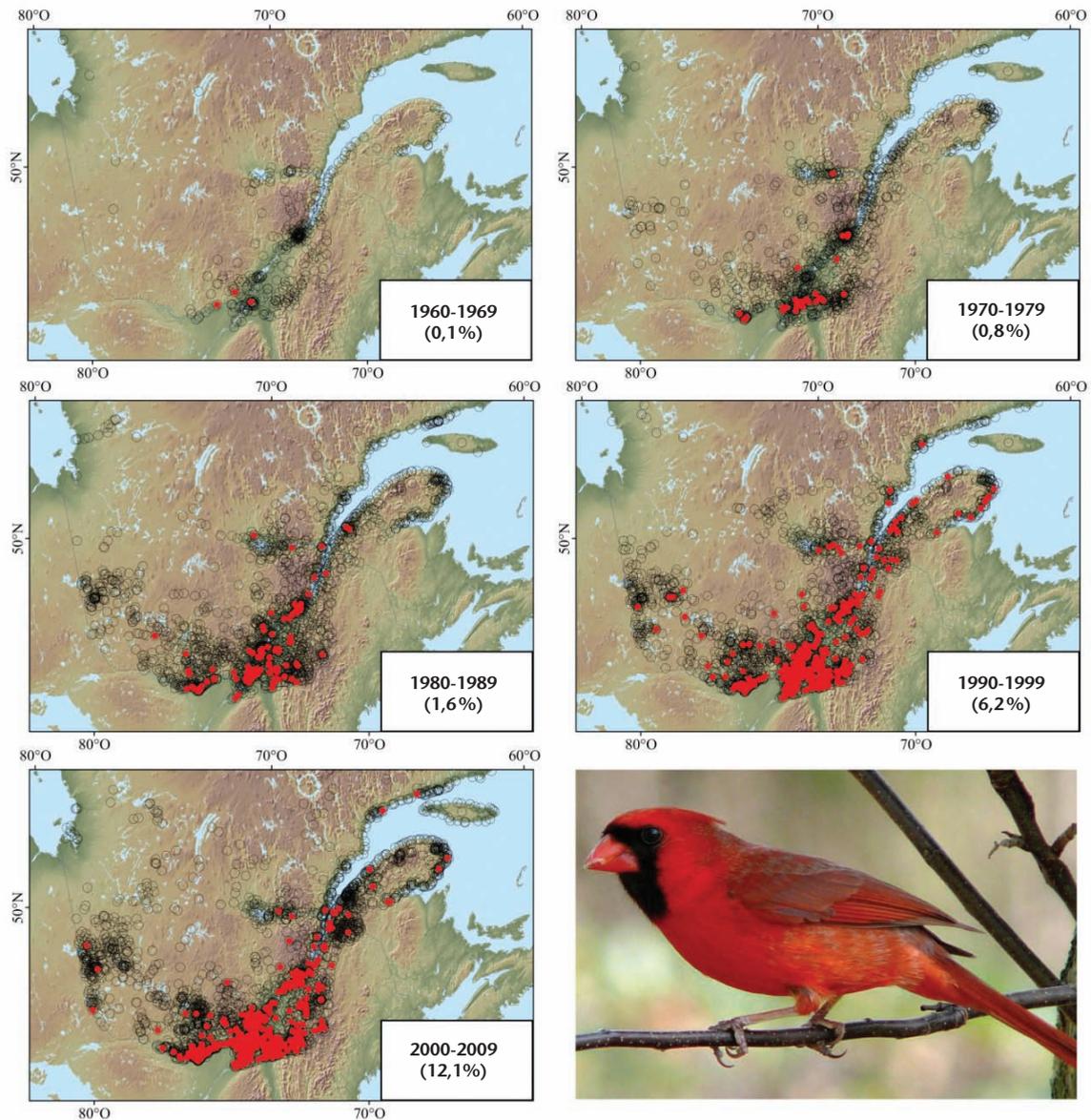
Les flèches bleues indiquent les cas pour lesquels les experts sont les plus sûrs que les changements de répartition observés sont en partie attribuables aux changements climatiques.

Sources : Marmotte commune = Claude Tremblay, Gérant de la station de recherche de Whapmagoostui/Kuujuuarapik (observation non publiée, courriel du 24 juillet 2012). Cardinal rouge = banque de données ÉPOQ. *Ischnura hastata* = Charest (2009). Grand porte queue = Maxim Larrivé, Insectarium de Montréal/Espace pour la vie (<<http://www.newswire.ca/en/story/1007779/decouverte-de-l-equipe-de-l-insectarium-le-plus-grand-papillon-diurne-d-amerique-du-nord-s-installe-au-quebec>>, consulté le 13 septembre 2013). Épinette noire = Lescop-Sinclair et Payette (1995). Urubu à tête rouge = banque de données ÉPOQ. Saturnie cécropia = Savard (2012). Souris à pattes blanches = Millien *et al.* (2012).

Malheureusement, personne n'a encore analysé l'ensemble des observations d'oiseaux du Québec pour dresser un portrait complet des changements récents d'aires de répartition. L'enrichissement quotidien de la banque de données ÉPOQ fournit pourtant des données précieuses, alors que l'acquisition de nouvelles données en 2010-2015 pour l'Atlas des oiseaux nicheurs du Québec, préalablement réalisé en 1984-1989 (Gauthier et Aubry, 1995), permettra

une mise à jour fort pertinente. Notons que des déplacements significatifs vers le nord ont été observés en Amérique du Nord à partir des données du Breeding Bird Survey (Hitch et Leberg, 2007) et du Recensement des oiseaux de Noël (La Sorte et Thompson, 2007). Une trentaine d'années de données ont été analysées dans chaque cas et les auteurs ont attribué une partie des changements de répartition au réchauffement climatique.

Figure 3.6. Progression nordique du cardinal rouge au Québec depuis 50 ans



La provenance des feuillets d'observation d'oiseaux (cercles noirs) et les observations de cardinal rouge (points rouges) ont été compilées d'après la banque de données ÉPOQ (Étude des populations d'oiseaux du Québec). Les pourcentages indiquent la proportion de feuillets d'observation dans lesquels les ornithologues ont noté la présence du cardinal rouge. L'augmentation graduelle de ces pourcentages montre sans ambiguïté la présence croissante du cardinal rouge au Québec depuis cinq décennies.

Source : Photo de Ken Thomas.us, Wikimedia Commons, <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Northern_Cardinal_Male-27527-4.jpg>, consulté le 25 septembre 2013.

Les papillons, qui comme les oiseaux ont une grande capacité de dispersion, fournissent aussi des exemples démonstratifs. Ainsi, la limite septentrionale de répartition de 80 espèces de l'est du Canada s'est déplacée en moyenne de 140 kilomètres vers le nord entre 1970 et 2012 (Maxim Larrivée, communication personnelle). Une analyse portant sur un plus grand nombre d'espèces est en cours, qui devrait bientôt fournir des informations précieuses sur ce groupe d'espèces.

Du côté des plantes, le réchauffement climatique du xx^e siècle a clairement provoqué la colonisation de nouveaux habitats dans le nord du Québec. La limite des arbres formée par l'épinette blanche a gagné quelques dizaines de mètres en altitude sur la côte est de la baie d'Hudson (Payette et Fillon, 1985). Dans la même région, la répartition de l'épinette noire s'est étendue d'une dizaine de kilomètres vers la baie d'Hudson (Lescop-Sinclair et Payette, 1995). Ces expansions ont eu lieu à la fois par germination de graines et par développement vertical de krummholz. D'autres espèces, comme le bouleau glanduleux, ont densifié leurs peuplements à la limite nordique de la taïga (Ropars et Boudreau, 2012), rendant cet écotone plus buissonneux. Les observations satellitaires des 25 dernières années montrent d'ailleurs une abondance grandissante de la végétation dans la toundra québécoise (McManus *et al.*, 2012).

Dans le sud du Québec, beaucoup de plantes exotiques ont augmenté leur aire de répartition au xx^e siècle. Des facteurs autres que le climat ont cependant joué un rôle prépondérant, comme ce fut le cas du développement autoroutier pour le roseau commun (Lelong *et al.*, 2007). Il est toutefois probable que le réchauffement climatique, combiné aux échanges économiques accrus et aux perturbations des milieux naturels, facilite maintenant l'invasion du territoire par les plantes introduites. Ainsi, le réchauffement pourrait jouer un rôle dans l'expansion rapide actuelle du roseau commun, dont la floraison est plutôt tardive au Québec (Brisson *et al.*, 2008). Il y a d'ailleurs un lien entre les événements de reproduction sexuée du roseau (épiaison, floraison)

et les degrés-jours de croissance (Christie Lovat, communication personnelle). La renouée japonaise est un autre exemple intéressant. Jusqu'à récemment, elle ne semblait pas produire de graines viables au nord de Boston. Elle en produit aujourd'hui jusqu'à Québec (Claude Lavoie, communication personnelle).

La seule analyse systématique à grande échelle des changements de répartition d'un groupe de plantes au Québec est celle effectuée dans le cadre de CC-Bio par Boisvert-Marsh *et al.* (à paraître). Plus de 6 400 placettes échantillons permanentes du ministère des Ressources naturelles ont été répertoriées entre 1970 et 2002. Les résultats révèlent que, parmi 11 espèces d'arbres dont les données étaient suffisamment abondantes pour permettre l'étude approfondie des aires de répartition, cinq montraient des changements conséquents avec ceux prédits par le réchauffement climatique. En particulier, la latitude moyenne à laquelle se trouvent les gaules s'est déplacée vers le nord, et la densité de celles-ci a augmenté dans la partie nord de la répartition des espèces. C'est notamment le cas de l'érable rouge, de l'érable à sucre, du hêtre à grandes feuilles, du bouleau blanc et du peuplier faux-tremble. D'autres facteurs influencent sans contredit ces répartitions d'espèces, mais ils agiraient en synergie avec le climat pour faciliter la migration des arbres.

Cette section sur la répartition des espèces ressemble quelque peu à la précédente, consacrée à la phénologie, en ce qu'elle démontre une empreinte claire des changements climatiques à l'échelle mondiale, mais dresse un portrait plus flou à l'échelle du Québec, où la synthèse des connaissances s'appuie encore sur un nombre limité de recherches. Là encore, la détection et l'attribution des changements écologiques sont en effet confrontées à des défis importants. Comme nous le verrons plus tard, l'étude des répartitions géographiques est cependant un aspect essentiel de la biologie des changements climatiques, puisque la répartition des espèces est la pierre angulaire de la gestion et de la conservation de la biodiversité.

2.4. Les changements à l'échelle des écosystèmes

La complexité des relations entre espèces (et l'impossibilité de mesurer les effets des changements climatiques sur toutes les espèces) nous empêche de dresser le tableau complet des effets des changements climatiques récents sur les écosystèmes du Québec. Quelques écosystèmes, cependant, sont tellement influencés par des processus directement liés au climat qu'il est possible, dans certains cas, de mesurer les effets des changements climatiques à l'échelle écosystémique.

Le cas des écosystèmes subarctiques du Québec, où le pergélisol se dégrade rapidement en raison des changements climatiques, est probablement le plus démonstratif. Le pergélisol s'étend sur tout le Nunavik et est présent par plaques sur le territoire de la Jamésie. Depuis les années 1950, l'épaisseur de neige au sol a augmenté dans le nord du Québec, isolant de plus en plus le pergélisol des froids hivernaux. Ce phénomène, combiné au réchauffement de l'air depuis 1990, a entraîné le réchauffement voire la fonte du pergélisol (Payette *et al.*, 2004). Ainsi, la surface qu'il occupe a diminué de 87 % entre 1957 et 2003 dans une tourbière étudiée par Payette *et al.* (2004), alors que sa limite méridionale s'est déplacée d'environ 130 km vers le nord depuis 50 ans dans les tourbières de la Jamésie (Thibault et Payette, 2009). Cette dégradation du pergélisol a fait s'effondrer de nombreuses tourbières et a formé des mares de fonte qui créent, du haut des airs, un paysage ressemblant à des palettes de peintre, chaque mare ayant une eau de couleur différente. De telles transformations peuvent avoir des répercussions profondes sur la végétation et les cycles de l'eau et du carbone (O'Donnell *et al.*, 2012).

L'augmentation des feux dans les écosystèmes boréaux, l'accroissement des épidémies d'insectes en milieu forestier et la prolifération des cyanobactéries dans les lacs du sud du Québec sont peut-être

d'autres exemples intéressants de changements à l'échelle écosystémique. Cependant, les liens entre le climat et les processus en cause sont plus complexes, la détection de changements récents est moins certaine, et leur attribution au réchauffement climatique est plus hasardeuse, selon les cas.

CONCLUSION

La conclusion de ce chapitre est aussi celle de la première partie du livre, dans laquelle nous avons établi un solide cadre de réflexion quant aux effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec. Nous avons en particulier constaté que les climats du Québec se sont réchauffés au xx^e siècle sous l'effet des activités humaines, et que les mécanismes puissants qui lient la biodiversité au climat ont commencé à imprimer à la biodiversité québécoise la signature du changement climatique.

Le réchauffement observé n'est que le prélude à des modifications climatiques beaucoup plus profondes au xxi^e siècle. Cela suggère que les effets sur la biodiversité s'amplifieront, soulevant ainsi des questions capitales. En particulier, le remaniement des calendriers climatiques saisonniers et le déplacement des isothermes de centaines de kilomètres vers le nord entraînent un besoin urgent d'anticiper les effets possibles sur les espèces et les écosystèmes. Cet effort de projection vers l'avenir influencera nécessairement notre vision de la gestion des espèces et des écosystèmes.

La suite du livre décrit ainsi les travaux les plus intenses réalisés à ce jour pour anticiper les effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec. Elle nous mène au cœur du projet CC-Bio, piloté durant les cinq dernières années par les auteurs, et dont les conclusions ont motivé la rédaction de cet ouvrage.



P A R T I E

REGARDS VERS L'AVENIR

*A good hockey player plays where the puck is.
A great hockey player plays
where the puck is going to be.*

Wayne Gretzky

*Les modèles devraient être aussi simples
que possible, mais pas plus.*

Albert Einstein

C H A P I T R E

4

LA PROJECTION ÉCOLOGIQUE

Une science exigeante

*Dominique Berteaux, Nicolas Casajus,
Sylvie de Blois et Catherine Périé*

À RETENIR

Les effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec ont été projetés dans l'avenir en utilisant la modélisation de niche écologique. ■

Les modèles de niche permettent d'abord de définir les conditions environnementales favorables à la présence d'une espèce, pour ensuite projeter dans le temps et l'espace la répartition de ces conditions selon divers scénarios climatiques. ■

La projection des conditions environnementales favorables aux espèces détermine la répartition future potentielle des espèces. Ce potentiel doit ensuite être interprété selon les capacités de dispersion des espèces et les interactions qu'elles ont entre elles. ■

L'élaboration d'un modèle de niche comporte quatre étapes: le choix d'algorithmes de calcul, la calibration du modèle, l'évaluation du modèle et la projection du modèle. ■

Notre zone d'étude, qui couvre 2 500 000 km², est divisée en 9 806 cellules mesurant chacune 20 km × 20 km. Elle inclut une grande partie de l'est du continent nord-américain au sud de 53°00'N. ■

Nous avons étudié près de 1 000 espèces et avons projeté pour la fin du ^{xxi}e siècle la répartition potentielle de 765 d'entre elles, appartenant aux groupes des oiseaux, des amphibiens et des plantes vasculaires, y compris les arbres. ■

Les données sur la répartition actuelle de ces espèces provenaient d'inventaires réalisés par des professionnels et d'observations faites par des naturalistes amateurs. Cette étude est ainsi un projet de « science citoyenne » fondé sur l'analyse de centaines de milliers d'observations récoltées par des milliers de naturalistes. ■

Nous avons utilisé pour chaque espèce huit modèles statistiques de niche écologique et considéré 70 scénarios de changements climatiques. Nous avons aussi calibré et évalué les modèles à de multiples reprises. ■

Ces répétitions, qui ont généré la somme colossale de près de vingt-cinq millions de cartes, nous ont permis de mesurer la variabilité des futurs possibles pour chaque cellule de la zone d'étude, ce qui confère une très grande valeur à la démarche scientifique utilisée. ■

INTRODUCTION

Les physiciens anticipent des siècles à l'avance la trajectoire de planètes et d'astéroïdes lointains. Les quelques forces qui meuvent ces objets sont connues, des équations en prédisent les effets. Paradoxalement, bien que les écosystèmes soient plus proches de nous, leurs changements futurs sont bien plus difficiles à anticiper. C'est que les écosystèmes ne sont pas des entités homogènes aux trajectoires simples, comme les astéroïdes, mais des ensembles complexes d'êtres vivants qui interagissent et évoluent. Malgré les incertitudes qu'elle comporte, la projection écologique est cependant essentielle pour éclairer de nombreuses décisions.

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, les changements de phénologie et de répartition sont les deux réponses universelles des espèces au réchauffement climatique. Chacune de ces deux réponses peut à son tour déclencher de profondes modifications des écosystèmes. Nous nous sommes concentrés dans le projet CC-Bio sur la projection des répartitions potentielles futures des espèces. Ce choix a d'abord été dicté par nos capacités scientifiques : nous disposons d'outils performants pour modéliser la répartition de nombreuses espèces, alors que la modélisation phénologique n'est possible que pour certaines d'entre elles (Chuine, 2010). C'est aussi un choix pratique. La répartition des espèces (qu'elles soient exploitées, protégées, envahissantes, etc.) influence grandement leur gestion. Les communautés scientifiques de plusieurs autres régions du monde ont d'ailleurs aussi concentré leur attention sur la modélisation des répartitions d'espèces (Europe: Thuiller *et al.*, 2005; Huntley *et al.*, 2007; Walmsley *et al.*, 2007. États-Unis: Iversen *et al.*, 1999; Matthews *et al.*, 2004).

Ce chapitre explique les principes généraux permettant de prévoir les effets potentiels des changements climatiques sur la répartition des espèces, ainsi que les méthodes utilisées dans le projet CC-Bio

pour produire les résultats qui apparaîtront au chapitre 5. Nous progressons en quatre étapes. Nous présentons d'abord la démarche, appuyée sur les modèles de niche écologique, utilisée dans CC-Bio pour nous projeter dans l'avenir. Nous décrivons ensuite les données biologiques et environnementales utilisées pour appliquer les modèles de niche à la biodiversité du Québec. Nous détaillons dans la troisième étape comment nous avons combiné les modèles de niche aux données disponibles pour obtenir des prévisions s'étalant sur le XXI^e siècle. Finalement, nous abordons la question essentielle de la confiance que nous devrions avoir dans les projections obtenues. Comme la projection écologique est l'objet de multiples réflexions, nous utilisons dans ce livre une terminologie précise pour la décrire (encadré 4.1).

La modélisation menée dans CC-Bio a exigé une expertise spécialisée et l'analyse de données volumineuses, ce qui fait de ce chapitre le plus technique du livre. Les lecteurs avertis trouveront des détails importants afin d'interpréter correctement les résultats obtenus. Les lecteurs moins spécialisés peuvent se concentrer sur les principes généraux qui ont guidé nos recherches, et ignorer certaines figures ainsi que la plupart des encadrés et tableaux.

Encadré 4.1. L'ANTICIPATION, LA PROJECTION, LA PRÉVISION ET LA PRÉDICTION : DU PAREIL AU MÊME ?

La science a bouleversé notre capacité à prévoir le futur, nourrissant un des grands besoins de l'humanité. Ainsi, les termes faisant référence à l'avenir abondent dans la littérature scientifique. Des chercheurs étudiant les effets écologiques des changements climatiques ont précisé ce vocabulaire pour mieux décrire leur démarche scientifique (Berteaux *et al.*, 2006, p. 152). Nous utilisons les définitions qu'ils ont proposées :

- **Projection** : Description d'une situation inconnue à partir d'informations connues.
- **Anticipation** : Description d'une situation inconnue future à partir d'informations connues. L'anticipation est donc une projection dans l'avenir.
- **Prévision** : Description d'une situation inconnue à partir de corrélations entre variables (la prévision du phénomène se fait sans que l'on sache ce qui cause ce phénomène).
- **Prédiction** : Description d'une situation inconnue à partir de relations causales entre variables (la prédiction du phénomène se fait grâce à notre connaissance de ce qui cause ce phénomène).

1. LES MODÈLES DE NICHE ÉCOLOGIQUE

1.1.

Qu'est-ce qu'un modèle de niche ?

Les modèles de niche écologique sont abondamment utilisés dans la recherche écologique depuis 20 ans (encadré 4.2) (Guisan et Thuiller, 2005 ; Franklin, 2010). On les appelle aussi « modèles de répartition d'espèce », « modèles de répartition d'habitat » ou « modèles de sélection de ressources ». Nous simplifions ici par « modèles de niche ». Comme nous l'avons vu à la section 2.3, ces modèles expriment sous forme mathématique la relation entre la répartition observée d'une espèce et des variables environnementales comme le climat, la topographie ou le type de sols. Une fois modélisée, cette relation peut être projetée dans le temps, en substituant par exemple dans le modèle le climat présent par un climat futur, ou dans l'espace, en substituant les valeurs que prennent certaines variables dans une région donnée par celles qu'elles prennent dans une autre région (Pearson et Dawson, 2003).

Les modèles de niche sont construits à partir de corrélations entre la répartition des espèces et les caractéristiques de l'environnement. Ils diffèrent ainsi des modèles mécanistiques, qui sont basés quant à eux sur une connaissance détaillée des mécanismes physiologiques, démographiques et écologiques expliquant la répartition des espèces (encadré 4.3). Les modèles de niche permettent donc de faire des prévisions alors que les modèles mécanistiques génèrent des prédictions (voir l'encadré 4.1).

Lorsque l'on ne considère que les dimensions climatiques de la niche d'une espèce, on parle d'un « modèle bioclimatique » ou d'un « modèle d'enveloppe bioclimatique ». Les paramètres climatiques qui correspondent à la répartition de l'espèce constituent alors l'« enveloppe climatique de l'espèce ».

1.2.

Les avantages et les inconvénients des modèles de niche

Les modèles de niche ont de nombreux avantages. Premièrement, ils requièrent peu d'informations sur les espèces modélisées (des données de présence suffisent) et sont applicables à n'importe

Encadré 4.2. LA MODÉLISATION DE NICHE : UN OUTIL POLYVALENT POUR LA PROJECTION ÉCOLOGIQUE

Les modèles de niche sont prisés en écologie, en biogéographie, en science évolutive et en conservation. Les exemples ci-dessous montrent certains des besoins auxquels ils permettent de répondre (Guisan et Thuiller, 2005) :

- évaluer l'impact de modifications environnementales sur la répartition d'une espèce ;
- proposer de nouveaux sites de surveillance pour une espèce rare ;
- cartographier les habitats favorables à la réintroduction d'une espèce ;
- évaluer les risques d'invasion d'une espèce nouvellement introduite ;
- proposer des plans de conservation et de sélection de réserves.

Dans tous ces cas, les modèles de niche permettent de faire une approximation des besoins environnementaux des espèces, puis de déterminer les lieux potentiellement favorables à ces espèces.

quelle espèce. Cela autorise leur utilisation simultanée sur des centaines d'espèces à l'échelle de vastes étendues géographiques. Deuxièmement, ils s'intègrent facilement aux capacités avancées de représentation cartographique maintenant disponibles dans la plupart des équipes de recherche et bureaux de gestion environnementale. Il est ainsi facile d'ajouter cet outil d'analyse à d'autres études en cours. Troisièmement, les changements de répartition d'espèces que les modèles de niche nous aident à étudier constituent la réponse aux changements climatiques la plus spectaculaire et la plus pertinente pour la gestion de la biodiversité. Finalement, à cause de tout ce qui précède, les modèles de niche traduisent de façon concrète et visuelle les effets potentiels des changements climatiques sur la biodiversité. Ils fournissent ainsi un lien efficace entre la science des changements climatiques et celle de la conservation, suscitant la réflexion sur les options qui s'offrent aux gestionnaires du patrimoine naturel dans un contexte de réchauffement global.

Les modèles de niche reposent toutefois sur des prémisses qu'il faut comprendre. Ils supposent d'abord que les espèces sont en équilibre avec leur environnement (Guisan et Theurillat, 2000), c'est-à-dire qu'elles occupent tous les habitats qui leur sont favorables et sont absentes de ceux qui ne le sont pas (Hutchinson, 1957). Cependant, cette prémisses est parfois invalide (Araújo et Pearson, 2005).

Par exemple, les habitats favorables ne sont pas tous occupés quand une espèce exotique est en train de coloniser un nouveau continent. Dans ce cas, les modèles sous-estiment l'ampleur de la niche écologique de l'espèce et toute projection est faussée. Le postulat d'équilibre est difficilement vérifiable et est donc souvent admis sans preuve, bien qu'il soit raisonnable pour la plupart des espèces.

Les modèles de niche présument que les espèces ne vont pas évoluer durant la période couverte par la projection écologique. Ils font comme si leurs caractéristiques physiologiques et comportementales étaient constantes. Cependant, quand une espèce évolue rapidement, sa réponse à l'environnement change et la niche déterminée par le modèle n'est pas applicable à une situation future. Là encore, il s'agit d'une prémisse souvent invérifiable. Heureusement, la vitesse d'évolution de la plupart des espèces est assez lente pour que l'évolution biologique ne pose pas de problème quand les projections s'étalent sur quelques décennies.

Quand il est projeté dans l'avenir, un modèle de niche permet de représenter l'aire géographique dans laquelle l'environnement physique deviendra favorable à la présence de l'espèce modélisée : c'est sa répartition potentielle future. Deux mises en garde s'imposent pour bien interpréter ces répartitions potentielles futures.

En premier lieu, les capacités de dispersion de certaines espèces peuvent être trop faibles pour leur permettre de coloniser de nouvelles régions au fur et à mesure que l'environnement physique de celles-ci devient favorable. Il faut donc être prudent lorsqu'on interprète la répartition potentielle future d'une espèce. Ce n'est qu'un potentiel! On peut cependant tenter d'anticiper la répartition réelle future de l'espèce en tenant compte de divers scénarios de dispersion. Les trois scénarios les plus fréquemment utilisés sont l'absence totale de dispersion, la dispersion illimitée (sans contrainte) et la dispersion au rythme observé lors de la dernière colonisation postglaciaire (la « dispersion holocène »).

Deuxièmement, les interactions biotiques comme la compétition, la prédation ou le mutualisme (Buckley et Kingsolver, 2012) ne sont pas pris en compte dans la plupart des modèles de niche. Ainsi, même si elle a d'excellentes capacités de dispersion, rien ne garantit qu'une espèce colonisera effectivement une région dont l'environnement physique lui deviendra favorable. Par exemple, le climat peut devenir favorable plus au nord pour une espèce d'oiseau, sans que celle-ci puisse coloniser la nouvelle région si l'habitat de nidification dont elle a besoin y est absent. Encore une fois, il faut donc bien comprendre qu'une répartition potentielle future est... potentielle. Ces précautions d'interprétation ne sont pas toujours bien respectées (Araújo et Peterson, 2012). Nous prendrons soin d'éviter ce piège.

Notons qu'il existe d'autres approches que les modèles de niche pour évaluer l'impact potentiel des changements climatiques sur la biodiversité. Nulle n'échappe cependant aux exigences de la projection écologique et chacune possède son lot d'avantages et d'inconvénients (encadré 4.3).

1.3.

La modélisation du déplacement des espèces ou de celui des communautés?

Les communautés sont des assemblages d'espèces qui utilisent un même territoire. Ne pourrait-on

modéliser les déplacements potentiels de ces assemblages, plutôt que ceux d'espèces analysées une à une? On touche ici à une question historique en écologie, qui est ancrée dans deux écoles traditionnelles de pensée: la vision « clementsienne » (formulée par Frederic Edward Clements), qui considère les assemblages d'espèces comme des unités écologiques fonctionnant de façon coordonnée, et la vision « gleasonienne » (formulée par Henry Allan Gleason) dans laquelle la structure et le fonctionnement des écosystèmes ne peuvent être compris qu'à travers une conception individuelle des espèces (Prentice *et al.*, 1992).

On peut maintenant dire que la vision de Gleason a gagné. Les données paléoécologiques montrent que les assemblages d'espèces n'ont jamais été stables dans le passé (Prentice, 1986) et que les écosystèmes n'ont pas répondu en bloc aux changements climatiques (Webb, 1981; Taberlet et Cheddadi, 2002). Les assemblages actuels ne répondront donc pas aux changements climatiques comme des entités homogènes (Van der Putten, 2012). Ainsi, il est important de modéliser la réponse écologique aux changements climatiques en travaillant au niveau des espèces.

2.

LES DONNÉES UTILISÉES POUR LA MODÉLISATION

La qualité des résultats de modélisation dépend en grande partie de celle des données qui sont modélisées. Or, l'obtention de données de bonne qualité est plus ardue qu'il n'y paraît. En effet, les informations disponibles sur les répartitions d'espèces et sur les facteurs qui influencent ces répartitions sont souvent volumineuses, disponibles sous des formats disparates et gérées par des organismes fort divers. Elles sont en outre toujours incomplètes, car la répartition d'une espèce et les facteurs qui contrôlent cette répartition ne sont jamais parfaitement connus. Cette section résume la nature des données que nous avons utilisées et justifie les choix que nous avons faits pour les modéliser.

Encadré 4.3. TROIS ALTERNATIVES AUX MODÈLES DE NICHE

Les modèles de niche écologique ne sont pas les seuls à évaluer l'impact potentiel des changements climatiques sur la biodiversité. Les trois approches suivantes sont aussi utilisées :

- Les modèles dynamiques globaux de végétation identifient, à une échelle souvent planétaire, la relation entre les grands types de végétation et le climat. Ils simulent la croissance et la décomposition de la végétation en fonction des paramètres climatiques et édaphiques en regroupant les plantes en types fonctionnels. Ces modèles prennent en compte des mécanismes biologiques connus et intègrent des processus biogéochimiques et biophysiques (Cramer *et al.*, 2001). Le principal avantage de ces modèles est de pouvoir être appliqué à l'échelle planétaire et de faire des prédictions sur le devenir des grands biomes de la Terre. Cependant, leur résolution spatiale est en général grossière et on ne peut pas prévoir comment une espèce en particulier va se comporter, car c'est une approche par groupes d'espèces.
- Les modèles mécanistiques (ou modèles basés sur les processus) sont intermédiaires entre les modèles de niche écologique et les modèles dynamiques globaux de végétation. Ces modèles reposent sur notre connaissance des relations de cause à effet entre la répartition des espèces et le climat. Ils permettent de simuler la répartition d'une espèce sans connaître *a priori* cette répartition, en s'appuyant plutôt sur des processus biologiques mesurés par observation ou par expérience. Il existe une grande variété de modèles mécanistiques : les modèles de trouée (*gap models*) (Bugmann, 2001), les modèles paysagers (*landscape models*) (Scheller *et al.*, 2007) et les modèles basés sur la valeur adaptative des espèces (*fitness-based models*) (Chaine *et al.*, 2001). Le principal avantage de ces modèles est qu'ils reproduisent de manière fidèle la répartition observée d'une espèce et permettent de bien comprendre les forces régissant les répartitions d'espèces. Leur inconvénient majeur est qu'on ne peut les appliquer qu'à quelques espèces, car les mécanismes physiologiques et écologiques régissant la répartition sont trop mal connus pour la majorité d'entre elles.
- Des indices permettent d'évaluer la vulnérabilité des espèces aux changements climatiques en fonction de leur sensibilité et de leur exposition aux changements climatiques, ainsi qu'en fonction des réponses aux changements climatiques déjà documentées pour ces espèces. Ces indices sont calculés à partir des traits biologiques des espèces (capacité de dispersion, degré de spécialisation écologique, taille de l'aire de répartition, degré de sensibilité aux variations de température, etc.) et des caractéristiques de leur environnement (présence de barrières à la dispersion, disponibilité d'habitats refuges, etc.). L'indice de vulnérabilité aux changements climatiques mis au point par l'organisme NatureServe en est un bon exemple. Il permet de classer rapidement un grand nombre d'espèces en fonction de leur vulnérabilité aux changements climatiques. De plus, il s'intègre facilement aux autres outils de conservation, comme les niveaux de précarité des espèces. Il ne permet pas cependant d'évaluer les changements potentiels de répartition des espèces, un élément pourtant essentiel à la mise en œuvre des mesures de gestion.

2.1. L'étendue spatiale et la résolution des données

Une décision importante à prendre quant aux choix des données à utiliser lors de l'élaboration des modèles de niche concerne leur étendue spatiale. Il faut définir la zone d'étude. On pourrait croire que le but de notre recherche désignait uniquement le territoire du Québec comme zone d'étude. Cependant, pour modéliser correctement la niche d'une espèce, les conditions variées dans lesquelles elle vit doivent être prises en compte. Or, un grand nombre d'espèces présentes au Québec y sont à la périphérie nord de leur répartition. Notre zone d'étude devait donc être considérablement élargie vers le sud afin d'inclure une partie substantielle de leur aire de répartition.

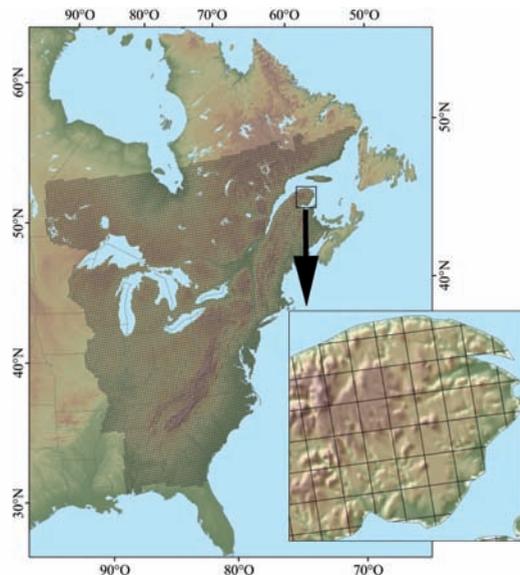
Une autre raison importante nous obligeait à élargir l'aire d'étude vers le sud. Nous avons vu que le climat du sud du Québec ressemblera à la fin du siècle à des climats actuellement situés aux États-Unis (voir la figure 2.7). Certaines espèces étasuniennes aujourd'hui absentes du Québec pourraient donc s'y retrouver dans le futur. Ainsi, l'élargissement de l'aire d'étude vers le sud était nécessaire pour les inclure dans l'exercice de modélisation et ainsi prévoir leur immigration potentielle.

La disponibilité des données de répartition des espèces est un autre facteur dont il fallait tenir compte. Celle-ci diminue vers le nord, surtout au-delà de 53°00'N, où la présence humaine devient très faible (plus de 98 % des Québécois habitent au sud de 53°00'N) (Berteaux, 2013). Nous avons ainsi dû exclure le Québec nordique. La zone d'étude couvre donc une partie du Québec et de l'Ontario, le Nouveau-Brunswick et tous les États américains à l'est du 90^e méridien, sauf la Floride. Ce territoire s'étale sur environ 2 800 km du sud au nord (30°30'N à 53°00'N) et 2 500 km d'est en ouest (56°00'O à 95°00'O) (figure 4.1).

Après avoir défini la zone d'étude, la seconde décision importante à prendre quant aux données à modéliser concernait leur résolution spatiale. Les

données ont en effet été récoltées de façons très diverses, si bien que leur précision spatiale n'est pas toujours la même. Par exemple, un observateur d'oiseaux note généralement la municipalité dans laquelle il fait ses observations, un botaniste indique la coordonnée GPS de sa récolte, alors que les climatologues nous fournissent des données par pixels de 1 km × 1 km. Pour rapporter ces informations à un système commun, nous avons superposé à la zone d'étude une grille de 9 806 cellules mesurant chacune 20 km × 20 km (figure 4.1). Chaque cellule s'est vue attribuer des informations sur l'occurrence de chaque espèce (présente ou absente) et sur la valeur des variables environnementales considérées. Cette résolution constituait le meilleur compromis entre la précision désirée (une résolution plus grossière aurait rendu notre travail trop imprécis) et les

Figure 4.1. Zone d'étude pour étudier les effets potentiels des changements climatiques sur la biodiversité du Québec



La carte principale montre l'étendue spatiale maximale des données alors que l'insertion illustre leur résolution (cellules de 20 km × 20 km). L'étendue spatiale des données variera selon les groupes taxonomiques étudiés.

capacités informatiques disponibles (une résolution plus fine aurait entraîné des calculs trop longs). Il s'agit d'ailleurs d'une résolution courante pour ce type de recherches (Prasad *et al.*, 2006).

2.2.

La nature des données disponibles sur la répartition des espèces

Il est rarement possible de connaître tous les endroits où vit une espèce (les présences sont en général incomplètes) et le fait que personne n'ait observé une espèce à un endroit ne garantit pas forcément qu'elle y soit absente (les absences sont en général incertaines). Les données sur la répartition des espèces sont donc imparfaites. Il faut décrire ici l'origine des données de répartition utilisées dans le projet CC-Bio pour bien comprendre la démarche que nous avons menée.

Les données de répartition résultent de deux types d'échantillonnage (probabiliste et non probabiliste) qui ont chacun des avantages et des inconvénients. Dans un échantillonnage probabiliste, chaque individu de l'espèce étudiée a une probabilité mesurable d'être compté par un observateur, car la récolte de données résulte d'un échantillonnage aléatoire. Par exemple, l'inventaire décennal du ministère des Ressources naturelles du Québec répertorie tous les dix ans l'ensemble des essences forestières présentes dans un peu plus de 120 000 placettes d'échantillonnage réparties sur l'ensemble de la forêt commerciale du Québec. L'équivalent américain est le Forest Inventory and Analysis National Program coordonné par le ministère de l'Agriculture des États-Unis (USDA). Dans ce type d'inventaire, la présence ou l'absence de toutes les espèces arborescentes est connue pour chaque placette échantillonnée. Le gros avantage de ce type d'échantillonnage est qu'il n'est pas biaisé par le comportement des observateurs. Il donne une image objective de la répartition des espèces. Son inconvénient est par contre qu'il exige des ressources considérables et n'est donc mis en œuvre que pour les groupes d'espèces associées à des enjeux économiques importants.

Dans un échantillonnage non probabiliste, on ne peut mesurer la probabilité qu'un individu de l'espèce étudiée soit compté, car la récolte de données se fait de façon subjective. Par exemple, les naturalistes qui fournissent des observations pour l'Atlas des amphibiens et des reptiles du Québec (AARQ) et l'Étude des populations d'oiseaux du Québec (ÉPOQ) suivent rarement un protocole d'échantillonnage précis quand ils déterminent l'endroit où ils feront leurs observations. L'inconvénient principal de cette approche est qu'elle entraîne des biais importants. Ainsi, une espèce a plus de chances d'être répertoriée dans une région où habitent de nombreux naturalistes. De plus, les espèces attrayantes et faciles à voir (plantes à fleurs, libellules, papillons, amphibiens, reptiles, oiseaux) sont mieux documentées que les autres (algues, lichens, bryophytes, mollusques, diptères, etc.). Cette approche a cependant aussi des avantages. Comme les observateurs s'adonnent à leur activité par plaisir, ils récoltent des informations sur des espèces dont l'intérêt économique ou le statut de vulnérabilité ne suffisent pas à justifier le suivi par des biologistes professionnels. De plus, la quantité d'information récoltée peut parfois être considérable. En fait, comme nous l'avons souligné à l'encadré 3.2, ce livre s'appuie largement sur des données récoltées par des naturalistes amateurs, ce qui en fait un projet de « science citoyenne » (Roy *et al.*, 2012).

2.3.

Le choix des espèces étudiées

Comme le montre le tableau 4.1, nous avons étudié des oiseaux, des amphibiens et des plantes vasculaires. Ces groupes suscitent assez d'intérêt auprès des naturalistes et des scientifiques pour que des données de répartition fiables et facilement accessibles soient disponibles. Parmi ces espèces, les arbres et les espèces à statut précaire ont justifié des échantillonnages exhaustifs à cause de leur intérêt économique ou de conservation. Cependant, pour beaucoup d'autres groupes, nous avons jugé que les données de répartition disponibles étaient trop fragmentaires pour être facilement utilisables (c'est le cas par exemple des lichens, des mousses, des

Tableau 4.1. Bases de données d'occurrence d'espèces étudiées dans le projet CC-Bio

Taxon	Nom de la base de données	Référence
Oiseaux	Étude des populations d'oiseaux du Québec (ÉPOQ)	< http://www.quebecoiseaux.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=233&Itemid=103&lang=fr >
Oiseaux	Breeding Bird Survey	< http://www.pwrc.usgs.gov/BBS/index.html >
Amphibiens	Atlas des amphibiens et des reptiles du Québec (AARQ)	< http://www.atlasamphibiensreptiles.qc.ca/ >
Amphibiens	National Amphibian Atlas	< http://www.pwrc.usgs.gov/naa >
Amphibiens	Atlantic Canada Conservation Data Center	< http://www.accdc.com/Products/Publicdata.html >
Arbres	Placettes-échantillons temporaires (3 ^e programme, 120 000 placettes)	< http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/inventaire/index.jsp >
Arbres	Placettes-échantillons permanentes (12 000 placettes)	< http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/inventaire/index.jsp >
Arbres	USDA Forest Service Tree Atlas	< http://www.fs.fed.us/ne/delaware/4153/global/littlefia/index.html >
Plantes vasculaires	Données d'herbiers	< http://cc-bio.uqar.ca/publications/ActaeaReport.pdf >
Espèces à statut précaire	Centre de données sur le patrimoine naturel du Québec	< http://www.cdpnq.gouv.qc.ca/index-en.htm >

Pour plus de détails, voir Berteaux *et al.* (2010).

papillons, des odonates, des araignées, des poissons d'eau douce et de tous les microorganismes). Dans certains cas, comme celui des mammifères, les données n'étaient pas disponibles dans des formats rapidement accessibles. Il demeure cependant possible de construire des modèles de niche pour certaines des espèces que nous n'avons pas considérées, au prix d'un effort d'acquisition de données plus important que pour les espèces étudiées.

Dans le cas des amphibiens et des arbres, la répartition de l'ensemble des espèces présentes au Québec a été modélisée. Par contre, nous avons dû faire un tri parmi les espèces d'oiseaux et de plantes (autres que les arbres) présentes au Québec. Nous avons en particulier écarté toutes les espèces d'oiseaux dont l'aire de nidification s'étendait largement au nord de notre zone d'étude. En ce qui concerne

les plantes, la modélisation de l'ensemble de la flore du Québec (environ 3 000 espèces) dépassait nos moyens. Nous nous sommes donc restreints à un peu plus de 500 espèces en maximisant la diversité des taxons et des types de répartition.

Nous avons également modélisé la répartition de nombreuses espèces américaines dont la limite nord de répartition est aux portes du Québec (tableau 4.2). Par exemple, plus de 80 % des 113 espèces d'amphibiens et environ la moitié des 128 espèces d'arbres étudiées ne sont pas présentes au Québec.

En étudiant près de 1 000 espèces (tableau 4.2), nous avons appuyé notre recherche sur un échantillon imposant de la biodiversité de l'est de l'Amérique du Nord. Ce vaste échantillon comporte des animaux

Tableau 4.2. Nombre d'espèces dont la répartition a été modélisée dans le projet CC-Bio

Taxon	Espèces présentes au Québec	Espèces absentes au Québec, mais présentes aux États-Unis	Espèces modélisées
Oiseaux	169	21	190
Amphibiens	19	94	113
Arbres	63	65	128
Autres plantes	512	0	512
TOTAL	763	180	943

La période de référence utilisée pour comptabiliser la présence des espèces était 1961-1990.

homéothermes et hétérothermes, des prédateurs et des proies, des plantes vasculaires ligneuses et herbacées, des espèces abondantes et rares, des espèces représentatives de tous les grands types de répartition (périphérique nord, subcosmopolite, boréale, etc.) et des espèces de la plupart des habitats (sauf le milieu marin). Même sans reposer sur tous les groupes taxonomiques du Québec, nos résultats devraient donc avoir un important potentiel de généralisation quant aux effets anticipés des changements climatiques sur la biodiversité du Québec.

2.4. Les descripteurs des climats et des sols

Les informations sur la répartition des espèces doivent être associées à des données environnementales pour construire les modèles de niche. Selon le groupe taxonomique considéré, trois à quatre variables climatiques ont été incluses dans les modèles (tableau 4.3). Ces variables ont été choisies en fonction de leur pertinence biologique (variable selon les taxons) et de la quantité d'information nouvelle que chacune apportait par rapport aux autres (leur degré de colinéarité).

Les données décrivant le climat de la période de référence (1961-1990) proviennent de stations météorologiques réparties sur l'ensemble de l'Amérique du Nord (Rehfeldt, 2006). Elles ont

été interpolées spatialement sur une grille d'une résolution de 1 km × 1 km (Rehfeldt, 2006) avant d'être reportées sur notre grille de 20 km × 20 km (figure 4.1).

Les données décrivant le climat futur (2071-2100) proviennent de 70 scénarios de changements climatiques. Ces scénarios sont issus de 14 modèles climatiques globaux et du modèle régional canadien du climat, couplés chacun avec un à trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (scénarios A1B, A2 et B1) et initialisés selon deux à quatre conditions météo (voir chapitre 2). La prise en compte de multiples scénarios de changements climatiques était indispensable puisque les climats futurs ne sont pas connus avec certitude (Solomon *et al.*, 2007). Cependant, il aurait été beaucoup trop long de refaire les calculs de modélisation pour chaque scénario climatique disponible. Nous avons donc sélectionné un échantillon représentatif de cinq à huit scénarios climatiques parmi les 70 disponibles, selon une méthode maximisant la variabilité entre scénarios tout en réduisant le nombre de scénarios retenus, et avons utilisé ces scénarios dans tous nos calculs de modélisation.

Lorsque nous avons construit des modèles de niche pour les arbres, nous avons ajouté des variables édaphiques et topographiques aux variables climatiques afin d'obtenir une description plus précise de la niche pour ce groupe d'espèces. Le tableau 4.4 résume l'origine des données environnementales utilisées.

Tableau 4.3. Liste des variables climatiques utilisées dans les modèles de niche

Variable	Unité	Oiseaux	Amphibiens	Arbres	Plantes
Température annuelle moyenne	°C	x	x	x	
Degrés-jours de croissance	°C				x
Écart de température annuelle	°C	x	x		
Précipitations annuelles totales	mm		x	x	x
Précipitations utiles	–			x	
Précipitations du mois le plus humide	mm	x			
Saisonnalité des précipitations	–	x	x		
Bilan hydrique annuel moyen	mm				x

Le calcul des variables climatiques utilisées dans les modèles de niche est dérivé des valeurs de trois variables de base estimées quotidiennement, puis souvent agrégées mensuellement : la température minimale, la température maximale et les précipitations. La température annuelle moyenne correspond à la moyenne des températures quotidiennes moyennes. Les précipitations annuelles totales correspondent à la somme des précipitations quotidiennes totales. Les degrés-jours de croissance correspondent à la somme des températures mensuelles moyennes supérieures à 5 °C. Les écarts de température annuelle correspondent à la moyenne des différences mensuelles calculées entre les températures mensuelles maximales et les températures mensuelles minimales. Les précipitations utiles correspondent au rapport entre les précipitations estivales totales et les précipitations annuelles totales. La saisonnalité des précipitations correspond au coefficient de variation des précipitations mensuelles totales. Le bilan hydrique annuel moyen correspond à la différence entre les précipitations annuelles totales et le potentiel d'évapotranspiration, calculé selon Thornwaite (1948).

Tableau 4.4. Bases de données environnementales utilisées dans le projet CC-Bio pour modéliser la répartition des espèces

Type de variables	Nom de la base de données	Référence
Climat de référence (1961-1990)	Anusplin USDA Forest Service data	< http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate/ >
Climat futur (2071-2100)	Canadian Regional Climate Model (CRCM4)	< http://www.ouranos.ca/ >
Climat futur (2071-2100)	Global Climate Models	< http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php >
Sols (Québec)	Système d'information écoforestière	< http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/inventaire/index.jsp >
Sols (États-Unis)	USDA SSURGO	< http://www.soils.usda.gov/survey/geography/ssurgo/ >
Topographie	GeoBase	< http://www.geobase.ca/geobase/en/data/cded/index.html >

Pour plus de détails, voir Berteaux *et al.* (2010).

3. L'ÉLABORATION DES MODÈLES

L'élaboration d'un modèle de niche suit quatre étapes principales. La première consiste à choisir les algorithmes utilisés pour relier mathématiquement la répartition des espèces aux variables environnementales. Suivent ensuite la calibration qui permet de formuler cette relation mathématique entre la répartition et l'environnement, l'évaluation qui sert à juger si le modèle reproduit avec fidélité la répartition observée et, finalement, la projection qui permet d'obtenir la répartition future potentielle de l'espèce (ou, si l'on préfère, la répartition future des conditions environnementales propices à l'espèce) sous chacun des scénarios climatiques retenus. La figure 4.2 résume ces quatre étapes et peut faciliter la lecture de la présente section sur l'élaboration des modèles, et de la section suivante sur la confiance que nous devrions avoir dans les prévisions.

3.1. Le choix des algorithmes

Trois approches principales (trois types d'algorithmes) permettent d'établir la relation mathématique entre la répartition d'une espèce et son environnement :

- » les **approches de régression**, parmi lesquelles les modèles linéaires généralisés, les modèles additifs généralisés et la régression multivariée par spline adaptative ;
- » les **approches de classification**, parmi lesquelles les arbres de classification et l'analyse discriminante ;
- » les **approches d'apprentissage**, parmi lesquelles les réseaux de neurones artificiels et les forêts aléatoires.

Aucune de ces méthodes n'est systématiquement meilleure que les autres (Marmion *et al.*, 2009a). L'efficacité de chacune dépend du type de données analysées et des critères que l'on utilise

pour juger de sa performance (Pearson *et al.*, 2006). Il est donc recommandé de répéter les analyses en utilisant plusieurs méthodes (Thuiller *et al.*, 2004a; Araújo *et al.*, 2005; Pearson *et al.*, 2006), puis de tirer de ces répétitions le résultat le plus consensuel, tel que décrit dans la section 4.2. Ceci est d'ailleurs facilité par l'existence de plateformes conçues dans ce but, comme BIOMOD (Thuiller *et al.*, 2009) que nous avons adoptée pour CC-Bio et qui fonctionne sous le logiciel libre R (R Development Core Team, 2009).

3.2. La calibration

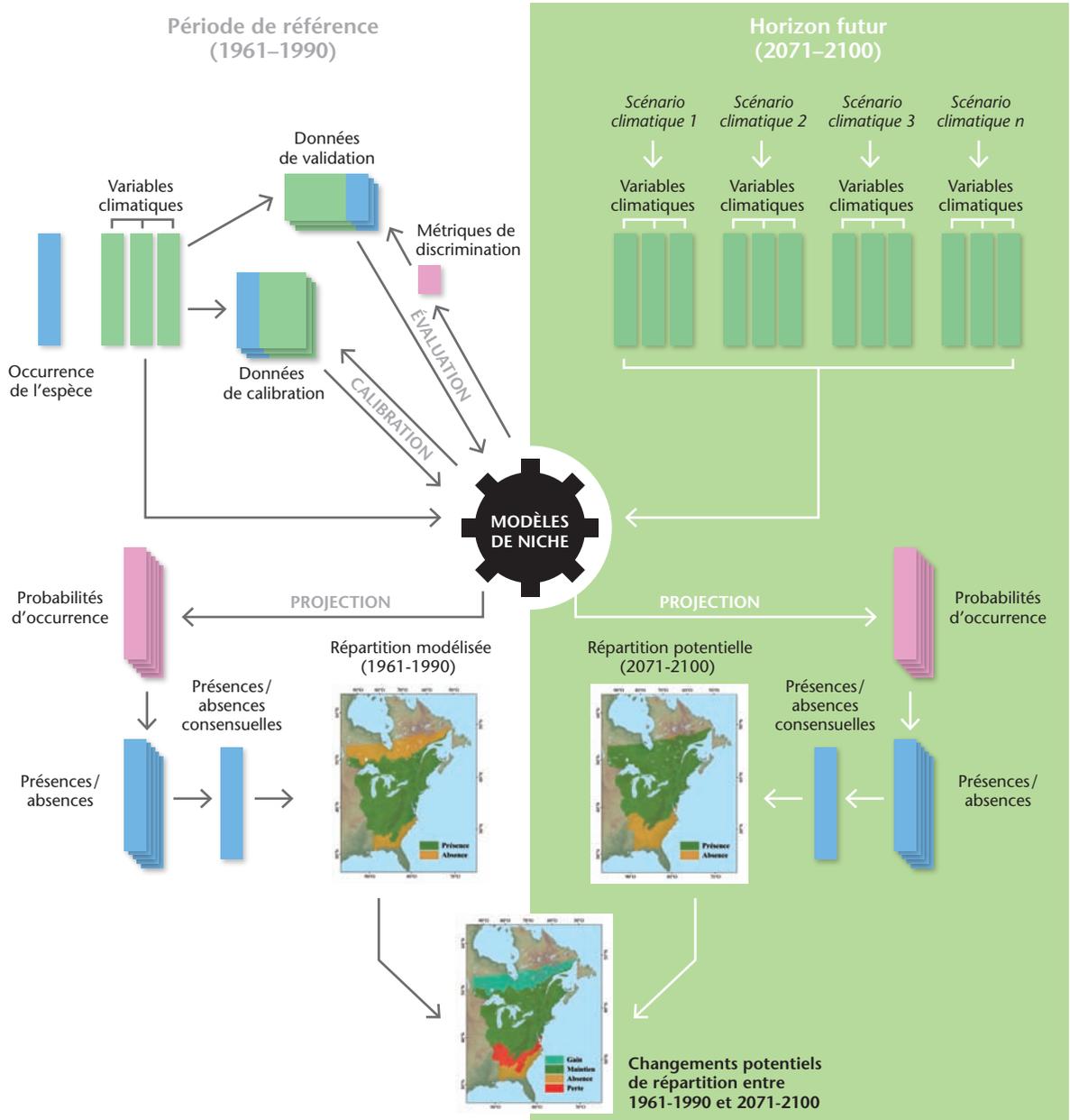
La formulation mathématique de la relation entre la répartition d'une espèce et son environnement se fait de manière statistique, par exemple en estimant les coefficients associés à chaque facteur environnemental (pour les méthodes de régression) ou en déterminant des règles de classification (pour les approches de classification). Quelle que soit l'approche utilisée, la calibration d'un modèle de niche permet de créer des courbes de réponse qui expriment la répartition de l'espèce en fonction de chaque facteur environnemental. Bien que les modèles de niche doivent prévoir la présence ou l'absence de l'espèce dans chaque cellule (une réponse binaire), ils modélisent la répartition sous forme de probabilités d'occurrence, ce qui permet d'exprimer les courbes de réponse de manière continue.

Les statistiques sont une science complexe en constante évolution, plutôt qu'une technique établie. Aussi, le niveau de détails qui serait nécessaire pour pleinement expliquer la calibration des modèles de niche que nous avons utilisés dépasse de loin les objectifs de ce livre. Un traitement plus approfondi de la question est disponible dans Guisan et Zimmermann (2000).

3.3. L'évaluation

Une fois les coefficients du modèle (ou les règles de classification) estimés, il faut juger la performance

Figure 4.2. Étapes pour élaborer un modèle de niche et prévoir la répartition future potentielle d'une espèce



La plupart des étapes sont répétées à de multiples reprises pour estimer la confiance dans la projection obtenue (voir la section 4).

du modèle. C'est la phase d'évaluation, qui permet de connaître le degré de fidélité avec lequel le modèle de niche reproduit la répartition observée de l'espèce.

La façon la plus robuste de procéder consiste à évaluer le modèle de niche en fonction de données indépendantes de celles ayant permis sa calibration. Cependant, de telles données sont rarement disponibles. Des techniques alternatives, basées sur un ré-échantillonnage, permettent d'évaluer le modèle sur des données pseudo-indépendantes. Une des techniques les plus courantes est la validation croisée (Araújo *et al.*, 2005), qui sépare aléatoirement le jeu de données initial en deux parties : le jeu de calibration (voir la section 3.2), qui permet de construire le modèle et d'en estimer les paramètres, et le jeu de validation, sur lequel le modèle de niche est évalué (figure 4.2). On alloue en général les trois quarts des données disponibles au jeu de calibration et le reste au jeu de validation.

Des indices ont été développés pour évaluer les performances prédictives d'un modèle de niche. Nous avons vu que ces modèles prévoient la répartition de l'espèce sous forme de probabilités d'occurrence, mais que la répartition observée de l'espèce est en format binaire (présence/absence). Pour comparer les prévisions aux observations, il faut donc transformer les probabilités d'occurrence en données de présence/absence. La manière la plus simple consiste à décréter que toutes les probabilités d'occurrence situées en dessous d'un certain seuil correspondent à des absences, les autres devant des présences. Le choix du seuil idéal a été beaucoup discuté (Liu *et al.*, 2005) et nous n'entrons pas ici dans les détails ayant permis de fixer ce seuil.

Une fois ces étapes effectuées, nous avons utilisé l'indice de performance Kappa, qui évalue les performances prédictives du modèle en tenant compte à la fois du bon classement des présences et du bon classement des absences. Kappa varie de 0 à 1 et sa valeur maximale correspond à un modèle qui reproduit parfaitement la répartition observée de l'espèce.

Kappa a cependant une faiblesse : il dépend d'un seuil de transformation pour convertir les

probabilités d'occurrence prédites par le modèle en données de présence/absence. D'autres indices, indépendants de tels seuils, ont donc été développés pour pallier ce défaut. Le plus connu est l'AUC (un acronyme pour l'expression anglaise *Area under the receiver operating characteristic curve*), qui a recours à une multitude de seuils de transformation répartis entre 0 et 1 pour tracer une courbe exprimant la somme de bons classements de présences en fonction de la somme de bons classements d'absences. L'AUC correspond à l'aire comprise sous cette courbe et les performances prédictives du modèle sont maximales quand cette aire égale 1 (tableau 4.5).

Tableau 4.5. Valeurs seuils d'AUC et de Kappa utilisées pour juger la performance des modèles

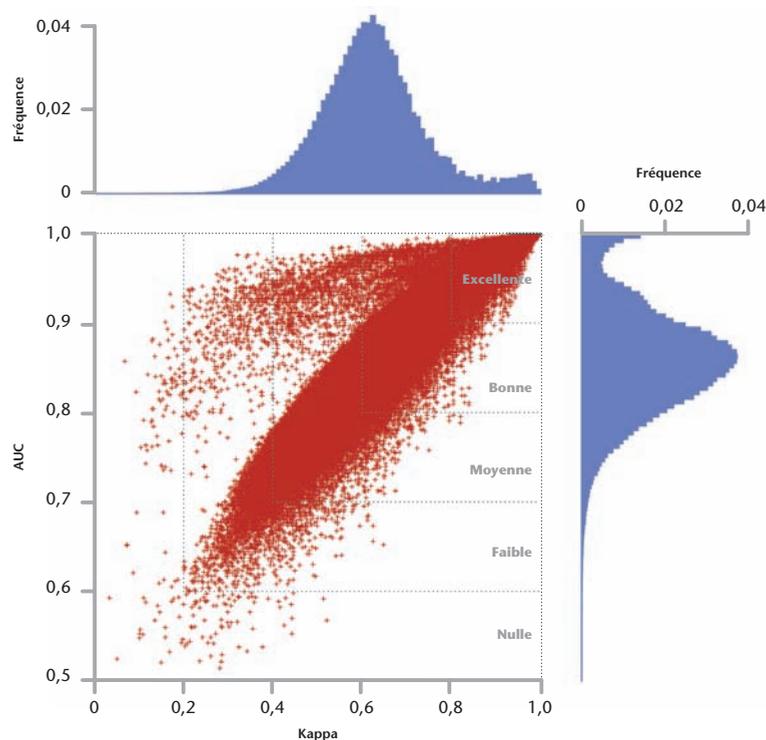
Performance des modèles	AUC	Kappa
Null	0,5-0,6	0,0-0,2
Faible	0,6-0,7	0,2-0,4
Moyenne	0,7-0,8	0,4-0,6
Bonne	0,8-0,9	0,6-0,8
Excellente	0,9-1,0	0,8-1,0

Nous avons utilisé à la fois Kappa et l'AUC pour identifier les espèces pour lesquelles les modèles présentaient de bonnes performances prédictives. La figure 4.3 montre la distribution des performances, selon ces deux métriques, de l'ensemble des modèles calibrés pour les oiseaux, les amphibiens et toutes les plantes. Nous avons pu établir des modèles performants pour un peu plus de 80 % des 943 espèces modélisées, soit 765 espèces.

3.4. La projection

Une fois qu'un modèle performant a été créé, il peut être projeté à l'horizon 2071-2100 en substituant les valeurs des variables climatiques de la

Figure 4.3. Performances de 380 760 modèles statistiques calibrés durant le projet CC-Bio



Chaque croix représente un modèle statistique. Les zones délimitées par les pointillés correspondent à différentes qualités de performance prédictive des modèles. La distribution de fréquence des valeurs d'AUC et de Kappa est représentée en bleu.

période de référence (1961-1990) par celles des scénarios climatiques. Les projections à l'horizon 2071-2100 fournissent des probabilités d'occurrence potentielle de l'espèce dans chacune des cellules de la zone d'étude, exactement comme l'avaient fait les projections produites pour la période de référence lors de la phase de calibration. Les probabilités futures potentielles obtenues sont alors transformées en format binaire, en appliquant le seuil de transformation qui avait été déterminé lors des projections pour la période de référence. Les cellules où le climat sera favorable (ou, au contraire, défavorable) à l'espèce en 2071-2100 deviennent faciles à identifier. Cette démarche fournit une carte de répartition future potentielle de l'espèce pour chaque modèle et chaque scénario climatique.

4. LA CONFIANCE DANS LES PRÉVISIONS

La principale question qui surgit lorsque l'on examine la répartition future potentielle d'une espèce est forcément « à quel point peut-on se fier à cette prévision ? ». Cette question comporte deux volets. D'abord, il faut se demander comment l'espèce se comportera vis-à-vis de la nouvelle répartition de son enveloppe climatique. L'espèce pourra-t-elle s'établir dans les zones qui lui deviendront favorables de celles où le climat lui deviendra défavorable ? À quelle vitesse ces deux processus se produiront-ils ?

Nous n'avons, pour la plupart des espèces, aucun outil efficace pour répondre correctement à ces questions. Des incertitudes vont donc demeurer à l'issue de notre effort de modélisation. Soulignons-le encore une fois, la modélisation ne nous offre que la carte des lieux où le climat deviendra favorable à l'espèce (dans le cas des arbres, la modélisation tient aussi compte de la nature des sols et de la topographie).

Il faut aussi se demander, dans un second volet, si la nouvelle répartition de l'enveloppe climatique est valide. Si c'est le cas, la modélisation nous aura permis de faire de grands progrès dans notre capacité à envisager l'avenir. Dans le passé, les espèces ont en effet largement suivi les déplacements de leur niche climatique, quoiqu'à des vitesses très variables.

Comme nous allons le voir dans cette section, il est possible de mesurer la confiance que nous devrions avoir dans la cartographie de l'enveloppe climatique d'une espèce à l'horizon 2071-2100. Cela représente un atout considérable pour évaluer la trajectoire future de la biodiversité.

4.1. Les sources d'incertitude

Nous avons vu précédemment que les choix de modèles statistiques et de scénarios de changements climatiques pouvaient tous deux introduire de la variabilité dans les projections des niches des espèces, et donc dans les cartes de répartition potentielle future produites. De nombreuses études ont montré que le choix des modèles statistiques affecte plus les projections des niches écologiques que le choix des scénarios climatiques (Diniz-Filho *et al.*, 2009; Buisson *et al.*, 2010). Cependant, l'incertitude introduite par les scénarios augmente au fur et à mesure que la niche est projetée loin dans le futur (Buisson *et al.*, 2010).

À ces deux sources d'incertitude vient s'ajouter la variabilité introduite par la validation croisée, qui oblige à effectuer la calibration et l'évaluation des modèles sur plusieurs échantillons aléatoires des données. Il est toujours possible que, par malchance, un échantillon aléatoire soit un mauvais reflet de

l'ensemble des données et que le modèle de niche calibré avec ce jeu de données soit assez différent du modèle calibré avec un autre jeu de données. Afin de contrebalancer les biais potentiels de cette procédure aléatoire, nous avons répété le sous-échantillonnage de 10 à 20 fois pour chaque modèle.

4.2. La projection d'ensemble

L'incertitude dont il vient d'être question pose deux défis. Le premier est de représenter la répartition potentielle future la plus probable à partir de la multitude de projections disponibles (encadré 4.4). La projection d'ensemble (Araújo et New, 2007) offre une solution élégante grâce à des techniques de consensus qui résument l'ensemble des projections en une seule (Marmion *et al.*, 2009b). La technique de consensus la plus souvent employée est la moyenne pondérée (Marmion *et al.*, 2009b), qui pondère chaque projection future par la valeur d'AUC du modèle correspondant, puis fait la somme de toutes les projections pondérées. La projection d'ensemble permet ainsi de générer une seule projection (la plus probable) à partir de toutes celles qui ont été réalisées.

4.3. L'estimation de la confiance

Le second défi est d'estimer et de représenter la confiance que l'on peut avoir dans le résultat issu de la projection d'ensemble. Ceci est possible en comparant chacune des projections produites avec la projection la plus probable. On peut alors, pour chaque cellule de la grille d'étude, calculer le pourcentage de projections s'accordant avec la projection la plus probable. Une carte de confiance est facilement générée à partir de ces pourcentages. Elle identifie les régions de l'aire d'étude où un fort consensus existe parmi les projections réalisées (on peut avoir une grande confiance dans le résultat de la modélisation pour ces régions) ainsi que celles où, au contraire, les projections divergent fortement

Encadré 4.4. QUELQUES STATISTIQUES SUR LA MODÉLISATION RÉALISÉE DANS CC-BIO

- Nombre d'espèces modélisées : 943.
- Nombre d'espèces projetées, c'est-à-dire modélisées avec une performance prédictive suffisante pour faire des projections à l'horizon 2071-2100 : 765.
- Nombre de modèles statistiques réalisés : 380 760.
- Nombre de projections futures potentielles obtenues : 3 308 840.
- Nombre de cartes de répartitions générées : 24 323 330.
- Espace occupé par les résultats de modélisation : 1 500 gigaoctets.

Un ordinateur de puissance intermédiaire (architecture 64 bits, processeur formé de deux doubles cœurs avec fréquence de deux fois 2,4 GHz et 4 Go de RAM) met environ 4,5 heures pour projeter dans le futur la niche d'une seule espèce.

entre elles (il vaut mieux être prudent dans l'interprétation des résultats de modélisation pour ces régions).

Une estimation globale de la confiance que l'on peut avoir dans les projections est aussi possible en effectuant une analyse de consensus. Cette analyse mesure, pour une espèce donnée, la corrélation entre les probabilités d'occurrence futures potentielles générées. Ceci peut se faire par une analyse en composantes principales (Thuiller, 2004), que nous ne détaillons pas ici.

Nous avons produit une carte de confiance et calculé une estimation globale de confiance pour chaque espèce étudiée. Nous verrons au chapitre suivant, en l'illustrant à la figure 5.2, à quel point cela enrichit l'interprétation des projections offertes par le projet CC-Bio.

CONCLUSION

L'attrait principal de la modélisation statistique (combinée à la puissance informatique) vient de ce qu'elle permet de manipuler d'énormes masses d'informations dont le traitement serait sinon hors

de portée. Elle génère cependant aussi de l'inconfort. En effet, l'évaluation qu'un biologiste, forestier ou technicien fait d'une situation repose en partie sur les intuitions qu'il a forgées par ses expériences de terrain. Or, les modèles fournissent des résultats que nous avons du mal à évaluer intuitivement, surtout s'ils nous projettent loin dans le temps. Il faut alors s'en remettre au long processus logique qui produit les résultats, confiants cependant qu'il s'agit d'un processus transparent dont chaque étape est exposée à la critique.

La modélisation que nous avons faite dans le projet CC-Bio a généré près de 25 millions de cartes de répartition potentielles d'espèces, que nous avons ensuite résumées et analysées sans perdre de vue notre objectif général : dresser un portrait des effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec au XXI^e siècle et en tirer les conséquences en matière de gestion et conservation. Les chercheurs en écologie ne sont certes pas dans la situation des physiciens qui anticipent avec précision la trajectoire des planètes. Nous possédons toutefois maintenant des outils prévisionnels puissants qui permettent d'orienter nos réflexions, comme nous le verrons dans la suite de ce livre.

*Une réponse imparfaite à un vrai problème vaut mieux
qu'une réponse parfaite à un faux problème.*

John Tukey

Notre vie n'est que mouvement.

Montaigne

C H A P I T R E

VERS UN NOUVEAU PATRIMOINE NATUREL

*Dominique Berteaux, Nicolas Casajus,
Sylvie de Blois et Catherine Périé*

À RETENIR

- L'étude détaillée d'une espèce, le bruant chanteur, montre d'abord la richesse des informations cartographiques et quantitatives issues des modèles de niche écologique, ainsi que la façon de les interpréter avec justesse.
- Après avoir modélisé et projeté à la fin du xx^{e} siècle la niche de 765 espèces, nous montrons que le repositionnement géographique des niches causé par les changements climatiques constituera au Québec une pression de changement absolument majeure pour de très nombreuses populations animales et végétales.
- Nous avons classé les réponses géographiques potentielles des espèces en plusieurs catégories: le déplacement, l'immigration au Québec, l'expansion, la contraction et l'extirpation.
- À la fin du siècle, le Québec devrait présenter des conditions climatiques favorables à l'arrivée de nombreuses nouvelles espèces. Le climat deviendra toutefois localement défavorable à beaucoup de populations actuellement bien établies.
- Les niches des espèces étudiées devraient se déplacer de 500 à 800 km en un peu plus d'un siècle, soit à des vitesses considérables de 45 à 70 km par décennie. L'orientation des déplacements de niche sera le plus souvent parallèle au fleuve Saint-Laurent.
- Peu d'espèces peuvent changer leur répartition à de tels rythmes et des délais importants entre le changement du climat et le remaniement de la biodiversité sont donc à prévoir.
- Le changement du climat modifiera de nombreux processus physiques et écologiques dans les écosystèmes. La façon dont ces changements interagiront avec le déplacement des niches climatiques demeure une grande inconnue.
- Nos résultats constituent la première évaluation globale des effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec. Cette évaluation constitue un atout de premier plan pour orienter les réflexions concernant la gestion des espèces et des écosystèmes.
- Un site Web (<<http://cc-bio.uqar.ca>>, consulté le 10 septembre 2013) accompagne ce livre et fournit de nombreuses informations complémentaires, notamment des milliers de cartes et tableaux détaillant nos résultats de modélisation pour des centaines d'espèces.

INTRODUCTION

La projection des niches écologiques de centaines d'espèces dans un climat futur génère une quantité prodigieuse d'information. Cette abondance de résultats pose deux défis aux chercheurs. D'abord, celui de ne pas perdre de vue les principales tendances sous une avalanche de cartes et de statistiques. Ensuite, celui de ne pas laisser dans l'ombre des informations cruciales concernant l'avenir d'une espèce ou d'une région particulière.

Nous avons résolu ce dilemme en condensant ici les résultats les plus importants et en produisant, en complément du livre, un site Web qui fournit les répartitions observées et potentielles (et leurs descriptions chiffrées) de 765 espèces (encadré 5.1). Un aperçu détaillé des résultats par espèce, impossible à fournir dans ce livre, devient ainsi disponible au lecteur.

Nous amorçons ce chapitre par une étude de cas qui permet de bien illustrer les résultats obtenus par la modélisation de niche. Cet exemple détaillé est indispensable pour interpréter les informations disponibles dans le chapitre ainsi que sur le site Web. Nous présentons ensuite les grands types de réponses spatiales que les changements climatiques pourraient imposer aux espèces sur le territoire du Québec. Nous proposons finalement une synthèse des effets attendus des changements climatiques sur

la biodiversité du Québec, en réfléchissant aux transformations des assemblages d'espèces et des écosystèmes que le réchauffement du climat pourrait engendrer.

1.

UNE ÉTUDE DE CAS : LE BRUANT CHANTEUR

Le bruant chanteur (figure 5.1) est un petit passe-reau répandu en Amérique du Nord et très commun au Québec, y compris dans les zones urbaines. Son plumage sans éclat, marqué d'épaisses raies brunes, le camoufle bien dans l'habitat arbustif et buissonneux qu'il affectionne, mais n'en fait pas une espèce remarquée de tous. Pourtant, chacun a dû le voir ou

Encadré 5.1. LES CARTES ET LES DONNÉES DISPONIBLES EN COMPLÉMENT DU LIVRE

Le site <<http://cc-bio.uqar.ca>> (consulté le 10 septembre 2013) offre 11 475 cartes accessibles grâce à un menu déroulant qui permet de choisir une espèce (parmi 765 disponibles), un horizon temporel (1961-1990, 2041-2070, 2071-2100) et un type de cartes. Il permet de visualiser la niche climatique de chaque espèce ainsi que 3 825 tableaux de données fournissant près de 24 000 métriques décrivant le bilan chiffré des analyses réalisées pour ce livre.

l'entendre (souvent sans y prêter attention) tellement le mâle répète inlassablement son chant depuis un perchoir bien visible. L'espèce est migratrice au Québec et se réfugie aux États-Unis à l'approche de l'hiver.

Nous avons choisi le bruant chanteur pour présenter cette étude de cas, car il occupe des habitats assez répandus, se nourrit d'une grande variété d'aliments et a une excellente capacité de dispersion. On peut donc penser qu'il répondra rapidement au déplacement de sa niche climatique. L'interprétation des résultats obtenus pour cette espèce en est ainsi facilitée.

1.1. Une représentation visuelle des effets des changements climatiques

On peut distinguer six étapes dans la projection de la répartition potentielle future de l'espèce. La plupart de ces étapes fournissent des informations faciles à cartographier (figure 5.2).

Figure 5.1. Bruant chanteur



Source : Photo de Singammer, Creative Commons, <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Melospiza-melodia-001.jpg>>, consulté le 25 septembre 2013.

La répartition observée en 1961-1990

La répartition du bruant chanteur en période de nidification durant la période de référence (1961-1990) constitue notre point de départ. La figure 5.2A montre bien la répartition étendue de l'espèce dans l'est de l'Amérique du Nord, avec cependant une faible occupation, voire une absence, des parties les plus nordiques de la zone d'étude. Cette carte reflète aussi le grand effort d'observation et d'archivage des données qui caractérise le sud du Québec, où les ornithologues sont nombreux et bien organisés.

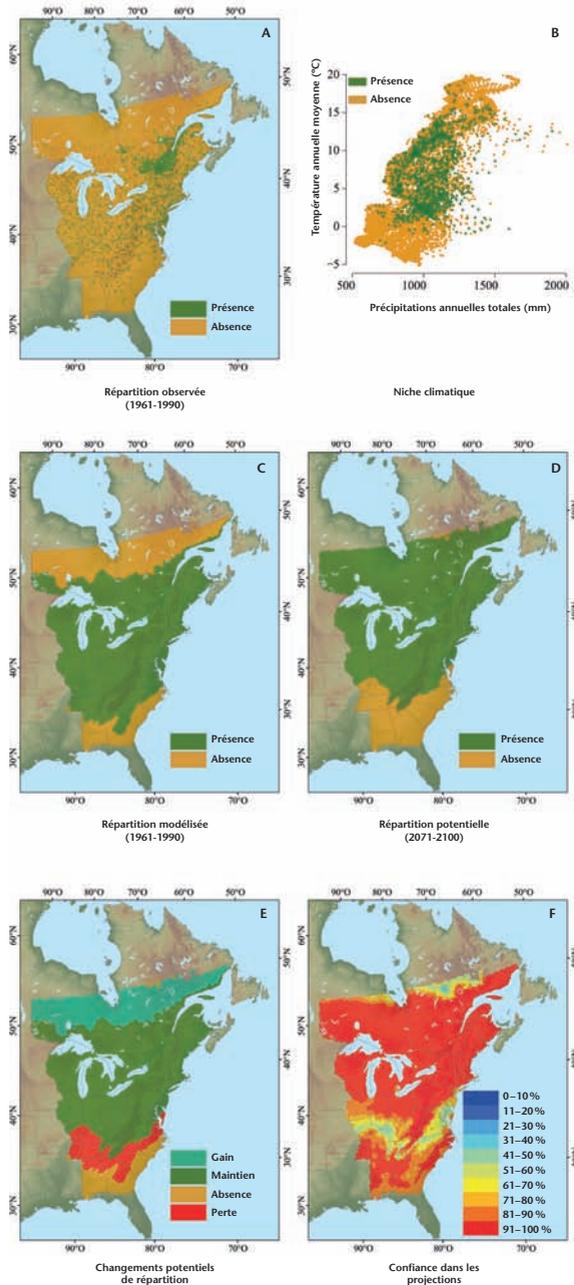
La niche climatique du bruant chanteur

La répartition du bruant chanteur observée en 1961-1990 permet de délimiter sa niche climatique, que nous représentons de façon simplifiée selon deux axes : les précipitations annuelles totales et les températures annuelles moyennes (figure 5.2B). La niche climatique des espèces a été modélisée avec des variables climatiques parfois différentes ou plus nombreuses (voir le tableau 4.3), mais la représentation simplifiée de la figure 5.2B a été adoptée pour toutes les espèces afin de faciliter les comparaisons. Chaque point correspond à une cellule de la grille d'étude, ce qui permet de voir d'un coup d'œil l'ensemble des conditions climatiques de la zone étudiée. La répartition des cellules où le bruant chanteur est présent en saison de reproduction (en vert) montre que la gamme des conditions climatiques qui lui conviennent est étendue, bien que l'espèce soit quasi absente en deçà de l'isotherme de 0 °C (comme montré par Cyr et Larivée, 1995) et au-delà de l'isotherme de 15 °C.

La répartition modélisée en 1961-1990

La répartition modélisée du bruant chanteur (figure 5.2C) montre les endroits où le climat est propice à la reproduction de l'espèce d'après les modèles de niche que nous avons construits (la carte est une représentation moyenne des sorties des modèles). Une modélisation performante doit générer une répartition assez semblable à la répartition observée. C'est le cas pour le bruant chanteur, comme le suggère l'excellente correspondance entre les contours des répartitions observée et

Figure 5.2. Résultats graphiques issus de la modélisation de la niche climatique du bruant chanteur



modélisée. Notons cependant deux différences entre ces répartitions. La première est que la répartition modélisée est continue alors que la répartition observée est discontinue: il est probable que l'effort d'observation et d'archivage de données ait été trop faible pour que toutes les cellules où l'espèce était présente aient été recensées (sauf dans le sud du Québec). Il est possible aussi que des facteurs autres que climatiques empêchent la reproduction de l'espèce à certains endroits. La seconde est que le modèle n'a pas la capacité de recréer les présences isolées en marge de l'aire de répartition, comme dans certains endroits de la forêt boréale.

La répartition potentielle en 2071-2100

La figure 5.2D est la plus intéressante puisqu'elle montre la répartition géographique de la niche climatique du bruant chanteur en 2071-2100. Il s'agit d'une moyenne pondérée de 490 répartitions futures potentielles issues de 70 modèles statistiques couplés à sept scénarios de changements climatiques. On peut facilement voir que le climat demeurera favorable à l'espèce là où elle est déjà présente au Québec, mais qu'il deviendra également favorable dans une grande zone qui est aujourd'hui peu ou pas occupée. La carte montre ainsi où pourrait nicher cette espèce à la fin du siècle si elle ajustait sa répartition à celle de sa niche climatique. Nous avons déjà insisté sur la nature potentielle de cette répartition future. Bien que le bruant chanteur puisse se déplacer facilement et que son habitat et sa nourriture soient fort répandus, il est toujours possible qu'il ne colonise pas tous les endroits où le climat lui deviendra favorable. On sait par exemple qu'il pénètre peu au cœur des forêts fermées (Gauthier et Aubry, 1995).

Les changements potentiels de répartition

La figure 5.2E met en évidence les différences marquées entre la répartition potentielle future du bruant chanteur et sa répartition modélisée durant la période de référence. Cette carte montre clairement l'ampleur du déplacement anticipé des conditions climatiques favorables à l'espèce, puisque le climat devient favorable dans une large bande située au nord de la zone d'étude. Cette grande zone, où le

bruant chanteur est aujourd'hui observé de façon très sporadique (figure 5.2A), pourrait, à la fin du siècle, constituer une partie importante de l'aire de répartition de l'espèce si ses autres besoins écologiques (nourriture, etc.) y sont aussi comblés. Inversement, l'espèce devrait perdre du terrain dans la portion sud de son aire de répartition, où le climat ne sera plus favorable.

La confiance dans les résultats obtenus

Comme nous l'avons vu à la section 4 du chapitre précédent, il est possible de mesurer la confiance dans les projections des modèles. La figure 5.2F offre une représentation spatiale de cette confiance. Les parties de la carte en rouge sont celles où les projections sont très cohérentes entre elles. Les couleurs passent à l'orange ou au jaune dans les cellules où les prévisions divergent entre les projections réalisées. Les régions en bleu sont celles où de fortes divergences existent entre les projections: il faut être très prudent en interprétant les projections fournies dans ces régions. Au Québec, la large bande nordique dans laquelle les conditions climatiques devraient devenir favorables au bruant chanteur est très fortement colorée de rouge, ce qui nous permet d'affirmer avec beaucoup de confiance que le climat de la fin du siècle y sera propice à l'espèce.

1.2.

Une représentation chiffrée des effets des changements climatiques

Les résultats cartographiés à la figure 5.2 doivent être exprimés de façon quantitative pour permettre des comparaisons entre espèces, des synthèses régionales, ou un examen détaillé des changements potentiels d'aires de répartition. Il est également indispensable de fournir un résumé quantitatif des performances des modèles puisque cela permet d'évaluer la qualité des projections. Nous avons résumé au tableau 5.1 les informations quantitatives les plus importantes quant à la modélisation de la niche du bruant chanteur. Ce type de résumés est disponible sur le site Web pour chacune

des 765 espèces que nous avons étudiées (voir l'encadré 5.1). Le tableau 5.1 comporte cinq sections, chacune faisant ci-dessous l'objet d'explications particulières.

La répartition observée en 1961-1990

L'étendue de la répartition d'une espèce peut être mesurée de nombreuses façons. L'aire d'occupation du bruant chanteur peut par exemple être définie comme l'ensemble des cellules où l'espèce a été observée. La superficie occupée par l'espèce correspond alors au nombre de cellules occupées multiplié par la superficie d'une cellule (400 km²). Le bruant chanteur occupe ainsi près de 600 000 km² dans la zone d'étude. On peut critiquer ce chiffre en notant que beaucoup de cellules ne sont pas totalement occupées par l'espèce ou qu'une grille de résolution différente donnerait une superficie différente. L'important ici n'est pas la valeur absolue de la superficie calculée, mais plutôt la possibilité qu'elle nous offre de faire des comparaisons entre espèces ou entre régions. Notons par exemple que le bruant chanteur occupe, à l'intérieur de la zone d'étude, trois fois plus d'espace aux États-Unis qu'au Québec. Là encore, on peut noter certains biais dans cette comparaison en notant que l'effort d'échantillonnage et d'archivage de données par les ornithologues diffère probablement entre le Québec et les États-Unis. Ces chiffres restent cependant comparables entre espèces d'oiseaux.

La répartition de l'espèce peut aussi être décrite par des attributs géographiques de positionnement. En particulier, la mesure latitudinale des limites nord et sud et du centre de l'aire de répartition de l'espèce a une grande valeur, puisque l'on s'attend à un déplacement vers le nord des conditions favorables aux espèces à cause du réchauffement climatique. Nous avons estimé ces paramètres en identifiant les 10% de cellules les plus au nord (ou au sud) occupées par l'espèce puis en calculant la latitude moyenne de ces cellules. Pour le centre de la répartition, nous avons simplement calculé (par la méthode du barycentre) le centre du nuage de points formé par les cellules où l'espèce a été observée.

Tableau 5.1. Résultats quantitatifs issus de la modélisation de la niche climatique du bruant chanteur

Répartition observée (1961-1990)		Répartition modélisée (1961-1990)	
Superficie (km ²)		Superficie (km ²)	
Aire d'étude complète	597 600	Aire d'étude complète	2 781 200
Québec	197 600	Québec	443 200
Latitude (degrés)		Latitude (degrés)	
Limite nord	49	Limite nord	49
Limite sud	36	Limite sud	35
Centre	43	Centre	43
Répartition potentielle (2071-2100)		Changements potentiels de répartition	
Superficie (km ²)		Gain potentiel de superficie (%)	
Aire d'étude complète	3 244 400	Aire d'étude complète	30 ± 4
Québec	900 400	Québec	103 ± 16
Latitude (degrés)		Perte potentielle de superficie (%)	
Limite nord	52	Aire d'étude complète	13 ± 9
Limite sud	38	Québec	0 ± 0
Centre	46	Distance de déplacement (km)	
Performances des modèles		Limite nord	339 ± 40
Performances prédictives		Limite sud	351 ± 217
AUC	0,99	Centre	365 ± 98
Kappa	0,97	Vitesse de déplacement (km/décennie)	
Sensibilité (%)	98,5	Limite nord	31 ± 4
Spécificité (%)	98,5	Limite sud	32 ± 20
Confiance dans les projections		Centre	33 ± 9
Horizon 2071-2100	74,9	Angle de déplacement (degrés)	
		Centre	2

La section 1.2 résume la méthodologie utilisée pour calculer les métriques présentées au tableau.

La répartition modélisée en 1961-1990

La figure 5.2C a montré que la répartition modélisée correspondait assez bien à la répartition observée. Nous avons en effet vu que les contours des répartitions observée et modélisée sont très semblables, même si la répartition modélisée est beaucoup plus continue que la répartition observée. Les données chiffrées rendent bien compte de notre analyse visuelle. Les limites latitudinales nord et sud sont en effet les mêmes pour les répartitions observée et modélisée, alors que la superficie occupée est largement supérieure pour la répartition modélisée (plus de quatre fois plus grande si on considère l'ensemble de la zone d'étude et plus de deux fois plus grande pour le Québec). La description chiffrée de la répartition modélisée en 1961-1990 est très importante, car ces données seront ensuite comparées à celles de l'horizon 2071-2100 pour évaluer les changements potentiels d'aire de répartition de l'espèce suivant un réchauffement du climat.

La répartition potentielle en 2071-2100

Un premier intérêt de la description chiffrée de la répartition potentielle du bruant chanteur en 2071-2100 est de montrer que tous les attributs de positionnement géographique (barycentre et limites nord et sud) sont situés trois degrés plus au nord que ceux de la répartition modélisée en 1961-1990 (qui sont eux-mêmes semblables à ceux de la répartition observée). On mesure ainsi facilement l'ampleur prévue du glissement de la niche climatique de l'espèce vers le nord durant le XXI^e siècle.

L'analyse des superficies est également très intéressante. Selon le tableau 5.1, la répartition potentielle en 2071-2100 est environ 17% plus grande que la répartition modélisée en 1961-1990 si on fait l'analyse à l'échelle de toute la zone d'étude, mais 100% plus grande à l'échelle du Québec. On voit ainsi clairement que l'agrandissement de la niche climatique de l'espèce provoquée par le réchauffement du climat doit être jugée différemment suivant que notre perspective est régionale ou plus continentale.

Les changements potentiels de répartition

L'analyse chiffrée des changements potentiels de répartition permet d'approfondir les comparaisons que nous venons de faire à la section précédente. Ici, les gains potentiels de superficie représentent l'ensemble des cellules de 400 km² où une absence (répartition modélisée en 1961-1990) devient une présence (répartition potentielle en 2071-2100). Les présences qui deviennent des absences représentent les pertes. Chaque valeur est exprimée en pourcentage par rapport à la répartition modélisée en 1961-1990.

L'intérêt de ces mesures est qu'elles expriment des gains ou pertes potentiels bruts, c'est-à-dire des changements dans la répartition de la niche climatique qui peuvent être masqués quand on se contente de comparer les superficies des répartitions modélisées en 1961-1990 et en 2071-2100. Deux espèces dont la superficie de la niche climatique reste stable peuvent en effet faire face à des situations très différentes, l'une ayant une niche climatique spatialement stationnaire (gains et pertes nuls), l'autre ayant une niche climatique se déplaçant fortement vers le nord bien que de superficie stable (gains importants égalant les pertes).

Les distances de déplacement latitudinal des attributs géographiques sont exprimées en kilomètres pour faciliter l'interprétation. Nous avons aussi converti ces distances en vitesses de déplacement, ce qui est d'un grand intérêt pour les biologistes. En effet, pour qu'une espèce reste en équilibre avec les conditions climatiques qui lui sont favorables, sa répartition géographique doit suivre le déplacement de sa niche climatique. Dans le cas du bruant chanteur, les limites nord et sud de la niche climatique se déplacent d'environ 30 km par décennie. L'espèce a certainement des capacités de dispersion adéquates pour suivre ce déplacement de niche. Mais on peut douter que ce soit le cas pour d'autres groupes, comme les arbres.

Notons que les mécanismes biologiques à l'œuvre au front nord de colonisation d'une aire de répartition (dispersion d'individus, occupation

de nouveaux habitats, croissance de populations locales) sont fort différents de ceux en cause au front sud de décolonisation (dépérissement d'individus, décroissance de populations locales). Ainsi, l'interprétation des vitesses de déplacement d'une niche climatique ne fait pas appel aux mêmes raisonnements suivant que l'on s'intéresse à ses limites nord ou sud. Comme nous le voyons, la quantification des déplacements de niche représente peut-être l'élément le plus intéressant du tableau 5.1 (et le plus propice à discussion).

L'angle de déplacement du centre de la niche écologique, indiqué au tableau 5.1, exprime la direction générale dans laquelle celle-ci devrait se déplacer. Un angle de 0 degré représente un déplacement plein nord et un angle de 90 degrés représente un déplacement vers l'est.

Les écarts-types associés aux différents descripteurs des changements potentiels de répartition montrent l'incertitude due à la modélisation d'ensemble (l'écart-type représente la différence typique qui existe entre chaque valeur et la valeur moyenne). Cette incertitude est parfois assez faible, comme dans le cas du gain potentiel de superficie ou celui de la vitesse de déplacement de la limite nord. Elle est parfois au contraire plutôt élevée (vitesse de déplacement de la limite sud). Nous n'avons pas analysé en détail l'origine de cette variabilité, bien qu'il s'agisse d'un point intéressant à approfondir.

La confiance dans les résultats obtenus

La qualité prédictive d'un modèle, déterminée lors de sa phase d'évaluation (section 3.3), est très importante, car elle sert à décider si on le projette ou non à l'horizon 2071-2100. Un modèle incapable de reproduire la répartition observée de l'espèce ne peut pas être projeté dans le futur avec confiance. Nous montrons donc la performance des modèles (indices AUC et Kappa) (voir le tableau 4.5) à la fin du tableau synthèse de chaque espèce.

Les modèles construits pour le bruant chanteur montrent d'excellentes capacités prédictives (AUC = 0,99 et Kappa = 0,97 ; ils se situent dans le coin supérieur droit de la figure 4.3). La sensibilité et la spécificité, également rapportées dans le tableau 5.1,

indiquent le pourcentage de présences et d'absences, respectivement, correctement prévues par les modèles quand on compare les prévisions aux observations. La capacité de prévision des modèles est excellente dans cette étude de cas, puisque 98,5 % des prévisions correspondent aux observations, aussi bien pour les présences que pour les absences.

Dans le cas du bruant chanteur, nous avons réalisé 490 projections futures, en utilisant plusieurs sous-échantillons de données, plusieurs algorithmes et plusieurs scénarios de changement climatique. Ces projections s'accordent entre elles sur la majeure partie de l'aire de répartition future potentielle de l'espèce, bien que des désaccords apparaissent aux marges de celle-ci (figure 5.2F). La « confiance dans les projections » donnée au tableau 5.1 indique que les 490 projections futures générées pour le bruant chanteur montrent un accord de 74,9 %, une valeur plutôt forte étant donné les multiples sources d'incertitude en cause (sous-échantillonnage de données, algorithmes, scénarios climatiques). Nous pouvons donc avoir une grande confiance dans notre estimation de la répartition spatiale future de la niche climatique de cette espèce.

1.3.

Des prévisions spectaculaires à interpréter avec justesse

L'étude détaillée du bruant chanteur révèle trois éléments importants. D'abord, l'information mise à notre disposition par la modélisation de niche est certes d'une grande richesse, mais elle est également déroutante à cause de son abondance et de sa complexité. Rappelons en effet que nous avons produit la même information pour 764 autres espèces.

Ensuite, le résultat de ces projections est spectaculaire. La niche climatique du bruant chanteur (et donc sa répartition potentielle) se déplace de 350 km vers le nord durant ce siècle, ce qui correspond à un doublement de la superficie potentiellement occupée par l'espèce au Québec.

Finalement, la combinaison des deux points précédents (complexité et aspect spectaculaire des

résultats) est un terrain fort propice aux simplifications et abus d'interprétations. Rappelons donc encore une fois, pour conclure cette étude de cas, que le déplacement de la niche climatique d'une espèce entraîne un déplacement potentiel de sa répartition, mais que ce potentiel ne se réalise que si l'écologie de l'espèce (capacité de dispersion, disponibilité d'habitats spécifiques, etc.) le permet. Les prévisions spectaculaires du biostatisticien doivent donc être interprétées avec justesse par le biologiste.

2. DES ESPÈCES EN MOUVEMENT

Après avoir modélisé les répartitions potentielles futures de 765 espèces à l'échelle de l'est de l'Amérique du Nord, concentrons maintenant notre attention sur le Québec pour évaluer comment les changements climatiques pourraient en affecter la

biodiversité. Nous avons identifié, pour chaque espèce, les cellules situées au Québec dans lesquelles les conditions climatiques devraient devenir favorables (gains), devenir défavorables (pertes), rester favorables (maintiens) ou rester défavorables (absences).

La combinaison et la répartition de ces divers changements déterminent le type de réponses potentielles de chaque espèce. Par exemple, une espèce déjà présente au Québec pour laquelle le climat deviendra favorable dans de nouvelles cellules a un potentiel d'expansion géographique (c'est le cas du bruant chanteur). Au contraire, une espèce présente au Québec pour laquelle le climat deviendra défavorable dans certaines cellules a un potentiel de contraction géographique. Une espèce absente du Québec, mais pour laquelle le climat québécois deviendra favorable dans certaines cellules a, quant à elle, un potentiel d'immigration au Québec. Au total, sept catégories de réponses sont ainsi possibles, comme le résume le tableau 5.2.

Tableau 5.2. Réponses géographiques potentielles des espèces face aux changements climatiques

Réponse potentielle de l'espèce	Nombre de cellules dans lesquelles le climat deviendra favorable (gain)	Nombre de cellules dans lesquelles le climat deviendra défavorable (perte)	Nombre de cellules dans lesquelles le climat restera favorable (maintien)
Déplacement	Une ou plus	Une ou plus	Zéro, une, ou plus
Déplacement avec expansion		Déplacement avec des gains supérieurs aux pertes	
Déplacement avec contraction		Déplacement avec des gains inférieurs aux pertes	
Déplacement net		Déplacement avec des gains égaux aux pertes	
Immigration	Une ou plus	0	0
Expansion	Une ou plus	0	Une ou plus
Contraction	0	Une ou plus	Une ou plus
Extirpation	0	Une ou plus	0
Stabilité	0	0	Une ou plus
Absence	0	0	0

Les réponses s'appliquent au territoire pour lequel on examine l'évolution des conditions climatiques dans chaque cellule d'une grille d'étude.

Nous allons maintenant discuter de chacun des types de réponses aux changements climatiques listés dans le tableau 5.2, à l'exception des catégories « stabilité » (aucune espèce parmi les 765 modélisées n'entrait dans cette catégorie) et « absence » (nous ne nous intéressons qu'aux espèces présentes au Québec ou susceptibles de l'être à l'avenir).

2.1. Les déplacements des aires de répartition

À l'échelle du Québec méridional, un grand nombre d'espèces étudiées montre un déplacement géographique de leur niche climatique (et donc potentiellement de leur répartition) durant le *xxi*^e siècle. C'est le cas des trois espèces dont les réponses sont représentées à la figure 5.3.

Pour la majorité de ces espèces, la température annuelle moyenne (ou ses variables dérivées) constitue la variable climatique la plus importante dans les modèles. Les gains potentiels apparaissent au nord de la répartition et les pertes potentielles dans le sud. Une analyse plus fine des déplacements potentiels des limites de répartition nord et sud permet de dresser trois scénarios.

Chez les espèces telles que l'iris versicolore, à la répartition méridionale (figure 5.3A), les gains potentiels sont nettement supérieurs aux pertes potentielles sur le territoire du Québec. On qualifie donc ce type de réponses de « déplacement avec expansion ». Comme les gains se situent au nord de la répartition de l'espèce, on peut même parler de « déplacement avec expansion nordique ». L'iris versicolore, l'emblème floral du Québec, pourrait, d'ici la fin du siècle, voir ses conditions climatiques favorables disparaître des basses terres du Saint-Laurent, alors qu'un climat lui étant favorable devrait apparaître dans une grande partie de la zone boréale.

À l'opposé, la linnée boréale, dont la répartition est plus nordique (figure 5.3B), présenterait plus de pertes que de gains dans l'aire d'étude. On parle alors de « déplacement avec contraction » potentiel de l'aire de répartition. À l'instar de l'iris versicolore,

les pertes seraient localisées dans le sud du Québec, mais sur une superficie beaucoup plus grande, puisque la linnée boréale verrait ses conditions climatiques favorables disparaître du quart sud de la province. Très peu de gains potentiels sont attendus vers le nord. Notons que la position de la limite nord de notre zone d'étude, qui coupe le Québec en deux, nous empêche d'interpréter les résultats à l'échelle du Québec entier. Il est fort probable que la niche climatique future de l'espèce débordera au nord de notre zone d'étude et s'étendra donc dans la moitié nord du Québec, dans laquelle trop peu de données étaient disponibles pour permettre une modélisation adéquate.

Enfin, la niche climatique d'espèces comme la mitrille nue (figure 5.3C) pourrait présenter à la fin du siècle à peu près autant de gains que de pertes. On parle alors de « déplacement net » de la niche climatique. Les commentaires ci-dessus liés à la position de la limite nord de notre zone d'étude s'appliquent également ici. Constatons aussi que malgré une disparition potentielle des conditions climatiques favorables à la mitrille nue dans le quart sud de la province, cette espèce pourrait néanmoins se maintenir en altitude dans les régions de la Gaspésie ou de Charlevoix. Ces régions pourraient alors jouer un rôle de refuge climatique pour l'espèce.

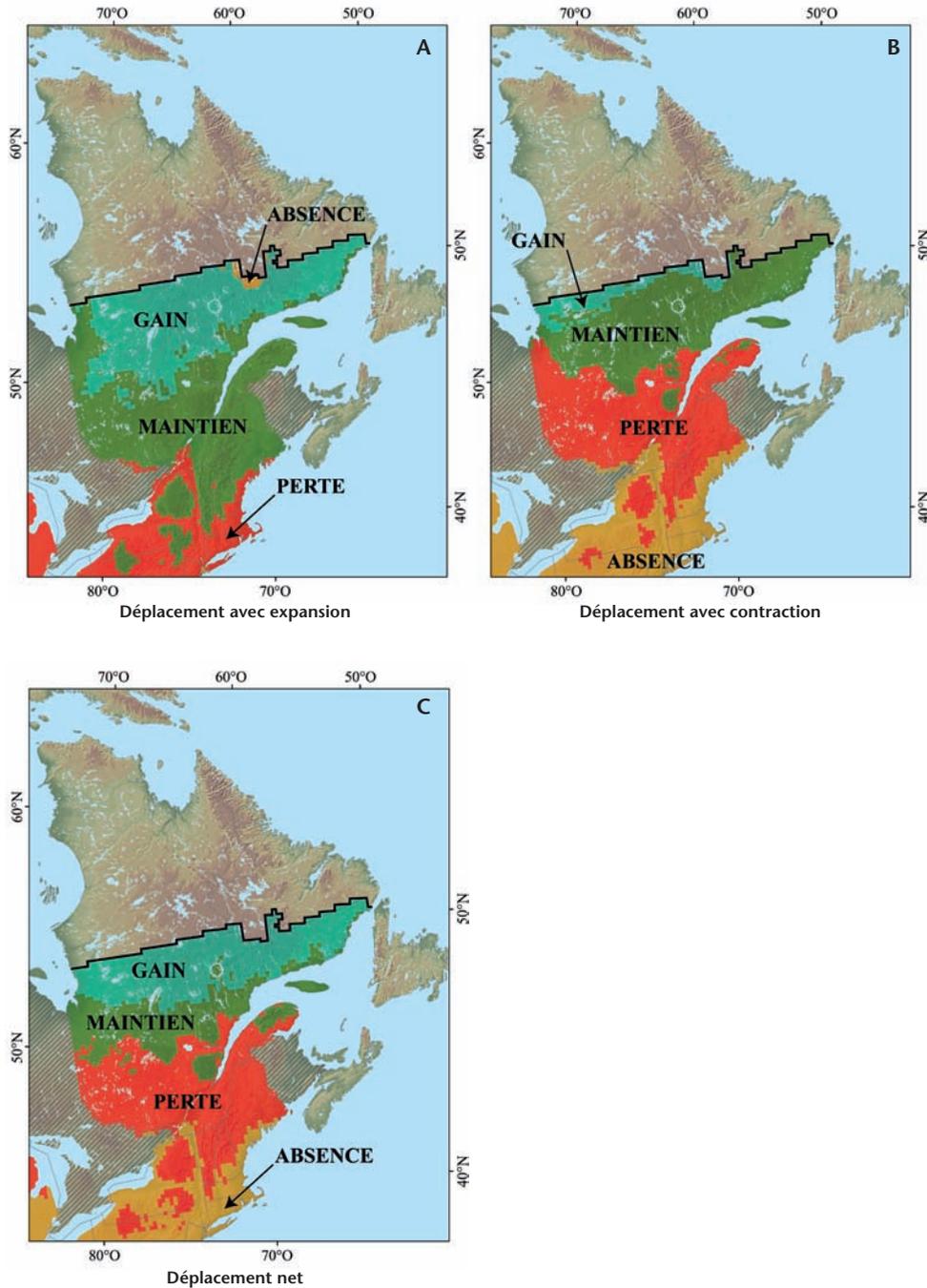
2.2. Les immigrations, expansions, contractions et extirpations

Les autres espèces que nous avons étudiées montrent, à l'échelle du Québec méridional et durant le *xxi*^e siècle, des changements potentiels de répartition très variés, allant d'arrivées (immigrations) à des extirpations, en passant par des expansions et des contractions. Quatre espèces illustrent, à la figure 5.4, ces repositionnements géographiques de la niche climatique.

Les immigrations

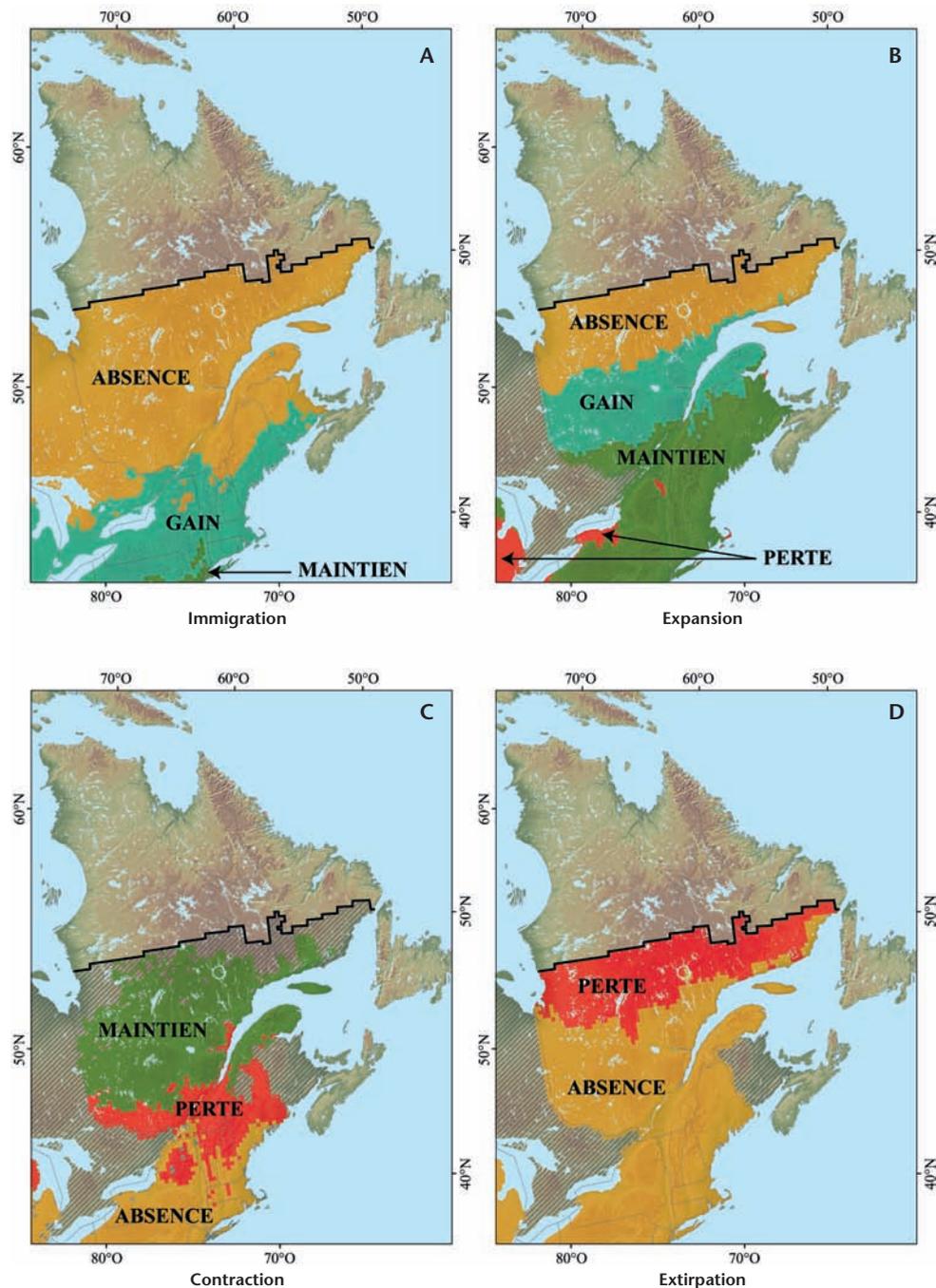
L'immigration au Québec constitue la réponse géographique potentielle des espèces actuellement absentes de la province, mais dont la niche climatique

Figure 5.3. Réponses de type « déplacement avec expansion », « déplacement avec contraction » et « déplacement net »



Les cartes montrent les changements potentiels de répartition de trois espèces végétales, l'iris versicolore (A), la linnée boréale (B) et la mitrelle nue (C) entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Les zones hachurées correspondent aux régions pour lesquelles aucune information n'était disponible pour l'espèce.

Figure 5.4. Réponses de type « immigration », « expansion », « contraction » et « extirpation »



Les cartes montrent les changements potentiels de répartition de la mésange de Caroline (A), de la grenouille des marais (B), de l'épinette noire (C) et du bouleau glanduleux (D) entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Les zones hachurées correspondent aux régions pour lesquelles aucune information n'était disponible pour l'espèce.

chevauchera le sud du Québec à la fin du siècle (voir le tableau 5.2). C'est le cas de la mésange de Caroline, illustrée à la figure 5.4A, pour laquelle les conditions climatiques devraient devenir propices dans les basses terres du Saint-Laurent vers la fin du siècle.

Les expansions

La plupart des espèces étudiées pour lesquelles le Québec est situé à la périphérie nord de la répartition durant notre période de référence (1961-1990) montrent une réponse potentielle de type « expansion ». La niche climatique de ces espèces devrait s'étendre vers le nord, entraînant potentiellement un agrandissement de leur aire de répartition au Québec. La grenouille des marais (figure 5.4B), pour laquelle 850 nouvelles cellules de 400 km² présenteraient un climat favorable au Québec à la fin du siècle, est un bon exemple d'expansion potentielle.

Notons qu'une expansion à l'échelle du Québec correspond souvent à un « déplacement » à l'échelle de toute notre zone d'étude, puisque ce type de réponses est souvent associé à des pertes de conditions climatiques favorables dans la portion américaine de l'aire de répartition.

Les contractions

Quelques espèces étudiées montrent une réponse de type « contraction ». La répartition de ces espèces devrait diminuer dans la portion québécoise de notre zone d'étude, puisque leur niche subit des pertes, mais aucun gain. C'est le cas de l'épinière noire (figure 5.4C), dont les conditions climatiques favorables pourraient disparaître dans 19 % des cellules situées au Québec.

Notons cependant que les conditions climatiques favorables à l'épinière noire devraient probablement se déplacer vers le nord, dans des régions situées au-delà de notre zone d'étude. La niche de l'espèce devrait donc faire certains gains au Québec que nous ne pouvons mesurer. Cette limite à l'interprétation de nos résultats s'applique à toutes les espèces dont la répartition est surtout nordique.

Les extirpations

La réponse est de type « extirpation » quand les conditions climatiques favorables à une espèce disparaissent complètement de la partie de la zone d'étude située au Québec (voir le tableau 5.2). C'est le cas du bouleau glanduleux (figure 5.4D). Comme nous l'avons vu pour l'épinière noire, la niche de l'espèce devrait cependant faire certains gains au Québec nordique que nous ne pouvons pas démontrer, car ils sont situés hors de la zone d'étude. La densification récente des populations de bouleau glanduleux à la limite nordique de la taïga (Ropars et Boudreau, 2012) et l'abondance grandissante de la végétation dans la toundra québécoise (McManus *et al.*, 2012) supportent d'ailleurs cette hypothèse.

2.3. Une très forte pression de changement

Les résultats qui précèdent suggèrent que les déplacements de niche provoqués par les changements climatiques du XXI^e siècle exerceront une forte pression sur la biodiversité du Québec. Décrivons maintenant trois caractéristiques importantes de cette pression de changement :

- » la proportion d'espèces dont les déplacements de niche pourraient entraîner chacune des réponses géographiques décrites ci-dessus ;
- » l'amplitude géographique du déplacement des niches ;
- » la direction de déplacement des niches.

Nous sommes habitués à une vision assez statique de la répartition géographique des espèces. Or, cette section nous entraîne vers une approche au contraire fort dynamique de la biodiversité du Québec. Cela nous obligera à utiliser des concepts peu communs, comme les délais et crédits d'immigration, les extinctions différées, et les déficits et excédents de biodiversité. Le tableau 1.2 définit tous ces termes. Il sera utile de s'y reporter, au besoin.

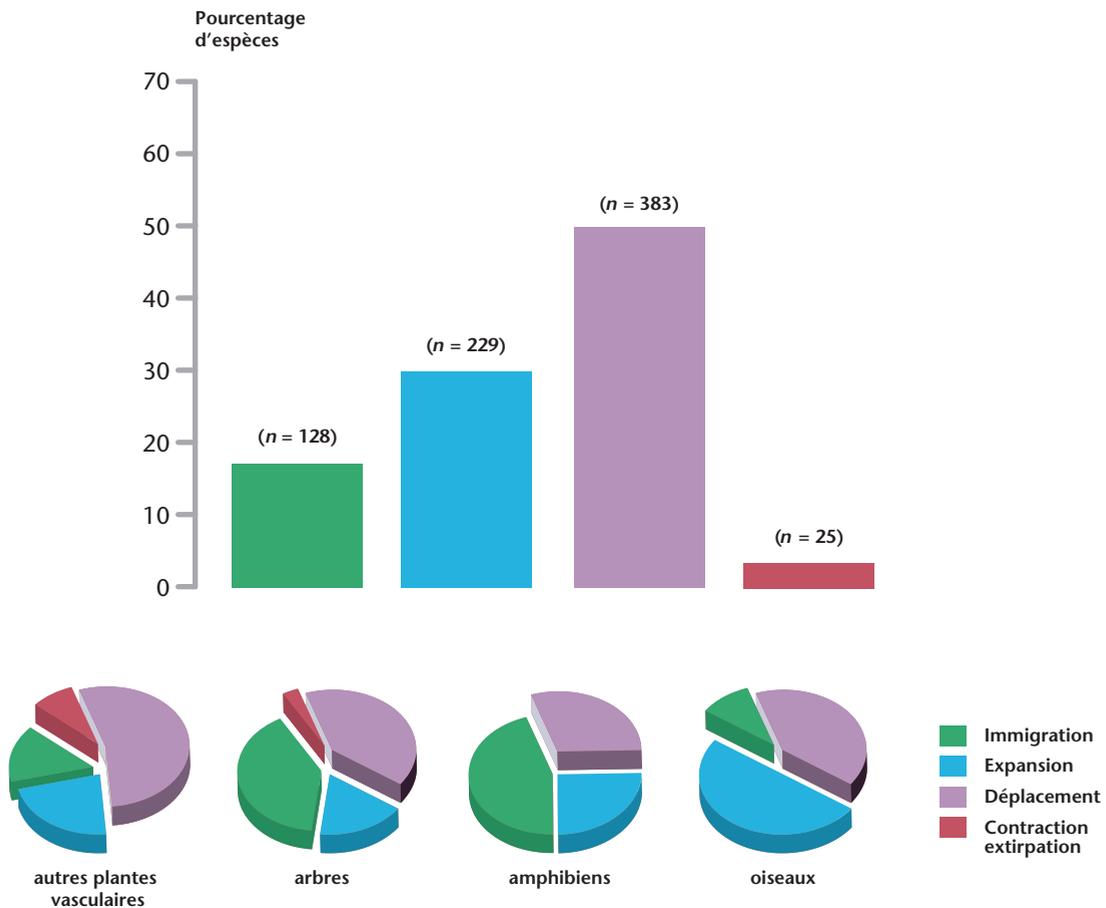
La proportion d'espèces selon chaque réponse géographique potentielle

La moitié des 765 espèces étudiées présentent une réponse de type « déplacement » (figure 5.5). La niche de nombreuses autres espèces (30 % des 765 espèces étudiées) montre une expansion, alors que 17 % ont une niche qui était absente du Québec durant notre période de référence, mais qui devrait

chevaucher le territoire de la province à la fin du siècle (catégorie « immigration »). Seules 2 % des espèces étudiées entrent dans les catégories « contraction » ou « extirpation ».

Ces proportions dépendent bien sûr de l'échantillon d'espèces étudiées, or la mesure dans laquelle cet échantillon est représentatif de l'ensemble de la biodiversité est difficile à évaluer. Les tendances observées sont cependant suffisamment marquées

Figure 5.5. Réponse potentielle de 765 espèces aux changements climatiques du XXI^e siècle dans le Québec méridional



Le diagramme à barres indique la proportion d'espèces (parmi les 765 étudiées) qui pourraient immigrer au Québec, étendre ou déplacer leur aire de répartition au Québec, ou bien qui pourraient diminuer leur répartition au Québec, voire être extirpées du Québec. Les diagrammes en secteurs illustrent la proportion d'espèces, à l'intérieur de chaque groupe étudié (oiseaux, amphibiens, arbres, autres plantes vasculaires), montrant ces principaux types de réponses potentielles aux changements climatiques.

pour être discutées avec confiance. Ainsi, les indications les plus importantes que ces proportions fournissent sont les suivantes :

- » Le changement climatique entraînera un «grand dérangement» des niches des espèces étudiées. Le repositionnement des niches climatiques des espèces constituera une pression de changement majeure pour de très nombreuses populations animales et végétales.
- » À la fin du siècle, le Québec pourrait présenter des conditions climatiques favorables à l'arrivée de nombreuses nouvelles espèces. Celles-ci se trouvent au sein de tous les taxa étudiés.
- » Très peu d'espèces verront leur niche climatique se contracter ou disparaître au Québec. Cette conclusion n'est cependant pas valide pour les espèces les plus nordiques.

Les 25 espèces qui montrent une contraction potentielle de leur aire de répartition (voire une extirpation ; tableau 5.3) sont des plantes. Aucun

oiseau ne fait partie de ces catégories, mais un biais méthodologique explique en partie ce résultat. En effet, nous n'avons pas pu modéliser la niche des espèces d'oiseaux dont la répartition s'étend largement dans le Québec nordique, or ce sont justement celles dont la superficie de la niche pourrait diminuer dans la zone d'étude. Tous les amphibiens présents au Québec y sont en périphérie nord de leur répartition, et leur niche climatique enregistrera des gains de superficie.

Nous avons additionné la surface occupée au Québec par les niches des 765 espèces étudiées. Cette surface cumulée est un indicateur grossier de la taille de l'espace climatique disponible pour l'échantillon de biodiversité que nous avons analysé. Elle était de 134 millions de km² durant la période de référence (1961-1990) et passera à 306 millions de km² à la fin du siècle. Cette multiplication par 2,3 en un peu plus d'un siècle est du même ordre de grandeur quand on analyse chaque groupe taxonomique séparément (tableau 5.4), bien que les amphibiens fassent des gains nettement supérieurs

Tableau 5.3. Les douze espèces étudiées dont la niche climatique pourrait disparaître du Québec méridional au cours du XXI^e siècle

Nom latin	Nom vernaculaire	Famille
<i>Alectoria ochroleuca</i>	Lichen « alectorie »	Alectoriaceae
<i>Arctous alpina</i>	Busserole alpine	Ericaceae
<i>Betula glandulosa</i>	Bouleau glanduleux	Betulaceae
<i>Betula minor</i>	Bouleau mineur	Betulaceae
<i>Cladonia crispata</i>	Lichen « cladonie »	Cladoniaceae
<i>Cladonia uncialis</i>	Lichen « cladonie »	Cladoniaceae
<i>Empetrum nigrum</i>	Camarine noire	Empetraceae
<i>Flavocetraria nivalis</i>	Lichen	Parmeliaceae
<i>Geocaulon lividum</i>	Comandre livide	Santalaceae
<i>Diphasiastrum x sabinifolium</i>	Lycopode à feuilles de genévrier	Lycopodiaceae
<i>Racomitrium lanuginosum</i>	Mousse	Grimmiaceae
<i>Vaccinium uliginosum</i>	Airelle des marécages	Ericaceae

Tableau 5.4. Surface cumulée occupée au Québec par les niches de 765 espèces en 1961-1990 et 2071-2100

Taxon	Nombre d'espèces	Surface 1961-1990 (km²)	Surface 2071-2100 (km²)	Différences	Coefficient multiplicateur
Amphibiens	38	3 730 400	10 884 800	7 154 400	2,9
Oiseaux	171	42 628 800	110 652 000	68 023 200	2,6
Arbres	84	10 229 200	21 581 200	11 352 000	2,1
Plantes	472	77 522 800	162 760 400	85 237 600	2,1
TOTAL	765	134 111 200	305 878 400	171 767 200	2,3

La surface occupée par les niches d'un groupe taxonomique donné lors d'une période donnée correspond à l'addition des superficies des répartitions modélisées de toutes les espèces de ce groupe pendant la période considérée.

(facteur multiplicateur de 2,9) à cette moyenne. L'espace climatique disponible pour l'échantillon de biodiversité que nous avons analysé devrait donc croître largement au Québec durant le XXI^e siècle.

L'amplitude des déplacements

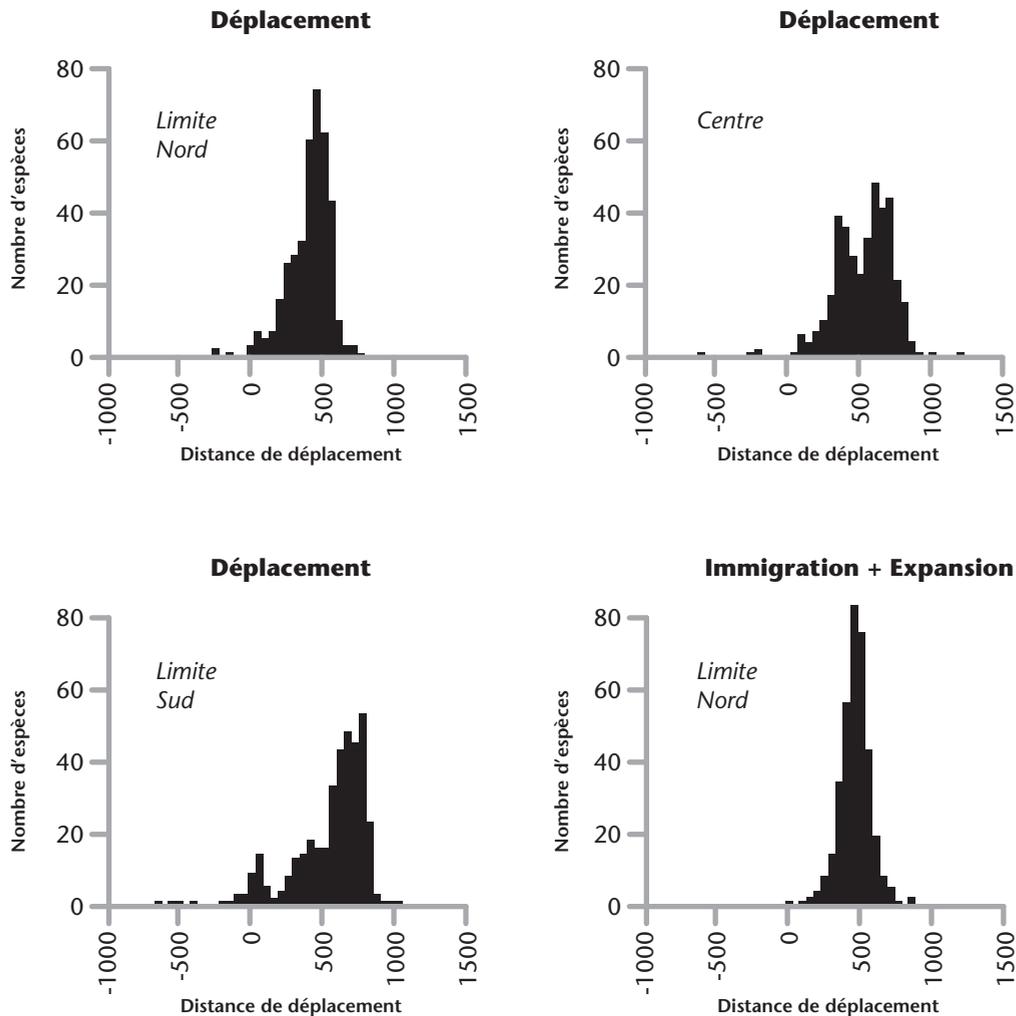
Pour la plupart des espèces étudiées, le centre et les limites nord et sud des niches devraient se déplacer de l'ordre de 500 km (parfois beaucoup plus) en un peu plus d'un siècle (figure 5.6). Ces déplacements de niche anticipés sont supérieurs à ceux prévus pour les isothermes du Québec méridional (voir la figure 2.7 et le tableau 2.3). Un déplacement de 500 km entre notre période de référence (1961-1990) et l'horizon 2080 (2071-2100) équivaut à une vitesse de déplacement de 45 km par décennie, ce qui est considérable.

Nous ne savons pas à quel point les espèces changeront leur répartition en réponse à ces déplacements de niches. Les cas de figure seront forcément très variables entre espèces et selon les régions, et seule une évaluation très sommaire des capacités de réorganisation spatiale des divers groupes d'espèces est pour l'instant possible (tableau 5.5). Par exemple, beaucoup d'espèces de plantes sont incapables de modifier naturellement leur répartition au rythme imposé par le changement climatique. Pour comparaison, la vitesse maximale de migration des arbres observée durant la période postglaciaire était de l'ordre d'une centaine de kilomètres par siècle

(Pearson *et al.*, 2006). À l'inverse, certaines espèces d'oiseaux ou d'insectes pourront vraisemblablement y parvenir. Ainsi, comme nous l'avons souligné à la section 2.3 du chapitre 3, la limite septentrionale de répartition de 80 espèces de papillons de l'est du Canada s'est déjà déplacée en moyenne de 44 kilomètres par décennie vers le nord entre 1970 et 2012 (Maxim Larrivée, communication personnelle). Notons enfin, comme nous l'avons déjà également évoqué (section 1.2), que le front de colonisation des espèces (généralement la limite nord) ne se déplacera pas selon les mêmes mécanismes et au même rythme que le front de décolonisation (généralement la limite sud). Cette complexité biologique illustre bien la difficulté de prévoir précisément l'avenir en écologie.

On peut donc s'attendre à de longs délais d'immigration : les conditions climatiques de certaines régions deviendront favorables à des espèces bien avant qu'elles ne les colonisent. Ces délais entraîneront l'accumulation d'importants crédits d'immigration au Québec durant le XXI^e siècle. Inversement, des espèces demeureront présentes en certains lieux bien après que les conditions climatiques leur soient devenues défavorables. Par exemple, des arbres adultes peuvent survivre longtemps dans des conditions climatiques qui empêchent pourtant leur reproduction. Le changement climatique va ainsi également créer des extirpations régionales différées et des excédents de biodiversité temporaires.

Figure 5.6. Amplitude de déplacement des niches de 740 espèces en réponse aux changements climatiques du xxi^e siècle au Québec



Les histogrammes intitulés « Déplacement » montrent les amplitudes de déplacement des limites nord et sud et du centre des niches de 383 espèces présentes au Québec méridional et pouvant présenter un déplacement en réponse aux changements climatiques. L'histogramme intitulé « Immigration + expansion » montre les amplitudes de déplacement de la limite nord des niches de 357 espèces pouvant immigrer ou étendre leur répartition au Québec en réponse aux changements climatiques. Les valeurs positives indiquent des déplacements vers le nord et les valeurs négatives des déplacements vers le sud.

La direction des déplacements

La direction dans laquelle les niches climatiques des espèces vont se déplacer est utile à préciser. Le fleuve Saint-Laurent est en effet une barrière naturelle importante qui sectionne le Québec méridional

selon un axe sud-ouest/nord-est. Pour de nombreuses espèces, cette barrière devient de plus en plus infranchissable au fur et à mesure que le fleuve s'élargit, se refroidit et se salinise, se transformant vers l'aval en estuaire, puis en golfe.

Tableau 5.5. Évaluation simplifiée du potentiel de réorganisation spatiale de quatre groupes d'espèces face au déplacement de leur niche climatique durant le XXI^e siècle

	Potentiel d'extinction rapide dans des habitats devenant climatiquement défavorables	Potentiel d'immigration rapide dans des habitats devenant climatiquement favorables
Oiseaux	Élevé	Faible à élevé
Amphibiens	Élevé	Faible
Arbres	Faible à élevé	Faible
Autres plantes	Faible à élevé	Faible à élevé

L'évaluation a été réalisée subjectivement en fonction de la capacité de dispersion moyenne des espèces et de leur degré de spécialisation envers certains habitats. Nous avons considéré comme « rapide » une extinction ou une immigration pouvant se produire en une ou deux décennies. Les parties ombrées indiquent que des mesures de gestion peuvent, de façon réaliste, modifier l'évaluation présentée.

Comme le montre la figure 5.7, le sens de déplacement des niches des espèces est largement nord/nord-est, quel que soit le groupe taxonomique considéré. Cette direction est à peu près parallèle à celle du fleuve. Celui-ci aura ainsi moins d'effet contraignant sur la réorganisation spatiale des espèces que si le sens de déplacement des niches lui était perpendiculaire.

De nombreuses autres barrières géographiques limitent cependant la dispersion des espèces au Québec. Par exemple, la Montérégie, qui ceinture le sud et l'est de Montréal, est fortement dominée par l'agriculture et l'urbanisation. Cette région est très difficile à traverser pour de nombreuses espèces. Une analyse détaillée de la fragmentation du territoire québécois serait ainsi nécessaire pour mieux évaluer les contraintes imposées à la réorganisation spatiale de la biodiversité du Québec méridional. Les directions de déplacement des niches climatiques seraient un élément important d'une telle analyse.

3. DES ÉCOSYSTÈMES EN TRANSITION

Les résultats qui précèdent indiquent qu'il faut s'attendre à des transformations importantes dans tous les écosystèmes du Québec. Que pouvons-nous

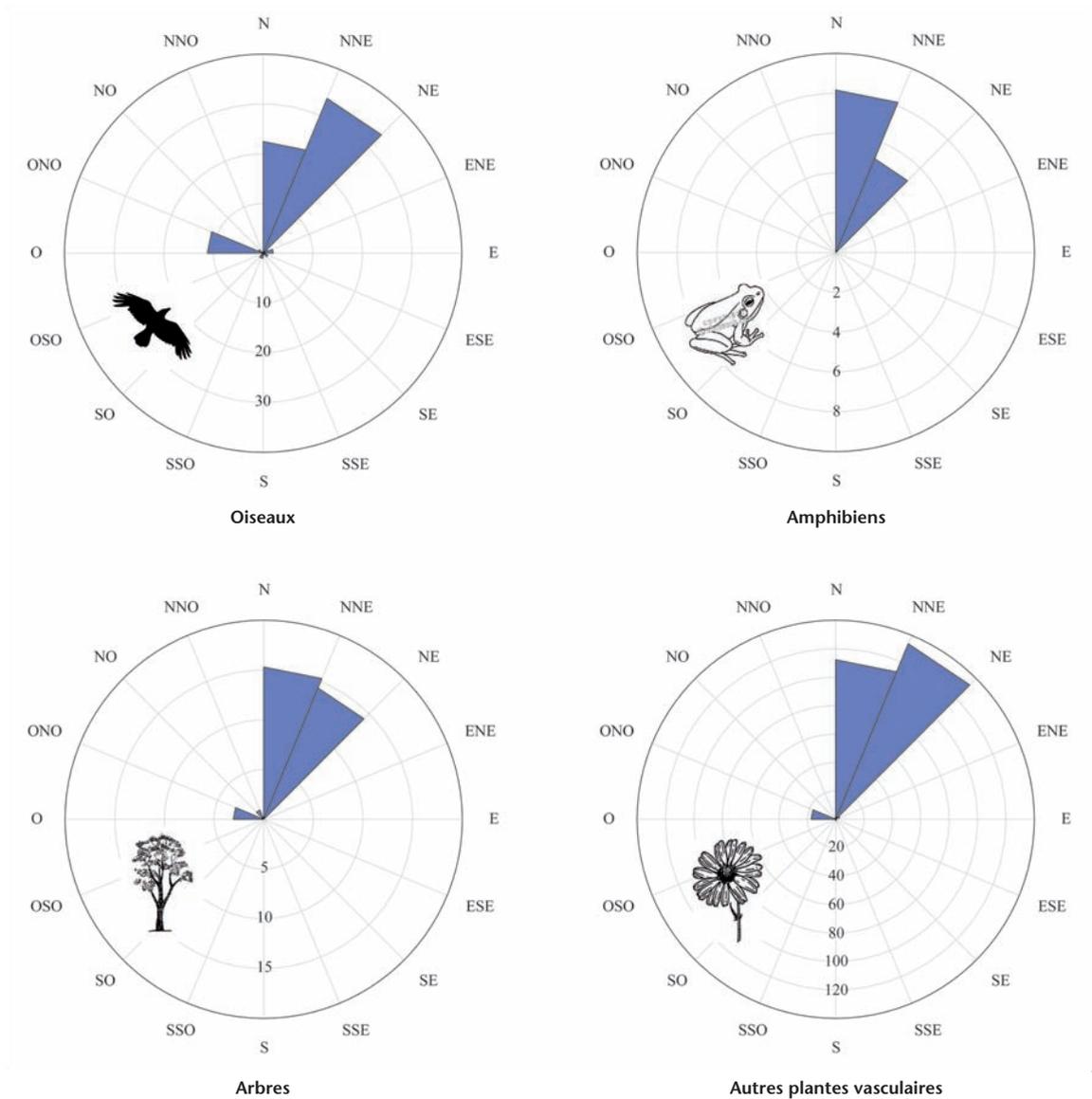
prévoir de ces transformations? La modélisation de niche nous permet de réfléchir aux assemblages futurs d'espèces, mais pas au fonctionnement des écosystèmes (le recyclage des nutriments, les échanges d'énergie, les relations entre espèces, etc.). Concentrons-nous donc sur le premier aspect.

Le premier constat issu de la modélisation est que les changements climatiques pourraient induire une augmentation de la biodiversité du Québec. Nous commencerons donc par traiter en détail ce que nous avons déjà qualifié de paradoxe de la biodiversité nordique (Berteaux *et al.*, 2010). Cependant, ce gain anticipé de biodiversité à l'échelle du Québec cache de nombreuses pertes probables d'espèces au niveau local ou régional. Ces pertes pourraient entraîner, dans certains cas, de profondes transformations des écosystèmes. C'est le revers de la médaille, que nous explorerons dans un second temps. Nous terminerons cette troisième section de chapitre en exposant les inconnues qui nous empêchent de dresser un portrait définitif de l'évolution des écosystèmes du Québec au XXI^e siècle.

3.1. Davantage d'espèces : le paradoxe de la biodiversité nordique

Selon notre étude, le nombre d'immigrations rendues possibles par le changement du climat serait,

Figure 5.7. Direction de déplacement de niche induite par les changements climatiques du xxi^e siècle pour 383 espèces présentant une réponse de type « déplacement »



Chaque diagramme circulaire présente le nombre d'espèces dont le déplacement de la niche au cours du xxi^e siècle se fera selon chacune des 16 catégories d'orientation représentées. L'échelle qui apparaît sur les cercles concentriques indique les nombres d'espèces. Par exemple, la niche de 22 espèces d'oiseaux et de 8 espèces d'amphibiens se déplacera vers le nord/nord-nord-est durant le xxi^e siècle. Dans le sens de la lecture : oiseaux, amphibiens, arbres, autres plantes vasculaires.

au Québec, supérieur au nombre d'extirpations qu'il pourrait entraîner. C'est un paradoxe, puisqu'à l'échelle planétaire, toutes les analyses prévoient que les changements climatiques réduiront la biodiversité (Hannah, 2012). Ce paradoxe s'explique surtout par la nature nordique de la biodiversité québécoise, que nous avons longuement décrite dans le premier chapitre.

La superposition cartographique des niches de toutes les espèces modélisées permet de faire une première synthèse éclairante. Elle montre en effet, lorsque l'on compare les périodes 1961-1990 et 2071-2100, comment devrait évoluer le nombre d'espèces pour lesquelles le climat (et les conditions topoédaphiques dans le cas des arbres) est favorable. La comparaison des deux cartes de la figure 5.8 est frappante puisque cette évolution est presque toujours positive au Québec : la quasi-totalité des cellules de la grille d'étude seront climatiquement favorables à plus d'espèces à la fin du ^{xxi}e siècle que durant notre période de référence.

On peut représenter d'une autre façon l'évolution anticipée du nombre d'espèces pour lesquelles le climat sera favorable, en découpant notre zone d'étude selon les écorégions de niveau III (figure 5.9). La conclusion demeure la même : en se réchauffant, le climat offrira des conditions favorables à un nombre grandissant d'espèces. Les pourcentages d'augmentation par écorégion sont souvent de 20-30 %, ce qui représente un gain potentiel de richesse spécifique considérable.

Toutefois, rappelons encore que la concrétisation de ces gains dépendra de la mesure dans laquelle la répartition de chaque espèce s'ajustera aux nouveaux climats. Si la plupart des espèces colonisent rapidement les nouvelles zones favorables tout en se maintenant assez longtemps dans celles qui deviennent défavorables, les gains en biodiversité seront supérieurs à nos estimations. Si, au contraire, peu de nouvelles colonisations se concrétisent, mais que de nombreuses extinctions locales ont lieu là où les conditions climatiques se dégradent, les gains en biodiversité seront inférieurs à nos estimations. N'oublions pas non plus que d'autres facteurs influenceront la biodiversité du Québec. Les changements

d'usage des terres, en particulier, auront un effet majeur que nous ne considérons pas ici.

Approfondissons encore la réflexion. L'augmentation de la richesse spécifique d'une communauté peut résulter de situations très variables selon le taux de renouvellement des espèces de l'assemblage. Par exemple, une augmentation de 20 % du nombre d'espèces peut signifier qu'une communauté de 100 espèces s'enrichit de 20 espèces tout en conservant les espèces d'origine, ou que les 100 espèces d'origine sont remplacées par 120 espèces nouvelles (deux situations écologiques fort différentes). Il est donc important d'évaluer le degré de remaniement des assemblages d'espèces pour comprendre à quel point la composition des communautés pourrait changer. L'indice de dissimilarité de Jaccard (encadré 5.2) nous permet de comparer la composition d'un assemblage d'espèces entre une période de référence et un horizon futur pour lequel nous avons obtenu des prévisions.

La figure 5.10 montre le fort remaniement de biodiversité qui serait provoqué par le changement du climat si chaque espèce suivait le déplacement de sa niche. L'indice se situe en effet au-delà de 0,5 pour la plupart des cellules situées au Québec, montrant de très grandes différences dans la composition en espèces des assemblages entre notre période de référence et la fin du ^{xxi}e siècle. Ce résultat est important, car il annonce que l'augmentation potentielle de biodiversité se ferait par de nombreuses extinctions locales compensées par d'encore plus nombreuses arrivées d'espèces, plutôt que seulement par certaines arrivées d'espèces.

3.2.

Des écosystèmes en déséquilibre : le revers de la médaille

Malgré les gains potentiels en richesse spécifique qui sont anticipés au Québec, de nombreuses espèces perdront localement les conditions climatiques qui leur sont favorables. Des extinctions locales sont donc probables, avec des délais d'extinction variables suivant les lieux et les espèces.

Figure 5.8. Effets potentiels sur 765 espèces modélisées des changements climatiques prévus entre 1961-1990 et 2071-2100

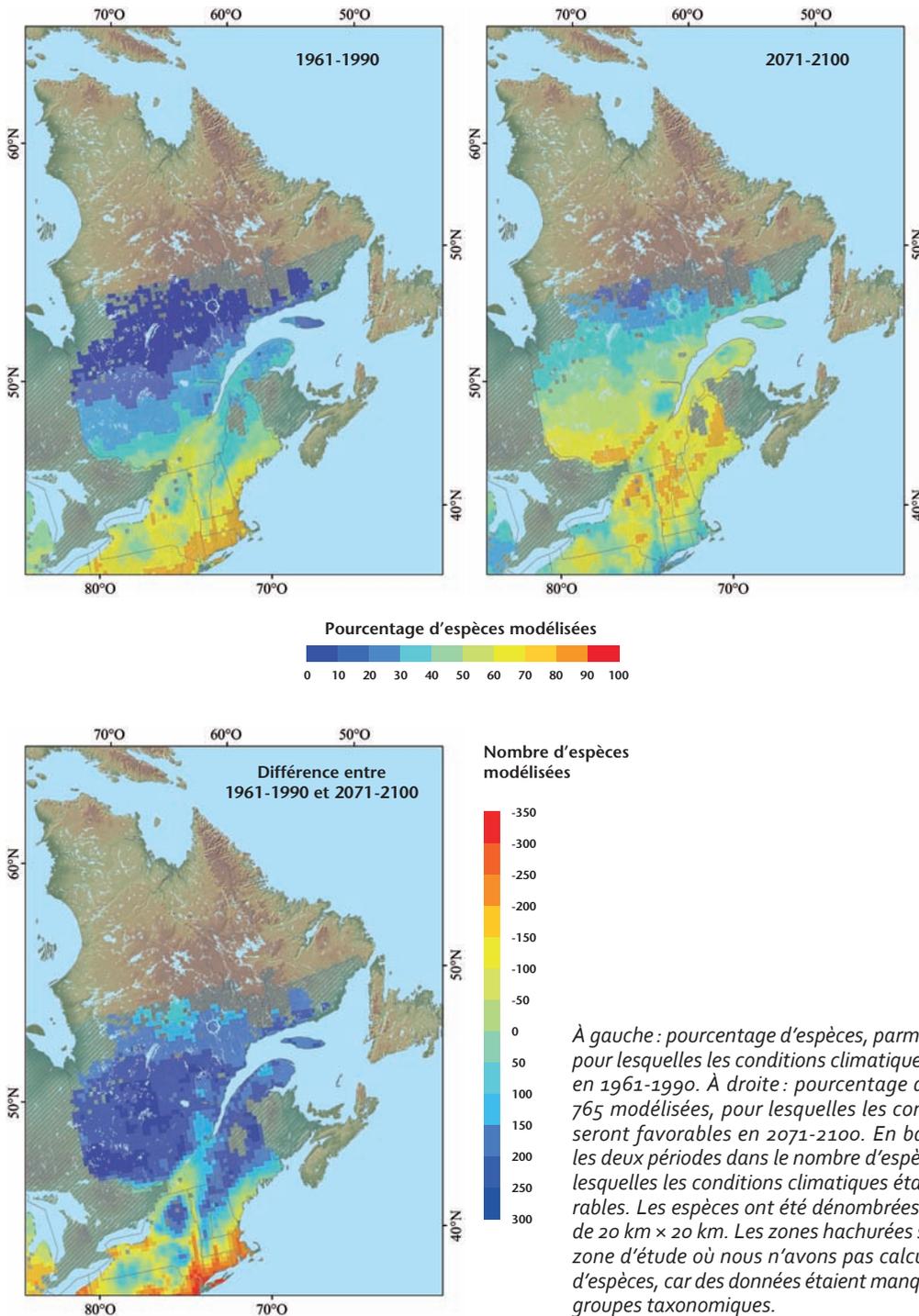
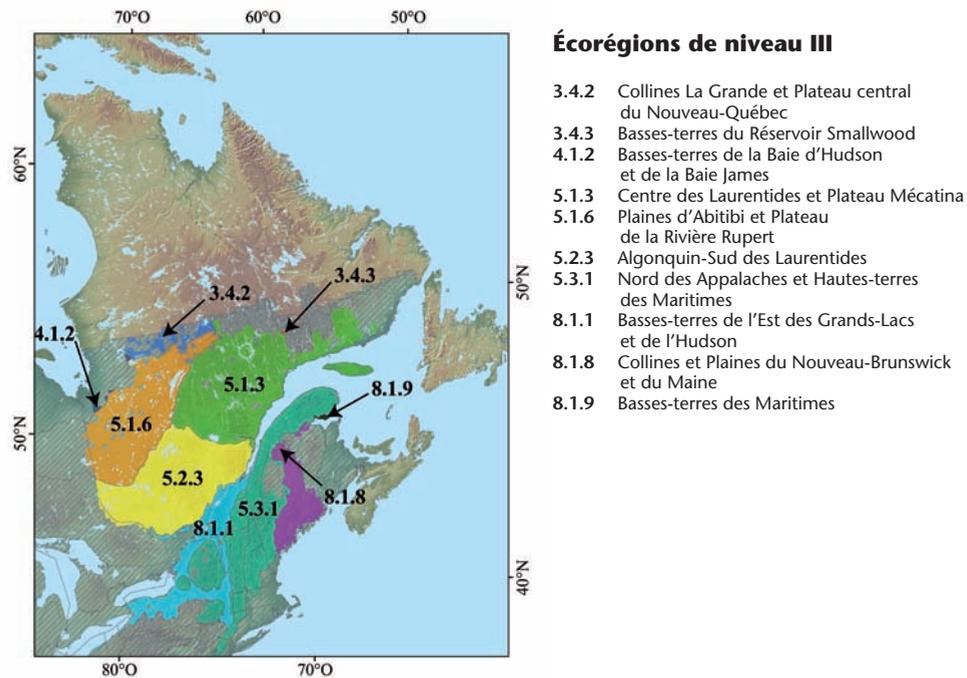


Figure 5.9. Écorégions de niveau III chevauchant la partie québécoise de notre zone d'étude et changements entre 1961-1990 et 2071-2100 du nombre d'espèces modélisées pour lesquelles les conditions climatiques sont favorables dans chaque écorégion



Écorégions	Amphibiens	Oiseaux	Arbres	Autres plantes	Total
3.4.2 (5%)	ND	ND	ND	94% (±25%)	350% (±125%)
3.4.3 (1%)	ND	ND	ND	85% (±15%)	356% (±42%)
4.1.2 (11%)	ND	ND	256% (±37%)	95% (±23%)	399% (±105%)
5.1.3 (65%)	104% (±63%)	490% (±529%)	187% (±63%)	123% (±40%)	236% (±93%)
5.1.6 (87%)	210% (±21%)	333% (±394%)	182% (±51%)	131% (±37%)	280% (±106%)
5.2.3 (100%)	118% (±63%)	96% (±219%)	99% (±56%)	159% (±52%)	116% (±53%)
5.3.1 (100%)	53% (±24%)	17% (±20%)	69% (±25%)	133% (±53%)	71% (±24%)
8.1.1 (99%)	38% (±13%)	-3% (±10%)	30% (±26%)	40% (±49%)	23% (±28%)
8.1.8 (100%)	77% (±13%)	31% (±8%)	73% (±21%)	175% (±20%)	97% (±10%)
8.1.9 (100%)	48% (±13%)	5% (±4%)	79% (±22%)	152% (±33%)	77% (±13%)

Les zones hachurées correspondent aux écorégions qui ne chevauchent pas le territoire du Québec ainsi qu'à celles où des données étaient manquantes pour certains groupes taxonomiques. Les taux d'augmentation moyens indiqués au tableau sont calculés sur l'ensemble des cellules de 20 km × 20 km de chaque écorégion. Les valeurs entre parenthèses sont les écarts-types associés aux pourcentages moyens, sauf celles de la première colonne qui indiquent le pourcentage de cellules de chaque écorégion qui sont situées dans la partie québécoise de la zone d'étude. ND indique que moins de 5 espèces avaient été modélisées pour 1961-1990.

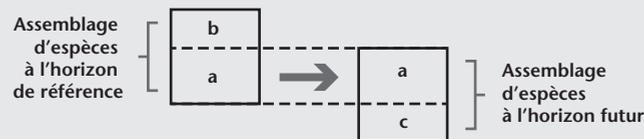
Encadré 5.2. L'INDICE DE DISSIMILARITÉ DE JACCARD

L'indice de dissimilarité de Jaccard permet de comparer la composition de deux assemblages d'espèces. Quand on l'utilise pour comparer la composition d'un assemblage entre une période de référence et un horizon futur (Anderson *et al.*, 2011), il se décrit comme suit (Albouy *et al.*, 2012) :

$$\text{Indice de Jaccard} = \frac{b + c}{a + b + c}$$

où a = nombre d'espèces présentes dans l'assemblage durant la période de référence et durant l'horizon futur ; b = nombre d'espèces présentes dans l'assemblage durant la période de référence, mais pas à l'horizon futur (espèces disparues de l'assemblage) ; c = nombre d'espèces présentes dans l'assemblage à l'horizon futur, mais pas durant la période de référence (espèces apparues dans l'assemblage).

Le schéma ci-dessous aide à visualiser ces concepts en montrant le changement subi par un assemblage d'espèces. On voit que $a + b$ correspond au nombre d'espèces présentes durant la période de référence, alors que $a + c$ est le nombre d'espèces présentes à l'horizon futur.



L'indice de Jaccard varie de 0 ($b = c = 0$; la composition en espèces ne varie pas) à 1 ($a = 0$; la composition en espèces change complètement). Ainsi, plus l'indice est élevé, plus le renouvellement d'espèces dans la communauté est important.

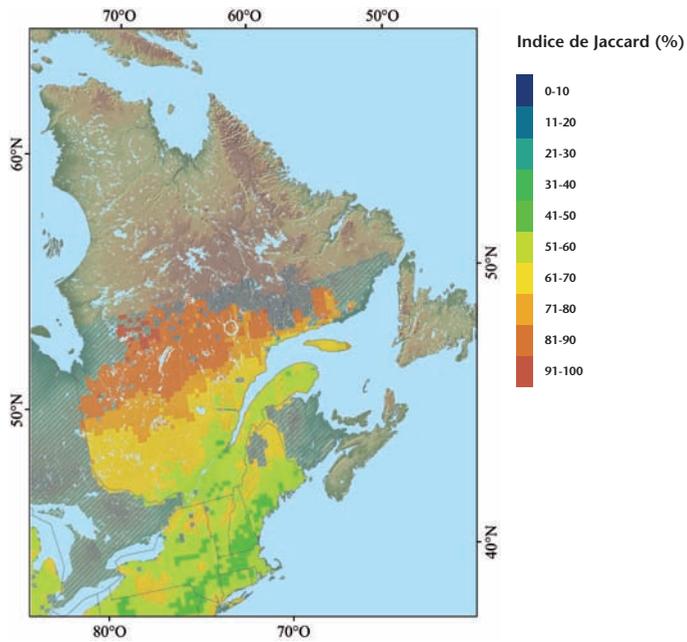
La figure 5.11 permet un examen des extinctions locales qu'entraînerait le changement climatique au Québec si toutes les espèces déplaçaient leur limite sud de répartition au rythme de déplacement de leur niche climatique. On constate que ces pertes sont importantes : dans toutes les cellules de la zone d'étude au Québec, la niche climatique de beaucoup d'espèces présentes en 1961-1990 disparaîtra avant la fin du siècle.

Le paradoxe de la biodiversité nordique possède donc un revers important : la disparition dans certaines régions d'espèces qui y sont actuellement

bien implantées, avec comme effet possible certains déséquilibres dans les écosystèmes. Utilisons le cas de l'érable à sucre pour illustrer cette idée de déséquilibre écosystémique¹. L'érable à sucre a une telle dominance et un tel effet structurant dans les écosystèmes du sud du Québec que trois domaines bioclimatiques (l'érablière à caryer cordiforme, l'érablière à tilleul, l'érablière à bouleau jaune) sont définis en fonction de sa présence (MRNE, 2013). Toute conséquence négative des changements climatiques sur l'espèce soulève donc des craintes justifiées.

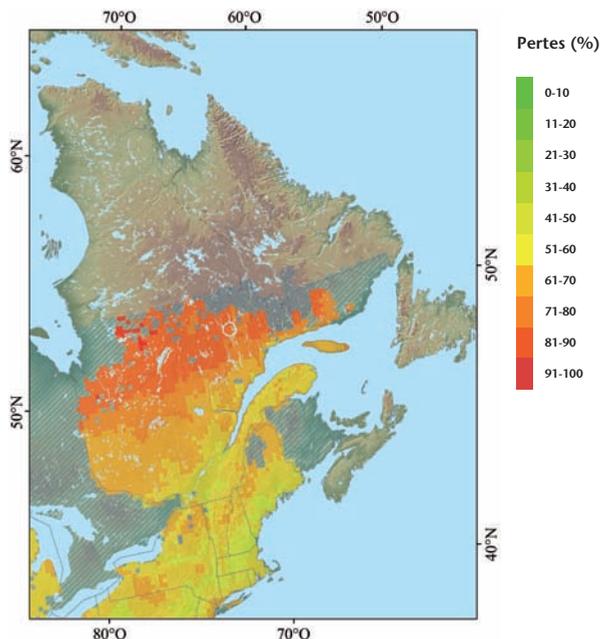
1. Tous les spécialistes de l'écologie savent que le concept d'équilibre écosystémique est truffé de pièges. D'une part, l'équilibre est un concept difficile à saisir, car il véhicule pour certains l'idée d'une parfaite stabilité (équilibre statique) et pour d'autres l'idée d'un balancement répété autour d'un état moyen (équilibre dynamique). D'autre part, un écosystème peut être perçu comme étant en équilibre à une certaine échelle spatiale et temporelle, mais en déséquilibre à d'autres échelles. Enfin, de forts préjugés entourent le concept d'équilibre écosystémique à cause de la connotation positive associée à « l'équilibre de la nature » dans le langage commun. Nous nous plaçons ici à l'échelle du XXI^e siècle et acceptons une définition peu précise ainsi que la connotation négative du concept de « déséquilibre des écosystèmes ».

Figure 5.10. Remaniement potentiel de la biodiversité entre 1961-1990 et 2071-2100 dans le sud du Québec et certaines régions voisines



Le remaniement potentiel est exprimé grâce à l'indice de Jaccard calculé par cellule de 20 km × 20 km pour 765 espèces modélisées. L'encadré 5.2 explique comment a été calculé l'indice. Les zones hachurées sont les parties de la zone d'étude où nous n'avons pas fait de calculs, car des données étaient manquantes pour certains groupes taxonomiques.

Figure 5.11. Pourcentage d'espèces pour lesquelles les conditions climatiques étaient favorables en 1961-1990, mais ne le seront plus en 2071-2100



Les pourcentages d'espèces, parmi les 765 modélisées, ont été calculés pour chaque cellule de 20 km × 20 km. Les zones hachurées sont les parties de la zone d'étude où nous n'avons pas calculé de pourcentages d'espèces, car des données étaient manquantes pour certains groupes taxonomiques.

En raison de l'impact économique de nombreuses espèces d'arbres, la modélisation a été plus détaillée pour ce groupe d'espèces. Nous avons en effet modélisé leurs changements potentiels d'abondance, plutôt que seulement leurs changements potentiels de présence, comme ce fut le cas pour les autres espèces (nous ne détaillons pas les méthodes, par manque d'espace). Comme le montre le tableau 5.6, il nous est ainsi possible d'évaluer si le maintien d'une espèce d'arbres dans une cellule se fera dans des conditions climatiques plus favorables (l'abondance ou la vigueur pourraient augmenter) ou moins favorables (l'abondance ou la vigueur pourraient diminuer).

À la fin du xx^e siècle, l'habitat favorable à la présence de l'éérable à sucre au Québec et en périphérie (écorégions 5.x.x et 8.x.x de la figure 5.9) couvrait environ 378 507 km². On anticipe qu'à la fin du xxi^e siècle, cette espèce pourrait être mésadaptée aux conditions climatiques sur 15 % de ce territoire, où son abondance pourrait ainsi diminuer. Les secteurs à risque sont ceux situés le plus au sud. Par exemple, le tableau 5.6 montre que 68 % de la superficie de l'habitat de l'éérable à sucre dans

l'écorégion 8.1.1 pourrait présenter des conditions climatiques défavorables à son maintien à la fin du siècle, avec des risques de dépérissement majeur sur 50 % de l'écorégion (ce qui comprend une bonne partie de la vallée du Saint-Laurent). À l'inverse, le réchauffement du climat ne devrait pas affecter directement le maintien de l'éérable à sucre dans les écorégions 5.x.x (tableau 5.6).

On voit donc l'importance d'analyser de façon régionale les résultats de la modélisation de niche. On voit aussi la difficulté de tirer une seule conclusion générale d'une question aussi vaste que celle des effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec.

3.3.

De multiples processus à l'œuvre

La modélisation de niche n'est qu'une dimension de la science prédictive permettant d'anticiper les effets des changements climatiques. En particulier, la compréhension des mécanismes écologiques qui façonnent la répartition des espèces est indispensable.

Tableau 5.6. Changements potentiels projetés pour l'éérable à sucre entre 1961-1990 et 2071-2100

Écorégion	Perte	Maintien dans un climat moins favorable	Maintien dans un climat également favorable	Maintien dans un climat plus favorable
5.1.3	0	0	6 %	94 %
5.1.6	0	0	0	100 %
5.2.3	0	0	73 %	26 %
5.3.1	3 %	3 %	89 %	5 %
8.1.1	50 %	18 %	32 %	0
8.1.8	1 %	8 %	91 %	0
8.1.9	0	0	100 %	0

Les changements potentiels sont exprimés par rapport à l'aire de répartition de l'espèce en 1961-1990. Les pourcentages reflètent la proportion de cellules appartenant, dans chaque écorégion, à chacune des quatre catégories de changement indiquées. Perte : risques de dépérissement majeurs à cause de conditions climatiques défavorables à la fin du xxi^e siècle. Maintien dans un climat moins favorable : risques de mésadaptation aux conditions climatiques de la fin du xxi^e siècle. Maintien dans un climat également (plus) favorable : l'abondance devrait rester similaire (augmenter) dans les conditions climatiques de la fin du xxi^e siècle. Les gains potentiels n'apparaissent pas au tableau puisque tous les changements potentiels sont exprimés par rapport à l'aire de répartition de l'espèce en 1961-1990.

De multiples processus écologiques y sont à l'œuvre, impliquant des phénomènes physiques et écologiques souvent complexes.

L'écologie est en effet une science de la complexité : des interactions multiples définissent le comportement des populations, des effets de seuil surgissent dans la trajectoire des écosystèmes, des propriétés nouvelles émergent au fur et à mesure que les ensembles écologiques se complexifient. Une évaluation plus complète des effets des changements climatiques sur la biodiversité devrait intégrer de multiples processus, souvent mal documentés ou mal compris. Les exemples du tableau 5.7 visent à bien exprimer une idée centrale de notre travail : certes la modélisation des niches de centaines d'espèces démontre avec force que les écosystèmes du Québec sont en transition, mais les changements de structure et de fonctionnement de ces écosystèmes ne se limitent pas à des changements de répartition

d'espèces. De nombreux autres processus physiques et écologiques, que nous n'avons pas étudiés, sont également à l'œuvre.

CONCLUSION

Nos analyses détaillées, malgré leurs limites, montrent une incontournable réalité biologique : les changements climatiques exerceront une pression à la hausse sur le nombre d'espèces présentes au Québec (le paradoxe de la biodiversité nordique), mais aussi une forte pression de remaniement des assemblages d'espèces, qui inclura de nombreuses extinctions régionales et de probables déséquilibres écosystémiques (le revers de la médaille). Les deux plus grandes inconnues qui subsistent sont l'importance du délai entre le déplacement des niches climatiques et le déplacement des espèces, et la façon

Tableau 5.7. Relation entre les changements climatiques contemporains et dix phénomènes structurant les écosystèmes du Québec

	Modifications récentes ayant été détectées	Modifications récentes ayant été attribuées aux changements climatiques	Modifications futures probables dues aux changements climatiques
Embossonnement de la toundra	Oui	Oui	Oui
Phénologie des espèces	Oui	Oui	Oui
Limite nordique des arbres	Oui	Oui	Oui
Fonte du pergélisol	Oui	Oui	Oui
Feux de forêt	Non	Non	Oui
Épidémies d'insectes	Oui	Oui	Oui
Niveaux d'eau dans les marais côtiers	Oui	Oui	Oui
Ponts de glace reliant les îles au continent	Oui	Oui	Oui
Dépérissements forestiers	Oui	Oui	Oui
Flours d'eau (cyanobactéries)	Oui	Non	Oui

L'évaluation a été réalisée subjectivement selon l'expérience des auteurs, la littérature scientifique et les communications des auteurs avec des spécialistes. Des divergences d'opinions existent entre spécialistes dans certains cas. Les parties ombrées indiquent que des mesures de gestion peuvent, de façon réaliste, atténuer l'ampleur des effets des changements climatiques.

dont le déplacement des niches climatiques interagira avec les nombreux autres processus physiques et écologiques que le changement du climat provoquera dans les écosystèmes.

Ces résultats constituent la première évaluation globale des effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec. Ils orientent ainsi de nombreuses réflexions à venir. En particulier, ils soulèvent de nombreuses questions au sujet de la conservation de la biodiversité au Québec. Le patrimoine naturel du Québec se transforme sous l'effet des changements climatiques. Comment réagir à ces transformations? C'est ce que nous allons aborder dans le chapitre suivant.

*Il est toujours aisé d'être logique.
Il est presque impossible
d'être logique jusqu'au bout.*

Albert Camus



C H A P I T R E

L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Dominique Berteaux, Nicolas Casajus et Sylvie de Blois

À RETENIR

- Ce que nous considérons comme statique à l'échelle du siècle (le climat et la répartition des espèces) devient dynamique. C'est la source d'un important changement de paradigme en conservation de la biodiversité.
- L'adaptation des stratégies de conservation de la biodiversité sera nécessaire pour diminuer les effets négatifs et tirer profit des effets positifs des changements climatiques au XXI^e siècle.
- Les arguments d'ordre éthique et scientifique sont souvent entremêlés dans les décisions de conservation. L'adaptation de nos systèmes de gestion reflétera donc à la fois des jugements de valeur et des raisonnements scientifiques.
- Trois thèmes récurrents de l'adaptation sont les aires protégées, la connectivité et la migration assistée. Les deux premiers reposent sur des stratégies de conservation bien connues alors que le troisième soulève des options et des risques nouveaux.
- La gestion des populations est un sujet intégrateur qui recoupe tous les secteurs de l'adaptation. Nous proposons des organigrammes de décision qui structurent la réflexion quant à la gestion des populations dans un climat en changement.
- Il est impossible d'anticiper tous les effets des changements climatiques, si bien que des événements écologiques inattendus se présenteront. S'y préparer est une stratégie d'adaptation en soi, qui inclut un important effort de suivi de la biodiversité.
- Les stratégies d'adaptation déjà mises en place dans le monde ont été recensées et nous commentons dans ce chapitre leur pertinence et leur mise en place au Québec.
- L'adaptation aux changements climatiques soulève beaucoup de questions sur nos rapports à l'environnement. Nous répondons succinctement à vingt d'entre elles qui nous ont été fréquemment posées.
- Les stratégies d'adaptation ne sont pas un substitut aux politiques d'atténuation. Le besoin d'adaptation est plutôt un constat de leur nécessité et une justification de leur accélération.

INTRODUCTION

L'ampleur des perturbations anthropiques du climat doit être atténuée en limitant les émissions de gaz à effet de serre. Mais nous reportons toujours à plus tard les actions à prendre, si bien qu'un changement climatique important est devenu inévitable durant le *xxi^e* siècle. Il est donc impératif de réfléchir aux mesures d'adaptation qui minimiseront les conséquences négatives de ces changements.

Nous l'avons vu, la biodiversité du Québec est constituée de milliers d'espèces regroupées au sein de nombreux écosystèmes. Ce tissu vivant a de nombreuses influences sur notre bien-être économique, physique et psychique. On le comprend facilement pour les espèces qui ont une valeur commerciale. Mais c'est vrai aussi quand un écosystème participe aux grands échanges planétaires, tels ceux de l'eau et du carbone, ou bien quand il stimule notre curiosité.

Nous sommes habitués à faire des choix individuels et sociétaux qui maximisent les bénéfices que nous tirons de la biodiversité. La gestion des populations animales et végétales, l'aménagement des peuplements et des écosystèmes, et l'intendance des espaces voués à la protection de la nature exigent ainsi de multiples décisions. L'adaptation aux changements climatiques est susceptible de toutes les affecter. Nous traitons ici des mesures d'adaptation qui touchent à la conservation de la biodiversité et à la gestion des écosystèmes, en excluant ce qui concerne les cultures et l'élevage.

Les questions nouvelles entraînent des réflexions nouvelles, qui se développent en forgeant peu à peu des termes acceptés de tous. Dans le domaine de la biodiversité, l'adaptation aux changements climatiques émerge du croisement entre la science des changements climatiques et celle de la conservation

de la biodiversité. Une partie de la terminologie issue de cette fertilisation croisée est résumée dans l'encadré 6.1.

Nous insisterons d'abord sur l'important changement de paradigme qu'impose l'altération rapide du climat, résumerons certaines notions d'éthique sous-jacentes à nos raisonnements sur l'adaptation aux changements climatiques dans le domaine de la biodiversité, puis approfondirons les principaux aspects de l'adaptation. Nous verrons ensuite quelles avancées ont déjà été faites au Québec, puis répondrons à une série de questions qui permettent d'aborder facilement les sujets suscitant le plus d'interrogations. La progression n'est pas linéaire dans ce chapitre. Nous aborderons plutôt chaque thème à plusieurs occasions, sous des angles variés.

1.

UN CHANGEMENT DE PARADIGME

Rappelons le contexte. Les niches climatiques des espèces devraient se déplacer au Québec de 500 à 800 km vers le nord en un peu plus d'un siècle (soit à des vitesses de 45 km à 70 km par décennie), le Québec devrait présenter en 2080 des conditions

Encadré 6.1. LE VOCABULAIRE DE L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Le vocabulaire présenté est utilisé en conservation de la biodiversité et gestion des écosystèmes. Les définitions peuvent comporter des nuances suivant leur contexte d'utilisation.

- **Adaptation aux changements climatiques** : processus par lequel un système écologique ou humain diminue les effets négatifs ou tire profit des effets positifs des changements climatiques.
 - **Adaptation planifiée** : adaptation qui résulte de politiques fondées sur la prévision des conséquences des changements climatiques.
 - **Adaptation réactive** : adaptation qui a lieu en réponse aux conséquences observées des changements climatiques.
 - **Évaluation des besoins en matière d'adaptation** : identification des options d'adaptation aux changements climatiques et évaluation de ces options en termes de faisabilité, bénéfiques, coûts et efficacité.
 - **Mesure d'adaptation** : ajustement des actions ou de l'environnement décisionnel afin d'augmenter la résilience ou diminuer la vulnérabilité face aux changements climatiques observés ou anticipés. Une mesure d'adaptation peut aussi être destinée à tirer profit des changements climatiques.
- **Capacité adaptative** : faculté des systèmes écologiques ou humains à diminuer les effets négatifs ou à tirer profit des effets positifs des changements climatiques.
- **Exposition** : degré auquel un système écologique ou humain est soumis à des variations climatiques.
- **Gestion adaptative** : processus d'amélioration continue des politiques et pratiques de gestion selon les leçons tirées des résultats des politiques et pratiques de gestion antérieures.
- **Impact** : changement provoqué dans un système écologique ou humain par son exposition aux changements climatiques. Un impact peut être négatif (inconvenient) ou positif (avantage).
- **Résilience** : capacité d'un système écologique ou humain à absorber les perturbations tout en conservant l'essentiel de ses structures et de son fonctionnement.
- **Sensibilité** : potentiel de changement d'un système écologique ou humain à la suite d'une exposition aux changements climatiques.
- **Vulnérabilité** : degré auquel un système écologique ou humain risque d'être affecté négativement par les changements climatiques. La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur et du rythme des changements climatiques subis par le système (exposition), ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation.
 - **Analyse de vulnérabilité** : processus d'identification, de mesure et d'évaluation de l'importance relative des vulnérabilités d'un système.

climatiques favorables à l'arrivée de nombreuses nouvelles espèces, alors que le climat deviendra simultanément défavorable à beaucoup de populations actuellement bien établies. On peut donc dire que «le futur n'est plus ce qu'il était».

Ce que nous considérons comme statique à l'échelle de quelques décennies (le climat et la répartition des espèces) devient dynamique. C'est la source de l'important changement de paradigme qui se prépare. Un paradigme est une représentation du monde, une façon de voir les choses, un mode de pensée. Nous décidons et agissons en cohérence avec les paradigmes que nous pensons les plus valides.

Dans ce contexte, l'adaptation consiste à modifier les pratiques de gestion des écosystèmes et de conservation de la biodiversité pour qu'elles continuent d'atteindre leurs objectifs, malgré le changement du climat. Afin d'éviter les simplifications abusives, précisons que les gestionnaires ont toujours su que le climat et la répartition des espèces étaient dynamiques (la colonisation postglaciaire est bien connue). Il était cependant possible d'ignorer ce dynamisme à l'échelle de temps des plans de gestion, rarement supérieure à quelques décennies. Ce n'est maintenant plus possible, car le climat s'est emballé.

Tout changement de paradigme engendre une cascade d'effets. On se pose d'abord des questions sur la validité de nos actions passées. On évalue ensuite quelles sont les meilleures actions pour l'avenir. On met finalement en œuvre de nouvelles façons de faire. Le raisonnement scientifique oriente tout ce processus, mais nos valeurs (ce que nous trouvons juste, bien, souhaitable) jouent un rôle tout aussi grand, parfois à notre insu.

2. UN DÉTOUR VERS L'ÉTHIQUE ET LES POSITIONS MORALES

Nous avons évoqué au premier chapitre les aspects moraux liés aux rapports entre les humains et la biodiversité. Les positions morales animent les

motivations profondes des personnes les plus engagées dans la conservation de la biodiversité, comme celles des personnes les plus réticentes à la protection de la nature. Elles forment un système de valeurs (une éthique) qui guide les choix considérés comme justes par chacun.

Deux difficultés liées à la conservation de la biodiversité sont donc, d'une part, que les arguments d'ordre éthique et scientifique sont souvent entremêlés dans les décisions de gestion des populations et des écosystèmes et, d'autre part, que les intervenants ne partagent pas forcément les mêmes systèmes de valeurs. Ajoutons que les connaissances scientifiques semblent toujours insuffisantes et que les systèmes de valeurs de chacun sont rarement exprimés et approfondis.

Nous discutons ici les aspects éthiques qui forment le contexte de l'adaptation aux changements climatiques dans le domaine de la biodiversité. Nous recommandons cependant des études plus détaillées, comme celles de Maris (2010) ou Blandin (2010), avec qui nous partageons une vision commune.

On trouve au sujet de la biodiversité une divergence de position entre ceux qui considèrent que le bien-être des humains prime avant tout (la position utilitariste ou anthropocentrique) et ceux qui pensent que les intérêts et le bien-être des autres organismes vivants devraient aussi être pris en compte (la position biocentrique, voire écocentrique si elle est élargie à des entités plus englobantes que les individus) (Blandin, 2010). On rencontre ainsi d'après Maris (2010, p. 167), cinq principes moraux sous-jacents à la protection de la biodiversité, qui invitent «à une attention morale particulière envers les êtres autonomes (principe d'autonomie), les animaux domestiques (principe de responsabilité), les êtres vivants (principe de bienveillance), les espèces (principe d'humilité) et enfin la communauté biotique dans son ensemble (principe de diversité)». L'articulation de ces principes, de leurs richesses ou de leurs limites, dépasse les objectifs du présent ouvrage. Leur énumération suffit toutefois à illustrer à quel point nos rapports à la nature peuvent varier suivant que tel ou tel principe moral a été (souvent inconsciemment) intégré ou non à notre système de valeurs.

Le modèle anthropocentrique favorise une vision dans laquelle la nature tolère les perturbations et peut être gérée selon nos besoins en faisant appel aux connaissances scientifiques et à la technologie. La nature peut être « réparée » si nécessaire quand des erreurs de gestion se manifestent ou quand des accidents surviennent. Le modèle écocentrique, quant à lui, favorise plutôt une vision dans laquelle la nature est fragile par rapport à la puissance mécanique et chimique des humains. Elle doit être protégée des effets destructeurs de notre expansion démographique et économique. En ce qui concerne les effets des changements climatiques sur la biodiversité, une gestion inspirée du premier modèle pourrait être plus interventionniste, en manipulant par exemple plus profondément les espèces et les habitats.

Certaines catégories professionnelles sont parfois plus à l'aise avec la conception anthropocentrique alors que d'autres, comme les biologistes, adoptent plutôt un modèle écocentrique. Ces deux conceptions forment toutefois les extrêmes d'un gradient le long duquel se trouvent des membres de toutes les catégories sociales ou professionnelles. Nous nous concentrons sur la dimension scientifique de l'adaptation dans le reste du chapitre. Cependant, n'oublions jamais qu'au-delà de leurs objectifs déclarés, les décisions de gestion reflètent des jugements de valeur, souvent non exprimés, autant que des raisonnements scientifiques. Il est d'ailleurs fréquent que le raisonnement scientifique serve d'alibi dans un argumentaire et qu'il soit superposé, après coup, au jugement de valeur qui a motivé la décision en premier lieu.

3. UN NOUVEAU CADRE DE RÉFLEXION

La littérature scientifique offre déjà de bonnes synthèses des stratégies d'adaptation disponibles pour lutter contre les effets indésirables des changements climatiques en matière de biodiversité. Pour la plupart, les recommandations visent à

améliorer des stratégies déjà existantes afin qu'elles demeurent pertinentes et efficaces. Comme l'illustre le tableau 6.1, trois thèmes récurrents (et reliés) sont les aires protégées, la connectivité et la migration assistée. Nous traiterons chacun de ces thèmes en détail. La gestion des populations est un sujet intégrateur que nous traiterons ensuite. Puis, nous insisterons sur les surprises écologiques qui nous attendent forcément, et terminerons en faisant un tour d'horizon de la pertinence pour le Québec des stratégies d'adaptation disponibles.

3.1. Les aires protégées

Les aires protégées comme mesure d'adaptation

L'implantation d'une aire protégée est un long processus qui soustrait des terres à certains usages et a donc une importante portée sociale, légale et parfois économique. Le statut légal conféré aux aires protégées leur donne une grande valeur de conservation de la biodiversité, puisque les habitats ne peuvent plus être modifiés au gré des divers intérêts qui émergent. Le cycle de vie des populations végétales et animales et le fonctionnement des écosystèmes sont ainsi mis à l'abri des perturbations anthropiques directes les plus sévères.

Les aires protégées jouent un rôle crucial dans l'adaptation aux changements climatiques. Tout d'abord, en diminuant les sources de stress sur certains écosystèmes, elles évitent l'effet cumulatif que les changements climatiques peuvent avoir lorsqu'ils s'ajoutent à d'autres perturbations. Par exemple, les populations ont plus de chances de répondre évolutivement à de nouvelles pressions de sélection climatique (comme le décalage des saisons) si elles ne sont pas simultanément soumises à de multiples pressions anthropiques. Ces populations adaptées aux nouveaux climats peuvent ensuite devenir, grâce aux individus disperseurs, de précieuses sources génétiques pour celles qui sont situées en dehors des aires protégées.

Tableau 6.1. Articles scientifiques traitant des stratégies d'adaptation aux changements climatiques dans le domaine de la biodiversité

Thème	Références
Synthèses sur l'adaptation	Brooke, 2008; Galatowitsch <i>et al.</i> , 2009; Gillson <i>et al.</i> , 2013; Groves <i>et al.</i> , 2012; Hagerman <i>et al.</i> , 2010; Hannah, 2010; Hannah <i>et al.</i> , 2002a, 2002b; Heller et Zavaleta, 2009; Hulme, 2005; Lawler, 2009; Lawler <i>et al.</i> , 2010; Lindenmayer <i>et al.</i> , 2010; Mawdsley <i>et al.</i> , 2009; Millar <i>et al.</i> , 2007; Morecroft <i>et al.</i> , 2012; Paterson <i>et al.</i> , 2008; Pressey <i>et al.</i> , 2007; Schwartz, 2012; Watson <i>et al.</i> , 2012; Williams, 2000.
Aires protégées	Araújo <i>et al.</i> , 2004, 2011; Hannah, 2008; Hannah <i>et al.</i> , 2007; Hulme, 2005; Lemieux et Scott, 2005; Lemieux <i>et al.</i> , 2011; Lee et Jetz, 2008; Lovejoy, 2006; Mazaris <i>et al.</i> , 2013; Meir <i>et al.</i> , 2004; Pyke et Fischer, 2005; Scott et Lemieux, 2005; Welch, 2005; Williams <i>et al.</i> , 2005.
Connectivité	Chambers <i>et al.</i> , 2005; de Dios <i>et al.</i> , 2007; Doerr <i>et al.</i> , 2011; Hannah, 2011; Hodgson <i>et al.</i> , 2009; Krosby <i>et al.</i> , 2010; Mazaris <i>et al.</i> , 2013; Noss, 2001; Nuñez <i>et al.</i> , 2013; Opdam et Wascher, 2004; Pearson et Dawson, 2005; Rose et Burton, 2009; Scott <i>et al.</i> , 2002; Wilby et Perry, 2006; Williams <i>et al.</i> , 2005.
Migration assistée	Aubin <i>et al.</i> , 2011; Fordham <i>et al.</i> , 2012; Gray et Hamann, 2011; Hayward, 2009; Hewitt <i>et al.</i> , 2011; Hunter, 2007; Kostyack <i>et al.</i> , 2011; Lawler et Olden, 2011; Loss <i>et al.</i> , 2011; McLachlan <i>et al.</i> , 2007; Minter et Collins, 2010; Moir <i>et al.</i> , 2012; Mueller et Hellmann, 2008; Pearson et Dawson, 2005; Pedlar <i>et al.</i> , 2011, 2012; Regan <i>et al.</i> , 2012; Ricciardi et Simberloff, 2009; Richardson <i>et al.</i> , 2009; Sandler, 2010; Seddon, 2010; Shirley et Lamberti, 2010; Svenning <i>et al.</i> , 2009; Thomas, 2011; Vitt <i>et al.</i> , 2009, 2010; Weeks <i>et al.</i> , 2011; Williams <i>et al.</i> , 2005.
Outils de prise de décision	Booth <i>et al.</i> , 2013; Dawson <i>et al.</i> , 2011; Oliver <i>et al.</i> , 2012; Prober <i>et al.</i> , 2012; Vos <i>et al.</i> , 2008.

Ces articles ont été publiés entre 2000 et 2013 et traitent de gestion des écosystèmes et de conservation de la biodiversité. La liste est partielle. Nous ne présentons pas ici le thème de la gestion des populations, car il est très vaste et les changements climatiques y sont abordés, à des degrés divers, dans de trop nombreux articles.

Les parcs et réserves jouent aussi un important rôle de témoin pour comprendre comment les systèmes naturels s'ajustent au changement du climat. Cette compréhension, qui est vitale en biologie de la conservation, est en effet beaucoup plus complexe quand de multiples facteurs de changement agissent simultanément, comme c'est le cas dans les milieux anthropisés. Par exemple, le changement de diversité des microorganismes d'un lac est difficile à attribuer au réchauffement climatique si le déboisement d'un bassin versant a également eu lieu. Cette valeur des aires protégées comme infrastructure de recherche sera de plus en plus reconvenue au fur et à mesure que nous modifierons notre habitat planétaire.

Les aires protégées peuvent également atténuer l'amplitude du changement climatique (Auzel *et al.*, 2012). Certaines constituent des réservoirs de carbone importants et maintiennent dans les écosystèmes des gaz à effet de serre qui seraient sinon libérés dans l'atmosphère. À l'échelle locale, elles jouent un rôle tampon sur le climat avoisinant, en gardant dans l'environnement des structures écologiques complexes qui ralentissent les échanges d'eau et de chaleur entre l'atmosphère et la surface terrestre (Auzel *et al.*, 2012).

L'établissement et le maintien d'aires protégées sont donc des mesures d'adaptation importantes pour la conservation de la biodiversité en période de changement climatique. Mais il faut aussi se

demander si la gestion des réseaux d'aires protégées devrait être revue pour que ce rôle protecteur continue de s'exercer. Devrait-on, par exemple, déplacer progressivement vers le nord les aires protégées afin qu'elles suivent les niches climatiques des espèces qui y vivent ?

L'adaptation de la gestion des aires protégées

Il existe déjà de longues listes de recommandations destinées à garantir que les aires protégées continuent de remplir leurs rôles malgré le changement du climat. Certaines recommandations reflètent des préoccupations anciennes en conservation, mais qui demeurent néanmoins justifiées malgré la rapidité et l'ampleur des changements climatiques. Exemples :

- » agrandir et augmenter le nombre des aires protégées ;
- » s'assurer que la matrice environnementale qui entoure les aires protégées permet la dispersion des organismes ;
- » favoriser dans les aires protégées la protection de processus écologiques, plutôt que de listes d'espèces.

D'autres recommandations sont plus spécifiques au contexte des changements climatiques. Les exemples suivants sont tirés de Heller et Zavatela (2009) et Auzel *et al.* (2012) :

- » ajuster les limites géographiques des aires protégées pour capter le déplacement anticipé des espèces ;
- » privilégier les réserves orientées nord-sud ;
- » protéger les régions à fort gradient altitudinal.

Ces recommandations peuvent ajouter des contraintes à un processus de désignation d'aires protégées déjà laborieux. Mais, elles peuvent aussi constituer des arguments importants en faveur de l'établissement d'aires protégées. Ainsi, le Conseil régional de l'environnement du Bas-Saint-Laurent utilisait en 2013 un avis scientifique sur le rôle des aires protégées dans le contexte des changements

climatiques (Gendreau, 2013) lors de consultations publiques sur une proposition de création d'aires protégées dans cette région.

Pour terminer, serait-il judicieux de faire glisser progressivement chaque aire protégée vers le nord, par exemple au rythme moyen de déplacement des niches climatiques ? David Welch, de l'Agence Parcs Canada, a examiné cette idée en profondeur pour aboutir à un avis fortement négatif (Welch, 2005), d'ailleurs largement partagé dans la communauté scientifique. Certes, l'ajustement de quelques limites de parcs peut être bénéfique, mais l'idée de déplacer systématiquement les limites des parcs doit être rejetée pour trois raisons. D'abord, cela ouvrirait la porte à toutes sortes d'abus motivés par d'autres motivations, comme l'exploitation de ressources. D'autre part, trop peu de zones naturelles sont encore disponibles pour que les surfaces auxquelles on retirerait le statut de protection soient remplacées par de nouvelles zones d'égale valeur écologique. Enfin, l'extension d'une aire protégée existante est un long processus sans garantie de succès, ce qui rendrait l'issue de la stratégie fortement incertaine.

3.2. La connectivité

La description du concept

La connectivité est un sujet récurrent en biologie de la conservation. C'est aussi un sujet capital dans le domaine de l'adaptation aux changements climatiques. Commençons par bien définir le concept et rappeler son contexte, avant d'expliquer son importance dans le cadre des changements climatiques attendus au Québec durant le XXI^e siècle.

L'habitat propice à la survie et à la reproduction d'une espèce n'est jamais constitué d'une seule parcelle à l'intérieur de laquelle les individus se déplacent librement. Il est plutôt fait de fragments de tailles variables qui sont entrecoupés d'habitats moins favorables, voire inhospitaliers. Plus l'habitat de l'espèce est découpé et constitué de nombreuses parcelles (plus il est fragmenté), plus les échanges d'individus entre populations sont rares

et plus les populations sont isolées les unes des autres. La connectivité représente ainsi le degré auquel le paysage facilite les échanges d'individus entre parcelles d'habitats favorables (D'Eon *et al.*, 2002; Haila, 1999).

Illustrons cette idée. Dans le sud-ouest du Québec, les quelques îlots forestiers qui servent de refuge aux plantes indigènes de sous-bois ou à certains amphibiens sont souvent isolés les uns des autres dans une matrice agricole. Les individus vivant dans ces îlots peuvent subir les effets négatifs des activités agricoles en bordure de leur habitat, par exemple lors de l'épandage de pesticides. Ils peuvent aussi être sujets à la prédation par des espèces de milieux ouverts lorsqu'ils tentent de traverser la matrice inhospitalière, par exemple durant la reproduction. Les petites populations isolées dans des habitats mal connectés sont ainsi plus à risque d'extinction.

Une difficulté entourant la notion de connectivité est que celle-ci n'est ni la propriété du paysage, ni celle de l'espèce considérée, mais bien la propriété de la relation entre une espèce et un paysage. D'autre part, la connectivité peut être analysée à de multiples échelles spatiales. Un même paysage peut donc avoir une connectivité très différente suivant l'espèce et l'échelle auxquelles on s'intéresse. Par exemple, pour des plantes herbacées, une large haie d'arbres en bordure d'un champ agricole peut connecter des îlots forestiers à l'échelle d'un paysage (Roy et de Blois, 2008). Cependant, à une échelle régionale et pour certains insectes, ce sont les îlots forestiers eux-mêmes qui peuvent servir de connexion entre de plus vastes forêts. Ceci complique évidemment la gestion des réseaux d'habitats. La connectivité n'en demeure pas moins un concept important pour la conservation de la biodiversité, car les activités humaines ont fortement fragmenté les paysages à cause de l'agriculture, des coupes forestières, des réseaux routiers et de l'urbanisation.

Le rôle de la connectivité pour l'adaptation

La connectivité est un attribut critique des paysages en ce qui concerne l'adaptation aux changements

climatiques. En plus de favoriser la présence de populations viables ayant plus de chances d'être résilientes face à des perturbations, c'est en effet la connectivité des paysages qui permet aux espèces d'ajuster leur répartition, par dispersion d'individus, au fur et à mesure que leur niche climatique se déplace. Quatre aspects doivent être gardés à l'esprit quand il est question de connectivité dans un contexte de changement climatique.

Premièrement, comme les habitats sont perçus différemment selon les espèces, tout projet d'adaptation aux changements climatiques reposant sur l'implantation ou la restauration de corridors écologiques (des parcelles linéaires d'habitat qui relient entre eux des fragments de cet habitat) doit identifier les espèces cibles visées par les corridors. À défaut, des procédures maximisant les bénéfices pour le plus grand nombre d'espèces doivent être établies. De nombreux modèles de conception des corridors (théorie des graphes, analyses de trajet du moindre coût, analyses de trajets multiples et de redondance, etc.) sont disponibles dans la littérature spécialisée (Auzel *et al.*, 2012).

Deuxièmement, la disposition des corridors devrait tenir compte des gradients de changements climatiques anticipés. Les niches climatiques auront tendance à se déplacer vers le nord quand on les analyse à l'échelle du Québec, mais plutôt vers les zones de plus hautes altitudes quand on les analyse localement dans des régions accidentées. Dans ce cadre, la modélisation climatique régionale et la modélisation de niche sont des outils performants pour décrire la situation d'une région ou d'une espèce particulières.

Troisièmement, les corridors écologiques peuvent aussi faciliter la propagation d'espèces non désirées profitant du réchauffement du climat, comme des espèces exotiques envahissantes ou des espèces vectrices de maladies. Il peut être très difficile d'empêcher ces conséquences indésirables de la connectivité. Ces effets doivent cependant faire partie de la réflexion au sujet des corridors écologiques.

Enfin, il est utile de rappeler que la stratégie d'adaptation aux changements climatiques ancrée

dans le concept de connectivité n'est que l'extension d'une stratégie de conservation de la biodiversité déjà bien connue. L'expérience acquise a évidemment une grande valeur. Citons les quelques exemples suivants, bien documentés et susceptibles de servir de modèles pour de nouveaux projets :

- » Corridor appalachien (<<http://www.corridorappalachien.ca>>, consulté le 10 septembre 2013). Organisme de conservation sans but lucratif dont la mission est de protéger les milieux naturels de la région des Appalaches afin, entre autres, de favoriser le maintien de corridors écologiques naturels sur les terres privées.
- » Deux Pays, Une Forêt (<<http://www.2c1forest.org>>, consulté le 10 septembre 2013). Collaboration canado-américaine rassemblant des organismes et des personnes œuvrant pour la protection, la conservation et la régénération du patrimoine naturel de l'écorégion des Appalaches nordiques et de l'Acadie, qui s'étend de New York à la Nouvelle-Écosse. Un objectif principal est d'éviter la fragmentation de cette écorégion.
- » Mouvement Vert Mauricie (<<http://www.mouvementvert.com>>, consulté le 10 septembre 2013). Organisme sans but lucratif cherchant à amoindrir les incidences associées aux changements climatiques, à maintenir la biodiversité, à réhabiliter des habitats importants et à développer une approche écosystémique pour une gestion écologique responsable. L'organisme a par exemple proposé des aires protégées et des corridors de biodiversité dans la région de la Mauricie.

L'établissement d'aires protégées et de corridors écologiques a donc de nombreux attraits et des bénéfices indéniables. Cela risque fort, cependant, de ne pas suffire à assurer l'adaptation de toutes les espèces aux changements climatiques rapides. Des alternatives devront dans certains cas être envisagées. La section qui suit décrit l'une d'entre elles.

3.3. La migration assistée

Le risque se trouve de toutes parts dans le débat sur la migration assistée : risque de ne pas intervenir, risque d'une intervention infructueuse, et risque que l'intervention ait trop de succès et crée une nouvelle espèce envahissante (Mueller et Hellmann, 2008).

La migration assistée désigne généralement le déplacement par les humains de populations animales ou végétales en dehors de l'aire de répartition de l'espèce. De nombreuses nuances existent cependant dans cette définition et la terminologie n'est pas encore standardisée. Aussi la migration assistée est-elle parfois également nommée translocation, relocalisation, colonisation assistée, transfert d'espèce, transfert de population ou extension artificielle d'aire de répartition. Le terme n'est pas exclusif au contexte des changements climatiques, mais s'y rapporte souvent.

Il s'agit de la mesure d'adaptation la plus débattue, car elle comporte des bénéfices, mais aussi des risques évidents. Son plus grand bénéfice est qu'elle peut sauver de l'extinction des espèces incapables de se déplacer assez vite pour suivre la migration de leur niche climatique. Son coût économique peut dans certains cas être vertigineux. Son plus grand risque est que l'introduction d'une espèce dans un nouveau milieu peut déclencher une cascade de conséquences écologiques imprévisibles.

Résumons la réflexion suscitée par cette stratégie d'adaptation en prenant le cas des arbres. C'est un bon exemple, car, nous l'avons vu, leurs niches climatiques se déplacent beaucoup plus rapidement que leurs limites de répartition ; ils sont donc plus susceptibles que beaucoup d'autres espèces de ne pas pouvoir s'adapter aux nouvelles conditions climatiques. Les arbres soutiennent d'autre part des activités économiques importantes et structurent la plupart des écosystèmes terrestres du Québec. Les coûts et bénéfices économiques et écologiques de la migration assistée des arbres peuvent donc tous être élevés. Soulignons aussi que les aspects

techniques liés à la reproduction des arbres et à l'établissement de nouvelles populations sont relativement maîtrisés, aussi la mise en place d'un programme intensif de migration assistée serait réaliste, du moins pour les espèces à valeur commerciale ou patrimoniale. Une série d'articles publiés en 2011 dans la revue *The Forestry Chronicle* de l'Institut forestier du Canada fait d'ailleurs bien le tour des aspects sémantique, éthique, scientifique, environnemental et opérationnel de la question (Aubin *et al.*, 2011 ; Beardmore et Winder, 2011 ; Pedlar *et al.*, 2011 ; Ste-Marie, 2011 ; Ste-Marie *et al.*, 2011 ; Winder *et al.*, 2011). Nous en repreneons ci-dessous les grandes lignes, et notons par ailleurs que la migration assistée des arbres soulève des questions pertinentes pour tous les autres groupes d'organismes.

Du point de vue éthique, la migration assistée pose la question de notre droit et de notre devoir à manipuler la répartition d'espèces sauvages et à prendre en charge des processus naturels (Aubin *et al.*, 2011). La forêt représente par excellence « la Nature » dans beaucoup d'esprits et les décisions que nous prenons à son égard nous renvoient aux valeurs profondes qui animent notre conception des rapports entre les humains et leur environnement. La virulence de certains débats sur la migration assistée est ainsi alimentée par des divergences de valeurs, même quand les discussions se cristallisent sur des aspects techniques. La migration assistée, et plus largement l'adaptation aux changements climatiques dans le domaine de la biodiversité, est un terreau fertile que devraient cultiver les éthiciens et philosophes.

D'un point de vue scientifique, la migration assistée des arbres soulève des questions tant sur les contraintes écologiques qui déterminent le succès de cette approche que sur ses conséquences écologiques (Winder *et al.*, 2011).

Les contraintes écologiques

- » Facteurs génétiques et physiologiques: la niche d'un arbre a de nombreuses dimensions autres que climatiques (niveaux de nutriments, conditions de lumière, pH, texture et drainage du

sol, etc.). Rien ne garantit que les gènes qui confèrent l'excellente adaptation d'un arbre aux conditions climatiques de l'écosystème donneur produiront une aussi bonne adaptation de cet arbre à des conditions climatiques identiques dans l'écosystème receveur.

- » Espèces associées: beaucoup d'espèces contribuent au cycle de vie d'un arbre (pensons aux champignons ectomycorhiziens). Le succès de la migration assistée dépend du maintien de ces associations ou de leur remplacement par des associations aussi bénéfiques. Or, ni l'un ni l'autre ne sont garantis lors d'un semis ou d'une transplantation.
- » Ravageurs et agents pathogènes: la migration assistée peut exposer la population transplantée à de nouveaux herbivores ou bactéries pathogènes qui empêchent son établissement ou son maintien à long terme.
- » Interactions et surprises: les contraintes mentionnées ci-dessus peuvent interagir de façon complexe et entraîner des effets imprévisibles (surprises) qui nuisent au succès de la migration assistée.

Les conséquences écologiques

- » Risque d'envahissement par l'espèce introduite: une espèce est considérée envahissante quand sa présence dans un écosystème devient si massive qu'elle entraîne des menaces pour l'environnement, l'économie ou la société. Les risques d'envahissement semblent augmenter avec la distance de transfert de l'espèce, car les prédateurs ou pathogènes qui lui sont propres ont plus de chances d'être absents de l'écosystème receveur si l'espèce s'implante loin de sa région d'origine. Les risques d'invasion paraissent limités dans le cas des arbres quand la migration assistée est intra-continente. La situation pourrait cependant être différente pour d'autres groupes d'espèces aux caractéristiques écologiques (comme le temps de génération) plus propices à l'envahissement.

- » Risque d'invasion des ravageurs et agents pathogènes de l'espèce introduite: l'introduction d'une nouvelle espèce d'arbre dans un écosystème peut entraîner l'arrivée d'une foule d'autres espèces. Celles-ci peuvent être apportées accidentellement en même temps que les arbres transplantés, ou leur établissement par dispersion naturelle peut simplement être facilité là où la nouvelle espèce d'arbre est introduite. Dans les deux cas, la migration assistée d'une espèce désirée peut entraîner l'envahissement de l'écosystème par une espèce non désirée, avec des conséquences néfastes pour de nombreuses autres espèces. Beaucoup d'exemples, comme celui de l'agrile du frêne, un coléoptère asiatique dont la présence a été confirmée en 2008 dans le sud du Québec (Ressources naturelles Canada, 2013), montrent que l'arrivée d'un nouveau ravageur peut être à la fois destructrice écologiquement, coûteuse économiquement, et presque impossible à enrayer.
- » Interactions et surprises: comme pour les contraintes au succès de la migration assistée, les conséquences écologiques ci-dessus peuvent interagir et avoir des effets imprévisibles.

Le point de vue opérationnel de la migration assistée doit aussi être abordé. Dans le cas où cette stratégie est désirable pour une espèce et socialement acceptée, trois questions se posent. Quelles populations choisir comme source? Comment réaliser le transfert d'individus entre l'écosystème donneur et l'écosystème receveur? Quel type de suivis réaliser après la migration assistée?

Chacune de ces questions a été étudiée en foresterie, si bien qu'existent pour beaucoup d'espèces commerciales des tests de provenance, des systèmes d'acquisition de semences, des lignes directrices concernant le transfert des semences, ainsi que des protocoles d'établissement et de traitement post-établissement des plantations (Pedlar *et al.*, 2011). En comparaison, un solide cadre opérationnel à la migration assistée est quasi inexistant pour les espèces à statut précaire, quel que soit le groupe taxonomique considéré.

La migration assistée n'est pas qu'une question théorique. Le gouvernement de la Colombie-Britannique permet maintenant de déplacer de 200 m en altitude les graines de la plupart des espèces d'arbres (O'Neill *et al.*, 2008). Il autorise aussi la plantation du mélèze de l'Ouest en dehors de son aire de répartition si les conditions climatiques sont favorables à sa croissance. Un système de migration assistée généralisable à toutes les essences commerciales était récemment envisagé dans cette province (Pedlar *et al.*, 2011). En Alberta, les directives en matière de transfert de semences ont été amendées pour étendre les zones de semis deux degrés plus au nord et 200 m plus haut en altitude. La collecte et l'entreposage de graines de pin flexible et de pin à écorce blanche ont été intensifiés pour permettre de futures introductions dans des zones où le climat deviendra favorable. Des réflexions ont cours quant à l'introduction d'espèces exotiques (pin ponderosa, sapin de Douglas) susceptibles de migrer naturellement en Alberta sous l'effet des changements climatiques, et qui pourraient remplacer le pin tordu latifolié menacé par les changements climatiques et le dendroctone du pin (Pedlar *et al.*, 2011). Au Québec, des sites nordiques sont replantés avec des mélanges de conifères issus de plants locaux et de plants provenant de vergers situés plus au sud, de façon à diversifier les stocks génétiques et à accroître la capacité d'adaptation au réchauffement climatique (Pedlar *et al.*, 2011).

La question de la migration assistée est donc une question actuelle et pratique, qui deviendra dans certains cas une question urgente et politique, susceptible de mobiliser des groupes de pression. On voit les germes de tels mouvements aux États-Unis avec les *Torreya Guardians* (<<http://www.torretyguardians.org>>, consulté le 10 septembre 2013), un groupe de naturalistes inquiets du danger d'extinction imminente de *Torreya taxifolia*, un membre de la famille de l'if dont seule une dizaine d'individus produit encore des cônes (UICN, 2011b). Les *Torreya Guardians* promeuvent activement la migration assistée de cette espèce au nord de sa zone actuelle de répartition, qui se trouve en Floride et en Géorgie.

Le Québec est dans une situation particulière vis-à-vis de la migration assistée. De nombreuses espèces y atteignent leur limite nordique de répartition ou sont susceptibles d'y trouver des conditions climatiques favorables dans le futur. La question *Devrait-on accepter d'introduire ici une population en danger ailleurs?* pourrait donc se poser plus fréquemment que la question *Devrait-on déplacer ailleurs telle population en danger ici?*. Au Québec, le débat sur les risques de la migration assistée est ainsi plus urgent que le débat sur ses bénéfices. Il restera cependant probablement réservé à quelques experts tant qu'un cas concret ne déclenchera pas le débat dans l'opinion publique.

3.4. La gestion des populations

Le déplacement des niches climatiques des espèces permet d'envisager trois contextes de gestion des populations animales et végétales. Dans le premier cas, la population est située dans un lieu où le climat devient défavorable à l'espèce (c'est la zone de perte identifiée aux sections 2.1 et 2.2 du chapitre précédent). Dans le second cas, elle se trouve en un lieu où le climat reste favorable à l'espèce (zone de maintien). Dans le troisième cas, on envisage la situation où l'espèce n'est pas présente en un lieu, mais où le climat lui devient progressivement favorable (zone de gain). Pour la plupart des espèces, la zone de perte se situe dans la partie sud de l'aire de répartition et dans les régions de plus basse altitude, alors que la zone de gain se trouve au nord de l'aire de répartition ou plus haut en altitude.

Oliver *et al.* (2012) ont ainsi construit trois arbres de décision qui s'appliquent à chacune des trois situations décrites ci-dessus. Nous présentons une version simplifiée de ces arbres à la figure 6.1. Un arbre de décision donne une vue d'ensemble du processus de décision, oriente la réflexion en la rendant systématique et standardisée, et aide à identifier les désaccords potentiels entre collaborateurs. Bien sûr, la réalité est un peu plus complexe que ne le laissent croire ces trois situations. Par exemple, le changement climatique peut, dans la zone de maintien de l'espèce, faire augmenter la densité de

certaines populations et diminuer celle de certaines autres. Un cadre simplifié en trois catégories est néanmoins très utile pour structurer la réflexion.

La figure 6.1 doit être abordée en deux étapes. En premier lieu, le contexte de gestion devrait permettre de déterminer quel arbre de décision a lieu d'être utilisé en premier: l'arbre 1 si la population visée se situe dans une zone de perte, l'arbre 2 si elle est dans une zone de maintien et l'arbre 3 si elle est dans zone de gain. Lorsque ce premier choix a été effectué, le cheminement de branche en branche oriente naturellement la réflexion. Les arbres ne sont pas indépendants et la réflexion entamée dans l'un d'eux nécessite parfois d'être poursuivie dans un autre. Par exemple, l'arbre 3 (zone de gain) oriente la réflexion vers l'arbre 1 (zone de perte) s'il devient clair que la zone de gain ne pourra en réalité jamais être occupée par l'espèce considérée.

On remarquera qu'un bon nombre de termes techniques sont introduits dans la figure 6.1 (restauration d'habitat, gestion *ex situ*, effets de bordure, gestion de zones tampons, etc.). Nous ne définissons pas ces termes; notre objectif est plutôt de démontrer par quel type de raisonnements la gestion des populations peut être adaptée face aux changements climatiques. Notons toutefois que les arbres envisagent parfois d'accepter la perte d'une population et qu'ils accordent tous une grande importance aux suivis écologiques, à la recherche et à la gestion adaptative. Finalement, n'oublions pas que chaque contexte de gestion est unique et qu'un arbre de décision doit souvent être modifié pour satisfaire pleinement les besoins de ses utilisateurs.

3.5. Se préparer aux surprises

La science est incapable de dresser un portrait complet des effets futurs des changements climatiques sur la biodiversité du Québec. Nous connaissons encore trop mal la biodiversité, des incertitudes subsistent quant à la nature et à l'intensité des changements climatiques à venir, et notre capacité à analyser toutes les interactions écologiques est trop réduite. En outre, l'évolution des écosystèmes

Figure 6.1. Arbres de décision pour la gestion des populations face aux changements climatiques

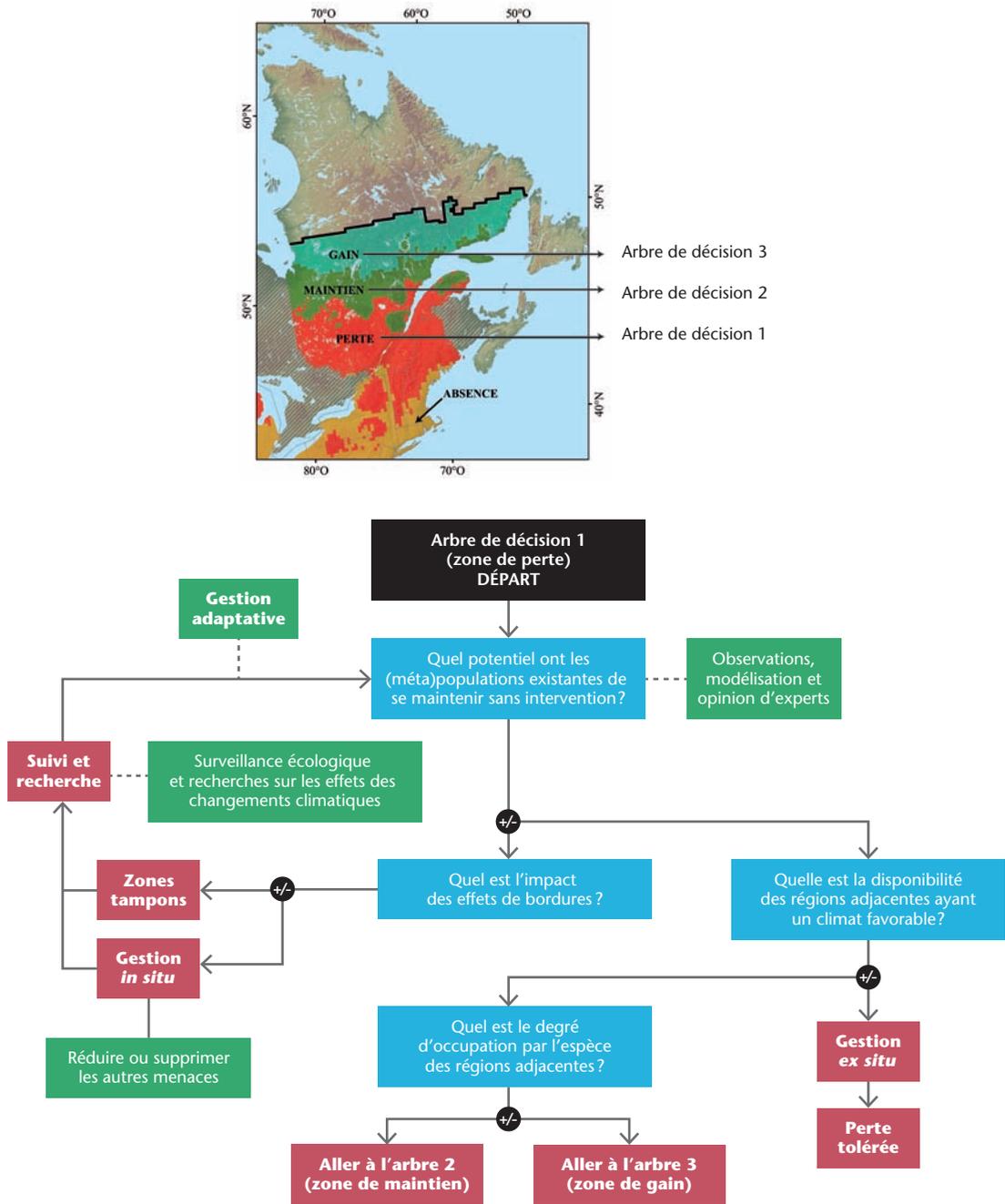


Figure 6.1. (suite)

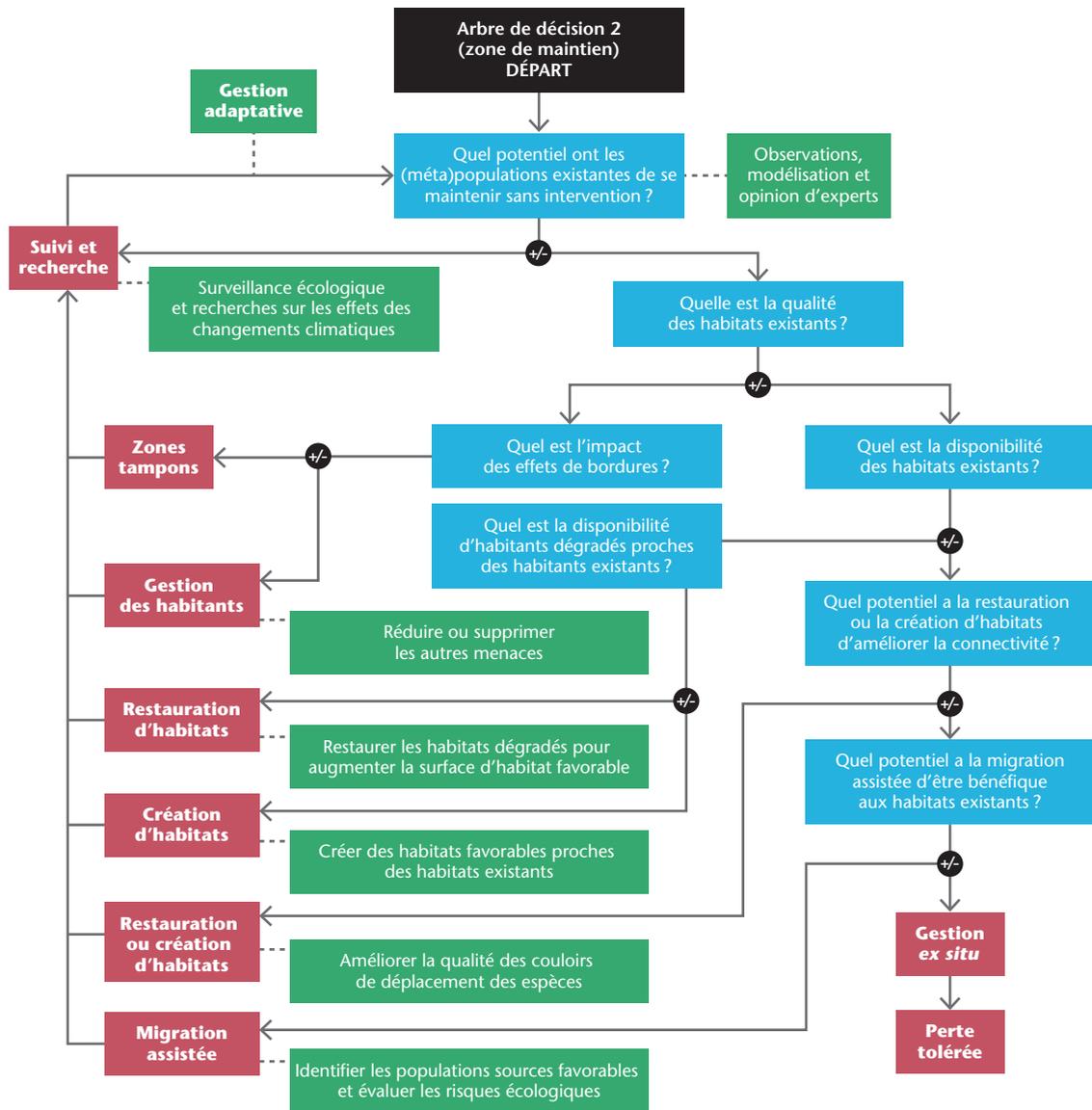
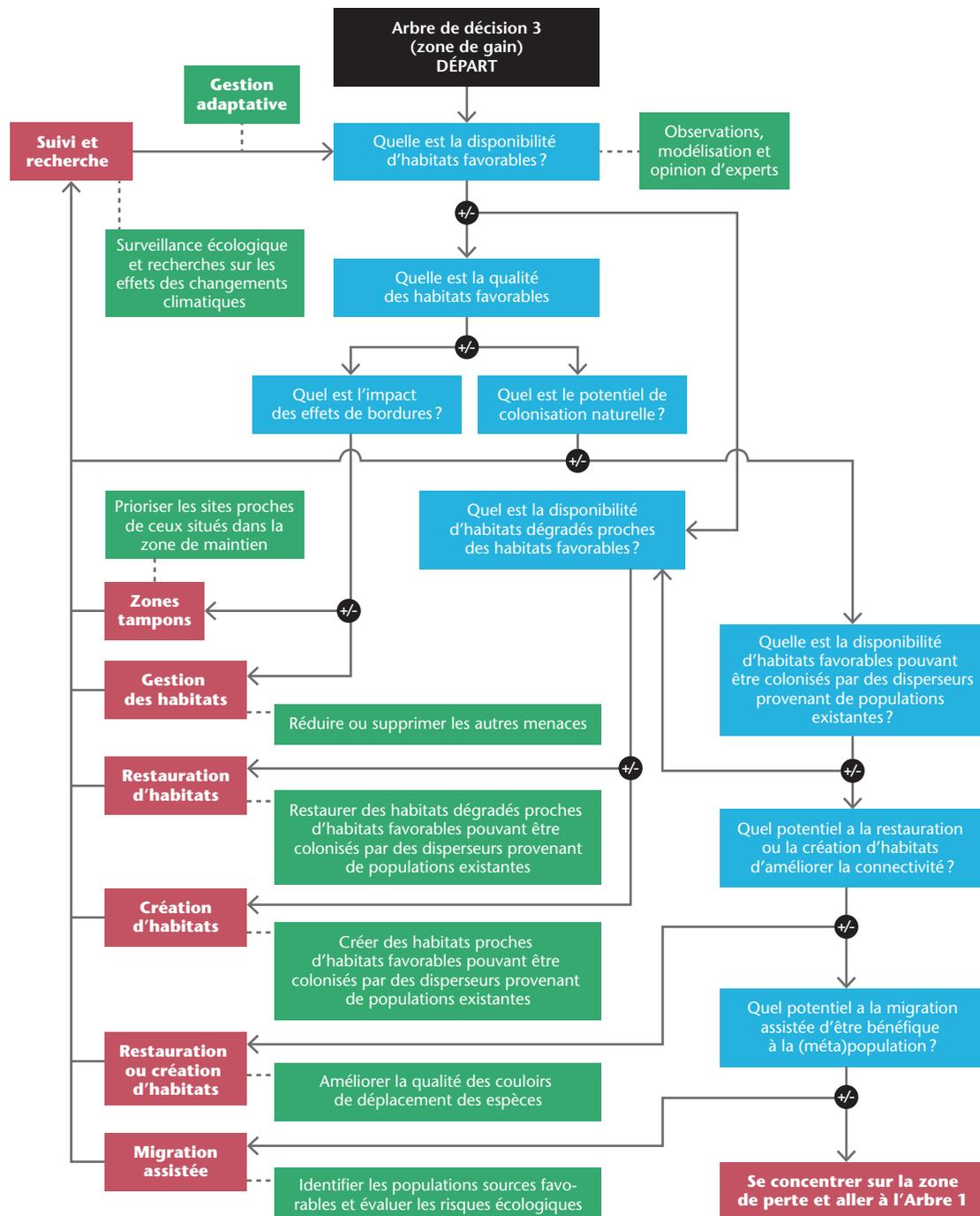


Figure 6.1. Arbres de décision pour la gestion des populations face aux changements climatiques (*suite*)

Cases bleues : questions permettant d'orienter le cheminement dans l'arbre de décision. Cases rouges : stratégies d'adaptation proposées. Cases vertes : informations complémentaires. Les + et - des ronds noirs signifient « élevé(e) » et « faible », respectivement.

Source : Adaptée de Oliver et al. (2012).

traverse parfois des carrefours où des événements en apparence anodins provoquent des bifurcations majeures presque impossibles à prévoir. Ainsi, bien que notre idée générale des changements à venir soit suffisante pour proposer quelques grandes stratégies d'adaptation (voir ci-dessus), il faut s'attendre à des surprises qui exigeront des réactions rapides. L'envahissement soudain de larges territoires par une espèce nouvelle, la prolifération inattendue d'un parasite auparavant peu abondant, l'effondrement d'une espèce jouant un rôle clef dans un écosystème, l'apparition à une saison inattendue de phénomènes communs en d'autres saisons, représentent quelques exemples de surprises écologiques pouvant survenir.

Il peut sembler paradoxal de se préparer à réagir à des événements que l'on ne peut prévoir. Cela fait, pourtant, bien partie de l'adaptation. Une bonne capacité d'adaptation aux surprises écologiques exige en effet trois conditions : l'aptitude à détecter des changements écologiques inattendus, une capacité scientifique adéquate pour comprendre les causes et conséquences de ces changements, et un système de gestion assez flexible pour être ajusté rapidement aux changements écologiques.

L'aptitude à détecter des événements écologiques inattendus dépend d'un bon système d'alerte, c'est-à-dire d'un programme de suivi de nos systèmes écologiques, sur le terrain ou à distance grâce à des appareils spécialisés. Peu importe que les personnes effectuant la surveillance soient des professionnels ou des amateurs éclairés ; elles doivent avoir les connaissances, la motivation et les outils nécessaires pour mesurer des variables qui caractérisent les écosystèmes (répartition et abondance d'espèces, paramètres physicochimiques, etc.). Elles doivent aussi pouvoir communiquer entre elles rapidement, car les surprises écologiques rapportées d'abord par une personne doivent pouvoir être promptement confirmées et décrites. Pour finir, l'aptitude à détecter des événements écologiques inattendus et à juger de leur importance repose sur l'existence de données de référence permettant d'évaluer l'ampleur du changement survenu. Sans référence solide, il est facile d'être dupé par le syndrome de la référence glissante (*shifting baseline*),

par lequel nous nous habituons progressivement à la détérioration d'un paramètre et oublions d'y réagir.

La capacité scientifique de comprendre les causes et conséquences des changements écologiques (et leur attribution potentielle au changement climatique) réside surtout dans les universités et gouvernements. Le financement de la recherche environnementale est prioritaire en cette aube de l'Anthropocène, où la compréhension des rapports entre humains et biosphère devient primordiale pour la persistance de nos sociétés. Rappelons que le réchauffement climatique n'est qu'une des sources de changements écologiques globaux. L'agriculture, la déforestation, les espèces envahissantes, le développement résidentiel, etc., sont autant de pressions qui se conjuguent pour altérer la biodiversité.

La souplesse des systèmes de gestion dépend, quant à elle, de la flexibilité des institutions en cause, de celle des outils de gestion utilisés et aussi de celle des individus qui prennent les décisions. Cette flexibilité exige une veille stratégique pour déceler rapidement l'apparition d'un nouveau contexte de gestion. Les échanges répétés entre chercheurs et gestionnaires, lors de projets de recherche communs, de colloques et de réunions de travail, favorisent à la fois la pénétration des nouvelles connaissances au sein des organismes de gestion et l'orientation des recherches vers la production de savoirs ayant une utilité pratique à court terme.

3.6.

Sur la scène québécoise

Le Québec a entamé (timidement, comme partout ailleurs) l'adaptation de ses stratégies de conservation et de gestion à la réalité pressante des changements climatiques. Nous présentons au tableau 6.2 les stratégies d'adaptation recensées par Mawdsley *et al.* (2009) au Canada, au Mexique, en Afrique du Sud et aux États-Unis, et commentons la pertinence ou le degré de mise en œuvre de ces stratégies au Québec. Les stratégies listées ont presque toutes été abordées depuis le début du chapitre, bien que quelques idées nouvelles apparaissent. Cette section sous forme de tableau résume ainsi l'état des lieux

Tableau 6.2. Adaptations aux changements climatiques pour conserver la biodiversité

Stratégies d'adaptation	Commentaires concernant la pertinence ou la mise œuvre au Québec
Gestion et protection des terres et des eaux	
1. Augmenter la superficie d'aires protégées.	Stratégie en cours, surtout dans le nord du Québec où le développement s'intensifie (Berteaux, 2013). L'établissement de nouvelles aires au sud de 50°N est difficile, car les terres sont en forte demande. Ce sont pourtant les régions où la biodiversité est la plus élevée et où les espèces à statut précaire sont les plus nombreuses. Le Québec a adopté une cible de 12 % d'aires protégées pour 2015 (la superficie était de 8,12 % en 2009), ce qui pourrait être insuffisant pour protéger certains groupes taxonomiques.
2. Augmenter le niveau de représentativité et de réplication dans les réseaux d'aires protégées pour assurer la conservation de chaque type d'écosystème.	Similaire au n° 1, mais les connaissances manquent pour prévoir comment le changement climatique va réorganiser les écosystèmes et affecter les niveaux de représentativité des réseaux d'aires protégées. De plus, des communautés naturelles qui n'existent pas aujourd'hui pourraient surgir dans le futur.
3. Améliorer la gestion des aires protégées pour atténuer certains effets des changements climatiques (p. ex. endiguer des sites côtiers particulièrement importants pour les protéger de l'augmentation du niveau marin).	Stratégie pertinente, mais une analyse est d'abord nécessaire pour identifier les aires protégées québécoises les plus vulnérables aux changements climatiques et déterminer quels outils de gestion seraient les plus efficaces. De plus, cette méthode est très coûteuse et parfois seulement efficace à court terme, de sorte qu'elle ne pourra être appliquée à grande échelle.
4. Protéger les couloirs de déplacement des espèces et les zones servant d'étapes de dispersion afin de favoriser la redistribution spatiale des espèces face aux changements climatiques.	La modélisation de niche suggère que la redistribution spatiale des espèces au Québec se fera surtout du sud-ouest vers le nord-est. La configuration des aires protégées et des corridors doit augmenter la connectivité le long de cet axe. Cela soulève des enjeux importants dans les milieux agricoles du sud du Québec. Des régions à fort relief et haute spécificité biologique, comme les Chic-Chocs, méritent également une attention particulière.
5. Gérer et restaurer les fonctions écosystémiques plutôt que se concentrer sur des éléments de structure particuliers, comme les espèces.	La gestion écosystémique se met en place progressivement au Québec, par exemple en milieux forestier, marin et lacustre. La complexité de l'approche demande cependant de longs délais de mise en place et un grand partage d'informations entre les instances locales, provinciales et fédérales. Un important investissement de toutes les parties prenantes à la gestion des ressources naturelles est indispensable.
6. Augmenter la perméabilité paysagère pour les espèces.	Ceci est particulièrement important dans le sud du Québec, où les paysages sont très fragmentés par l'agriculture et l'urbanisation. Cette stratégie doit cependant aussi être évaluée en fonction des inconvénients qu'elle présente face à la colonisation d'espèces indésirables venant du sud.

Tableau 6.2. (suite)

Stratégies d'adaptation	Commentaires concernant la pertinence ou la mise œuvre au Québec
Gestion directe des espèces	
7. Concentrer les ressources de conservation sur les espèces à statut précaire.	Cette stratégie fut mise en place en 1989 au Québec grâce à la Loi sur les espèces menacées ou vulnérables et en 2002 au Canada grâce à la Loi sur les espèces en péril. Les ressources financières et le soutien politique sont cependant souvent insuffisants pour permettre des actions efficaces. Le manque de coordination entre organismes responsables de la conservation nuit aussi à l'efficacité de la stratégie. À noter que l'immigration naturelle au Québec de nouvelles espèces venues du sud, au statut d'abord précaire, pourrait dans le futur compliquer cette stratégie.
8. Déplacer les espèces qui risquent l'extinction dans des sites devenus climatiquement défavorables, vers d'autres sites plus favorables.	Le débat est entamé au Québec sur cette question de la migration assistée, qui a de farouches adversaires et d'ardents défenseurs. L'acceptabilité et l'efficacité de cette stratégie varieront en fait selon les cas. Les décisions devront s'appuyer sur de difficiles analyses de coûts-bénéfices soupesant les risques écologiques de l'action et de l'inaction.
9. Établir des populations captives d'espèces qui sinon s'éteindraient (conservation <i>ex situ</i>).	Stratégie intéressante en cas d'extrême nécessité, mais trop coûteuse pour être viable à long terme, sauf peut-être pour certaines espèces de plantes si cela fait partie de la stratégie n° 8. Nous ne connaissons pas au Québec d'exemple directement lié aux changements climatiques.
10. Réduire les pressions autres que le changement climatique.	C'est déjà l'objectif de toutes les stratégies de conservation qui existent au Québec. Malgré cela, les pertes et fragmentations d'habitats demeurent les principales causes d'extinction de populations. La plupart des espèces à statut précaire habitent en effet le sud du Québec (elles y sont souvent en périphérie nordique de leur répartition), où les terres sont intensément utilisées et où la proportion d'aires protégées est faible.
Surveillance et planification	
11. Évaluer et améliorer les programmes de suivi de biodiversité (espèces et écosystèmes).	Les façons d'améliorer les suivis de biodiversité dans le contexte des changements climatiques sont actuellement analysées par le gouvernement du Québec, en collaboration avec des chercheurs universitaires. Les coûts des suivis de biodiversité peuvent cependant vite devenir exorbitants à cause de la vaste superficie du Québec. Un soutien accru aux naturalistes amateurs et une meilleure coordination de leurs efforts doivent être considérés.
12. Intégrer les effets des changements climatiques dans les plans de gestion des espèces et des espaces.	Cette stratégie devrait être facilitée par l'existence d'organismes de liaison comme le consortium Ouranos, qui fait le pont entre la recherche, la planification et la prise de décisions. Les <i>Plans d'action sur les changements climatiques</i> successifs du gouvernement du Québec devraient également faciliter la mise en œuvre de cette stratégie.

Tableau 6.2. Adaptations aux changements climatiques pour conserver la biodiversité (*suite*)

Stratégies d'adaptation	Commentaires concernant la pertinence ou la mise œuvre au Québec
Surveillance et planification	
13. Développer, à l'échelle des paysages, des plans de gestion dynamiques qui intègrent de façon explicite les besoins des espèces et des écosystèmes en matière d'adaptation aux changements climatiques.	Similaire au n° 12. Cependant, les faibles bénéfices économiques immédiats (parfois réels, parfois apparents) des mesures de conservation de la biodiversité sont un énorme obstacle à l'application de cette stratégie. Il faut d'urgence rendre apparents tous les bénéfices économiques générés par la biodiversité.
14. Veiller à ce que la conservation de la biodiversité devienne une partie intégrante de l'adaptation de la société (celle-ci vise surtout la santé humaine, les infrastructures et les ressources importantes pour l'économie).	Similaire au n° 12 et au n° 13. Ajoutons que l'aménagement du territoire devrait se faire à la lumière des changements climatiques et faciliter l'adaptation des écosystèmes et de la société à l'échelle régionale. Une coordination beaucoup plus grande est nécessaire entre les secteurs de la conservation et ceux dédiés à l'urbanisme, à l'agriculture et aux transports.
Lois et politiques	
15. Revoir et modifier les lois, réglementations et politiques qui touchent la biodiversité et la gestion des ressources naturelles. Celles-ci ont en effet été mises en place pour la conservation d'une biodiversité « statique ».	Cette stratégie peut commencer à être développée dès maintenant au Québec, mais des connaissances supplémentaires sur les effets des changements climatiques sur la biodiversité et une collaboration plus intense entre parties prenantes sont nécessaires pour développer la stratégie.

Sources : La colonne de gauche est adaptée de Mawdsley *et al.* (2009) et celle de droite, de Berteaux *et al.* (2010).

de la scène québécoise en ce qui concerne l'adaptation aux changements climatiques dans le domaine de la biodiversité.

4. VINGT QUESTIONS ET VINGT RÉPONSES

Nous terminons ce chapitre en répondant à une série de questions qui nous ont souvent été posées par d'autres scientifiques, par des gestionnaires des milieux naturels, par des naturalistes ou par d'autres personnes intéressées par nos recherches. Cette section est très utile pour aborder en rafale, sous l'angle du Québec, les sujets qui dominent l'interface entre

les changements climatiques et la conservation de la biodiversité. Nous avons opté pour la concision des réponses, sacrifiant les nuances. Nous désirions indiquer une direction de pensée et provoquer la réflexion, plutôt que faire le tour du sujet.

Puisque le Québec a un climat froid limitant pour beaucoup d'espèces, peut-on dire que le réchauffement climatique est bon pour la biodiversité du Québec ?

Les multiples sens du mot *bon* rendent illusoire une réponse unique. Explorons cinq pistes :

- » le réchauffement climatique fera augmenter le nombre total d'espèces présentes au Québec. La diversité spécifique (celle des insectes par exemple) en bénéficiera quantitativement : c'est « bon » pour la biodiversité du Québec ;

- » à cause de la rapidité des changements, des écosystèmes fonctionneront moins bien dans le futur, car leurs assemblages d'espèces seront mal adaptés au climat local: c'est « mauvais » pour la biodiversité du Québec;
- » des populations animales et végétales disparaîtront de certaines régions du Québec, car elles deviendront mésadaptées au climat local: c'est « mauvais » pour la biodiversité du Québec;
- » la croissance de certains végétaux et la reproduction de certains animaux sera augmentée à cause des températures plus élevées, ce qui rendra certaines populations plus vigoureuses: c'est « bon » pour la biodiversité du Québec;
- » des espèces non désirées par les humains, comme certains ravageurs des cultures, vont devenir plus abondantes au Québec: c'est « mauvais » pour les services que nous rend la biodiversité du Québec.

Aucune équation magique ne permet de faire la synthèse de ces « bons » et « mauvais » aspects. Le changement du climat aura des conséquences multiples sur la biodiversité du Québec et les services qu'elle nous rend. Le bilan sera favorable ou défavorable selon les régions ou les critères utilisés. Ce bilan mitigé, typique des régions nordiques, est paradoxal si l'on considère qu'à l'échelle planétaire, le réchauffement climatique provoquera des disparitions d'espèces et aura sans nul doute des conséquences largement négatives sur la biodiversité.

À cause de sa position géographique, le Québec deviendra-t-il pour de nombreuses espèces un refuge climatique à l'échelle nord-américaine ?

Nos modèles suggèrent en effet que certaines espèces pourraient être extirpées des régions plus au sud et trouver refuge au Québec. Nous avons la responsabilité de faciliter leur établissement dans des zones climatiques et habitats favorables. Un aspect potentiellement conflictuel de ce scénario, cependant, demeure celui de l'impact de ces espèces sur la faune et la flore locales.

Pourquoi se préoccuper de conserver la biodiversité puisque la vie sur Terre a survécu dans le passé à tous les changements environnementaux, même les plus catastrophiques ?

Les activités humaines ne menacent pas l'existence de la vie sur Terre, mais plutôt la diversité des formes de vie. Des milliers (parfois des millions) d'années sont nécessaires pour former naturellement de nouvelles espèces. Les disparitions actuelles, assez nombreuses pour que certains scientifiques croient que nous provoquons maintenant la sixième grande extinction que la Terre ait connue, ne pourront pas être compensées de sitôt par la création de nouvelles espèces. Cela pose des problèmes pratiques, car il nous est utile de vivre dans un environnement abritant de nombreuses autres espèces, mais aussi des problèmes éthiques, entre autres parce que ces disparitions enlèvent des possibilités de découverte et de développement aux générations d'humains qui nous suivront.

Maintenant que les humains changent le climat, existe-t-il encore des écosystèmes naturels ?

Admettons que ce qui est naturel est tout ce qui n'a pas été transformé par les humains. Alors, il n'existe plus aucun écosystème naturel sur la planète, car ils sont tous, à des degrés divers, affectés par le changement du climat. Mais si l'on considère plutôt que ce qui est naturel est tout ce qui existe en dehors de la volonté humaine, alors certains écosystèmes (de plus en plus rares) demeurent naturels, car personne n'a encore cherché à les transformer.

Faut-il investir dans la protection de populations « perdues d'avance », dont la niche climatique va disparaître du Québec ?

Comme les ressources sont toujours limitées, on peut en effet parfois être tenté par la stratégie du triage, qui préconise de ne pas investir dans les cas sans espoir. Trois raisons incitent néanmoins à la prudence. D'abord, la certitude d'une extinction prochaine n'est jamais absolue. Ensuite, il peut exister des bénéfices écologiques ou économiques à

maintenir le plus longtemps possible une population, même si l'extinction à moyen terme est presque certaine. Finalement, plusieurs considérations éthiques s'opposent toujours à l'arrêt des efforts de conservation. On voit qu'une réponse simple est difficile. Le lecteur peut peut-être étudier la situation du caribou de la Gaspésie comme point de départ pour approfondir sa propre réflexion.

Les changements climatiques vont-ils augmenter la prise de conscience du public en ce qui concerne la nécessité de protéger la biodiversité ?

Nous sommes en général préoccupés par notre bien-être plus que par la survie de toutes les autres espèces avec lesquelles nous partageons la planète. Tout changement qui risque d'affecter l'économie d'une région ou la santé humaine, par exemple le déclin rapide de certaines forêts ou la prolifération de ravageurs ou d'espèces exotiques, contribuera à une prise de conscience de notre vulnérabilité face aux changements climatiques. Certaines espèces charismatiques en difficulté éveillent aussi les consciences, mais pour des milliers d'autres dont on perçoit mal l'utilité, les biologistes et environnementalistes doivent mettre en lumière les liens qui unissent toutes les composantes des écosystèmes, incluant les humains.

Comment sont identifiés les éléments de biodiversité à préserver en priorité ?

C'est un exercice orienté par la science, mais dont l'aboutissement dépend de considérations politiques, elles-mêmes influencées par l'économie. Les éléments de biodiversité qui présentent un intérêt économique immédiat constituent une ressource souvent gérée en priorité, de façon à en assurer la pérennité. Ce n'est toutefois pas toujours le cas, comme le montre la diminution rapide des stocks de poissons en haute mer, une ressource commune soumise à un système de gestion incapable d'assurer les bénéfices économiques à long terme. Lorsque certains éléments de biodiversité, comme des populations ou espèces, présentent un risque de disparition, des moyens scientifiques de classification du risque sont utilisés (c'est par exemple le travail du Comité sur la situation des espèces en péril au

Canada), puis des procédures de rétablissement doivent en principe être mises en œuvre si le risque de disparition est élevé. Dans les faits, cette mise en œuvre dépend cependant de la volonté politique.

Faut-il faire des suivis écologiques spécialement pour détecter les effets des changements climatiques ?

Oui, car on prévoit de nombreux effets des changements climatiques sur la répartition des espèces, l'abondance des populations et le fonctionnement des écosystèmes. Une des mesures d'adaptation aux changements climatiques consiste à détecter le plus tôt possible les changements écologiques pour établir rapidement des mesures de gestion appropriées. La détection des changements est un élément central de la gestion adaptative. Mais il faudra faire des choix, car il est illusoire de penser que toutes les espèces, tous les écosystèmes et tous les processus écologiques seront étudiés. Ces choix doivent reposer sur les meilleures connaissances disponibles, tant au niveau de l'écologie que des changements climatiques.

Que faire pour que les forêts aménagées soient résilientes face aux changements climatiques ?

Il faut d'une part tenter de prévoir quelles essences seront favorisées ou défavorisées dans une région donnée par les changements climatiques (comme nous l'avons fait par notre étude des niches climatiques), et adapter la gestion forestière en fonction de ces prévisions. Par exemple, une espèce mieux adaptée qu'une autre au climat futur peut être privilégiée lors des plantations ou des éclaircies. D'autre part, comme les prévisions sont incertaines, il faut éviter de mettre tous ses œufs dans le même panier et favoriser la diversité dans les peuplements.

Quels sont les principaux obstacles à la réorganisation spatiale de la biodiversité au Québec ?

Ce qui constitue un obstacle à la dispersion d'une espèce n'en est pas forcément un pour celle d'une autre espèce. Cependant, les activités humaines réduisent souvent les habitats favorables à la dispersion des espèces. Ainsi, les zones à forte

intensité agricole du sud du Québec sont un obstacle à la dispersion de beaucoup d'espèces, de même que le sont les grandes régions urbaines, particulièrement Montréal. Le fleuve Saint-Laurent est quant à lui une barrière naturelle importante. Il est infranchissable pour beaucoup d'espèces dans sa partie estuarienne (entre le lac Saint-Pierre et l'élargissement de ses rives vers Pointe-des-Monts) et *a fortiori* quand il devient un golfe. On peut dire que le temps est un autre obstacle: le temps qu'il faut pour qu'une espèce colonise un nouveau milieu grâce aux individus qui se dispersent, se reproduisent et, de génération en génération, repoussent les limites de répartition de l'espèce.

Doit-on aider les espèces à s'adapter au changement climatique en les transportant plus au nord, par migration assistée ?

Cela ne peut pas être une stratégie générale appliquée à de nombreuses espèces, car l'implantation de nouvelles populations dans de nouveaux milieux présente des risques écologiques encore mal définis. Cependant, dans certains cas où les bénéfices paraîtront importants, où les coûts sembleront acceptables, et où les risques seront soigneusement étudiés et bien contrôlés, la migration assistée pourrait être une mesure de gestion adéquate et recommandable. Une littérature déjà vaste traite de ce sujet (voir la section 3.3).

La situation des espèces d'eau douce et marines ressemble-t-elle à celle des espèces terrestres, principalement traitées dans ce livre ?

Ces espèces font face au déplacement de leur niche climatique, comme les espèces terrestres. Pour les espèces d'eau douce, la difficulté d'adaptation pourrait cependant être plus grande que pour les espèces terrestres, car les milieux qu'elles habitent sont naturellement fragmentés, souvent très exploités par les humains, et fort vulnérables aux changements de précipitations, de température et d'évaporation. Certaines espèces marines pourraient avoir plus de facilité à ajuster leur répartition spatiale, bien que ce ne soit pas toujours le cas. Comme les espèces terrestres, les espèces aquatiques font face à des pressions de changement multiples, dont le réchauffement climatique n'est qu'une dimension.

Dans un contexte de changement climatique, comment s'assurer que les écosystèmes que nous protégeons maintenant dans des parcs seront identiques dans 50 ou 100 ans ?

Ils vont assurément changer. On ne peut plus penser à la protection de la biodiversité de façon statique. La conservation doit apprivoiser ce nouvel état de fait. La difficulté consistera à décider quelle partie des changements écologiques devra être acceptée (voire souhaitée, car elle permettra l'adaptation aux climats nouveaux) et quelle partie devra être combattue pour conserver certains éléments de biodiversité.

La notion d'intégrité écologique est-elle encore utile ?

Selon la Loi sur les parcs nationaux du Canada, l'intégrité écologique d'un parc est définie comme « un état jugé caractéristique de sa région naturelle et susceptible de durer, qui comprend les composantes abiotiques et la composition de même que l'abondance des espèces indigènes et des communautés biologiques, les rythmes de changement et les processus qui les soutiennent » (Parcs Canada, 2013). L'intégrité écologique est l'état visé par la gestion des parcs nationaux du Canada. Parcs Québec utilise aussi cette notion d'intégrité écologique, bien que de façon un peu différente. Dans tous les cas, il est clair que la définition ci-dessus n'est plus adéquate. Aucun état n'est « susceptible de durer » étant donné les changements climatiques rapides des prochaines décennies. La notion d'intégrité écologique peut demeurer utile, mais à condition d'être révisée et d'intégrer des éléments de changement rapide.

La notion de représentativité régionale est-elle encore utile ?

Selon le gouvernement du Québec (2012b), les parcs nationaux sont des aires protégées « dont l'objectif prioritaire est d'assurer la conservation et la protection permanente de territoires représentatifs des régions naturelles du Québec ». Une des missions de Parcs Québec est ainsi la protection et la mise en valeur de milieux représentatifs de l'une ou l'autre des 43 régions naturelles du Québec. Le climat n'est qu'un des critères permettant de définir

les régions naturelles (les caractéristiques géologiques en sont un autre) et la délimitation de ces régions ne devrait donc pas changer notablement, même dans un climat changeant. La notion de représentativité devrait garder tout son sens.

De nouveaux parasites, ravageurs, pathogènes ou espèces envahissantes vont-ils arriver au Québec à cause des changements climatiques ?

Oui, le processus est d'ailleurs déjà entamé. La maladie de Lyme, par exemple, est une zoonose causée par la bactérie *Borrelia burgdorferi* (Odgen *et al.*, 2006). Elle est véhiculée dans l'est de l'Amérique du Nord par la tique à pattes noires qui parasite de nombreux animaux, dont la souris à pattes blanches. Les humains sont également des hôtes occasionnels de ce parasite. La bactérie cause chez l'humain des troubles neurologiques, cardiaques et arthritiques. La souris, la tique et la bactérie se propagent actuellement rapidement vers le nord en Montérégie à cause des changements climatiques. Des mesures sanitaires et préventives devront être mises en place. De la même façon, il faut s'attendre à ce que de nouveaux insectes ravageurs des forêts, de nouveaux parasites des cultures et de nouvelles plantes envahissantes fassent leur apparition et s'étendent au Québec dans les prochaines décennies. Cela constitue un coût important des changements climatiques dans les environnements nordiques, jusqu'à maintenant protégés par leur climat. Les risques d'invasion ont d'ailleurs été évalués pour des plantes envahissantes au Québec dans un contexte de changements climatiques (de Blois *et al.*, 2013).

Une nouvelle espèce qui arrive au Québec par ses propres moyens, à cause du réchauffement climatique, doit-elle être considérée comme une espèce exotique ?

Aucune règle biologique ne détermine ce qu'est une espèce indigène ou exotique. La durée écoulée depuis que l'espèce s'est installée peut servir de critère, de même que la distance franchie par les nouveaux arrivants, mais le seuil qui sépare les deux types d'espèces demeure subjectif. Tôt ou tard, les espèces colonisant le Québec à cause du réchauffement climatique deviendront une partie intégrante du

patrimoine naturel du Québec. Par exemple, le moineau domestique et l'étourneau sansonnet, apportés d'Europe par les humains il y a plus d'un siècle, ne sont généralement plus considérés comme des espèces exotiques.

Que faudra-t-il faire face aux espèces qui arriveront naturellement du Sud à cause des changements climatiques ?

Si les problèmes (sanitaires, écologiques, économiques, etc.) engendrés par l'arrivée d'une nouvelle espèce sont importants et que le coût de la lutte est accepté socialement, des actions seront rapidement entreprises. Inversement, si une nouvelle espèce pose peu de problèmes ou que les coûts de la lutte sont exorbitants, rien ne sera tenté. Tous les cas intermédiaires feront l'objet de pressions, de discussions et de compromis. La gestion de ces espèces pourrait dans certains cas poser des défis importants et une pression induite sur un système de conservation déjà fragile qui bénéficie de ressources souvent insuffisantes.

Les corridors écologiques vont-ils favoriser le déplacement d'espèces envahissantes ?

Oui, il est impossible de restaurer des corridors écologiques pour augmenter la capacité de réorganisation spatiale de la biodiversité aux changements climatiques, sans favoriser simultanément le déplacement de certaines espèces envahissantes. Au mieux pourrait-on limiter la dispersion de certaines espèces envahissantes en adoptant des mesures de gestion qui leur seront propres. Par contre, dans des écosystèmes peu perturbés et très diversifiés, les espèces exotiques envahissantes devraient moins facilement s'implanter et prendre la place des espèces indigènes.

Quelle est maintenant la priorité de recherche en ce qui concerne les effets des changements climatiques sur la biodiversité ?

Anticiper les effets futurs des changements climatiques sur la biodiversité avec une précision accrue est probablement la plus grande priorité, car cela facilite la conception de mesures d'adaptations et aide à convaincre de l'urgence de réduire l'ampleur

des changements climatiques. D'autre part, il s'agit d'un stimulant efficace pour améliorer l'observation et la compréhension des effets actuels et passés des changements climatiques sur la biodiversité.

CONCLUSION

Le cheminement logique qui mène des prévisions climatiques à l'énoncé de stratégies d'adaptation pertinentes pour la conservation de la biodiversité est long et exigeant. Il soulève de nombreuses questions de fond et doit être adapté à chaque contexte géographique. Nous avons été aussi loin qu'il était possible dans cet ouvrage de synthèse décrivant la situation au Québec. La recherche évolue rapidement en ce domaine. À n'en pas douter, d'autres poursuivront l'effort et continueront d'explorer les voies les plus pertinentes.

Prenons un peu de recul pour terminer, en relevant quelques points importants concernant les relations entre l'adaptation aux changements climatiques et l'atténuation des changements climatiques. Il serait illusoire de penser que l'adaptation permettra d'empêcher ou d'effacer tous les effets négatifs des changements climatiques sur la biodiversité. Au mieux, l'adaptation réduira-t-elle certains des impacts les plus sérieux. Ainsi, les stratégies d'adaptation ne peuvent pas se substituer aux politiques d'atténuation. Ces dernières sont irremplaçables et le besoin d'adaptation devrait être à la fois un constat de leur nécessité et une justification de leur accélération.



CONCLUSION

Nous venons de présenter l'évaluation scientifique d'une question complexe, fascinante et d'une grande portée: comment évoluera le patrimoine naturel du Québec dans un climat plus chaud? Notre message est simple. Tout est en place pour que la biodiversité du Québec subisse des transformations majeures au cours du **xxi^e** siècle.

En tentant de préciser les contours de ces changements, nous sommes allés à la limite des capacités scientifiques actuelles. Nous nous sommes confrontés à de multiples contraintes et les avons expliquées. Les incertitudes demeurent nombreuses. Elles n'empêchent pas, cependant, que des actions concrètes puissent être entreprises dès aujourd'hui pour minimiser les risques que fait peser le réchauffement climatique sur la biodiversité du Québec et pour tirer profit des occasions qui se présenteront. Nous concluons maintenant ce livre en évoquant ce qu'il apporte de nouveau et d'utile, puis en présentant les suites qui pourraient lui être données.

1. L'ORIGINALITÉ DE CE LIVRE

La contribution originale de cet ouvrage, pour la science et pour le Québec, tient en cinq points que nous aborderons tour à tour. D'abord, jamais auparavant une réflexion sur le thème des effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec n'avait mobilisé autant de ressources. Le travail présenté résulte en effet de recherches auxquelles ont participé directement une quarantaine de personnes dont l'expérience, l'expertise, l'angle de vue et les motivations étaient fort divers. Cela a créé une synergie particulièrement utile pour approfondir des questions communes, analyser de vastes séries de données sous des angles multiples et confronter des idées nouvelles à ce qui était connu. Il est remarquable que la question des changements climatiques nous ait ainsi permis de mettre en relation d'immenses banques de données sur la biodiversité et le climat, qui n'avaient encore jamais été analysées conjointement. La mise en commun d'informations jusque-là éparpillées a permis de faire émerger un nouveau tableau.

En second lieu, des milliers de naturalistes et de techniciens ont accumulé, pendant des décennies, de nombreuses informations sur la biodiversité et les climats du Québec. Cette information a profondément enraciné notre étude dans le territoire québécois. Certes, de vastes zones d'ombre demeurent, car des groupes taxonomiques ont été peu observés et le climat de certaines régions est encore peu connu, ce qui a freiné notre progression. Mais les millions de données biologiques et climatiques accumulées sur le terrain pendant les dernières décennies constituent une référence irremplaçable, que nous avons contribué à mettre en lumière. Les générations de naturalistes et de scientifiques qui nous suivront continueront d'y puiser les sources de comparaison nécessaires pour évaluer les changements environnementaux caractéristiques de l'Anthropocène.

Le troisième élément de nouveauté touche à l'ampleur des changements prévus. Nous n'avions pas anticipé que les modifications attendues du

climat pourraient déplacer aussi rapidement les conditions climatiques favorables aux espèces. Que la pression de changement sur la biodiversité du Québec serait aussi forte. Que les ramifications intellectuelles et pratiques des déplacements de niche annoncés seraient aussi nombreuses et diversifiées. Notre travail met en lumière, pour le Québec, une série d'effets potentiels des changements climatiques qui n'avaient encore jamais été expliqués et synthétisés de façon aussi exhaustive.

Cet ouvrage comporte un quatrième élément nouveau à souligner. De nombreux rapports internationaux ont démontré avec force et justesse à quel point le réchauffement climatique présente des dangers importants pour la biodiversité de la planète. Une augmentation globale de la température de plus de 2 °C, ajoutée à de nombreux autres stress, conduirait probablement beaucoup d'espèces à l'extinction. Au Québec, des extinctions locales sont prévisibles, car certaines populations ne seront plus adaptées aux conditions dans lesquelles elles vivent aujourd'hui. Par contre, à l'échelle de la province, nous voyons naître un important paradoxe, puisque les conditions climatiques deviendront favorables à un plus grand nombre d'espèces que ce n'est le cas aujourd'hui. Ce paradoxe de la biodiversité nordique demandera à être exploré de façon approfondie, car il constitue une grande originalité du territoire québécois quand on le compare à de nombreuses autres régions du monde.

Finalement, le site Web (<<http://cc-bio.uqar.ca>>, consulté le 10 septembre 2013) qui accompagne ce livre permet au lecteur qui le désire d'explorer, grâce à des milliers de cartes, le déplacement sur le territoire québécois des niches climatiques de certaines d'espèces de plantes et d'animaux à travers le XXI^e siècle. Cette banque d'informations colossale représente un outil unique pour quiconque veut examiner la façon dont les conditions climatiques favorables aux espèces vont évoluer au Québec, selon différents scénarios. C'est à la fois un nouvel outil de réflexion et un nouvel outil de mobilisation, qui peut être utilisé par quiconque s'intéresse aux effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec.

2. CE QUI FAIT L'UTILITÉ D'UNE ÉVALUATION SCIENTIFIQUE

Nouveauté n'est pas synonyme d'utilité. Une évaluation scientifique doit avoir trois propriétés essentielles pour être utile. D'abord la légitimité, qui exige que les motivations de l'étude soient fondées et reconnues. Ensuite la crédibilité, qui demande que les résultats de la recherche soient acceptés avec confiance. Enfin la visibilité, qui requiert que les conclusions des travaux soient connues de leurs utilisateurs potentiels.

2.1. La légitimité

La légitimité de notre travail repose sur le long argumentaire que nous avons développé dans les trois premiers chapitres. Les débats soulevés par la perte globale de biodiversité s'intensifient, les changements actuels et futurs du climat ne sont plus remis en cause que par calcul politique, et les liens étroits qui unissent biodiversité et climat sont appuyés par toute la science de l'écologie. La juxtaposition de ces trois pans argumentaires apporte une grande légitimité scientifique à toutes les recherches sur les effets écologiques des changements climatiques.

Cette légitimité argumentaire est renforcée par une légitimité institutionnelle. Au plan international, l'Organisation des Nations Unies, la Banque mondiale et de nombreux autres organismes relaient les alertes lancées par les scientifiques au sujet de certains effets potentiellement dévastateurs des changements climatiques sur la biodiversité. Au Québec, le consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, dont une mission essentielle est de conseiller les décideurs pour mettre en œuvre des stratégies d'adaptation, soutient maintenant activement la recherche dans le domaine des écosystèmes et de la biodiversité. Notre projet CC-Bio joua d'ailleurs, dès sa naissance en 2007, un rôle pionnier au sein d'Ouranos en ce qui concerne le développement de cette thématique.

2.2. La crédibilité

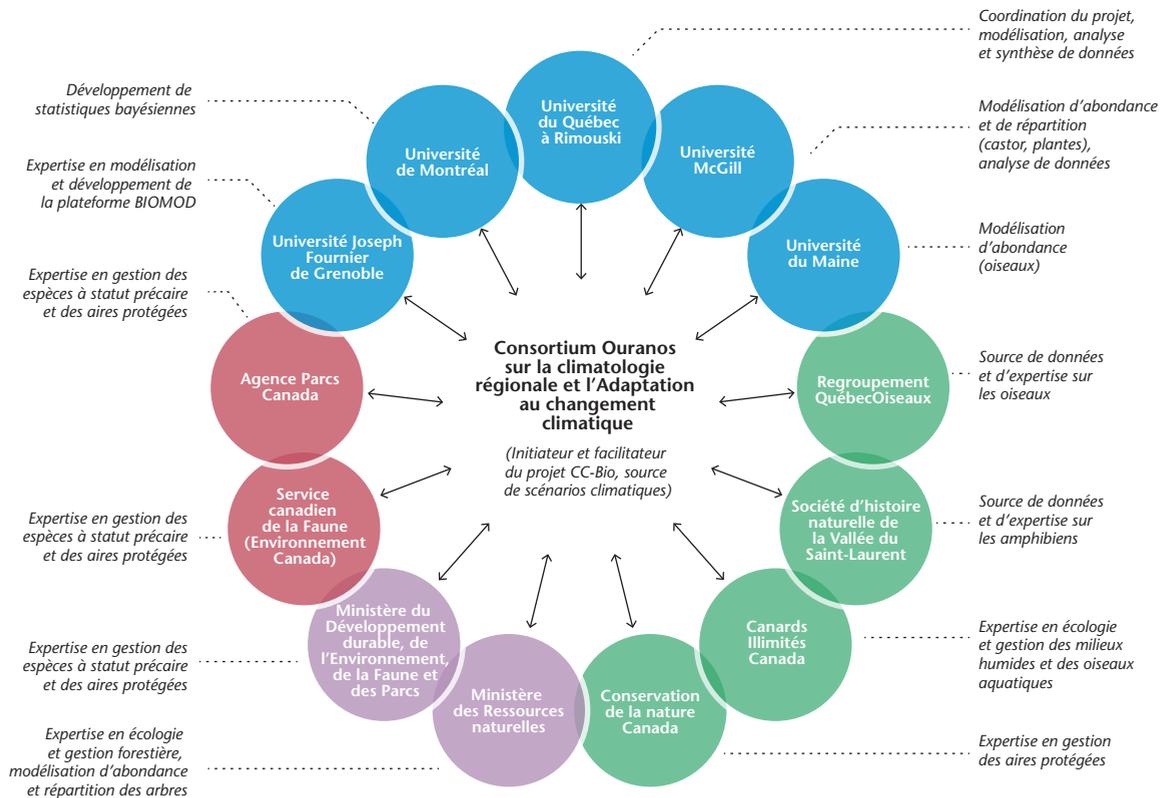
La crédibilité de nos recherches repose sur plusieurs piliers. D'abord, l'énorme masse d'information qui fut traitée, la diversité des expertises mises en commun, et le grand nombre d'institutions engagées dans le projet (figure C.1) sont des gages importants que les messages extraits de nos recherches ont une solide fondation.

Ensuite, comme toute recherche scientifique de grande ampleur, notre étude a fait constamment l'objet d'évaluations. Les nombreux organismes gouvernementaux et non gouvernementaux qui ont soutenu nos recherches (voir la section « Remerciements ») en ont examiné les objectifs et les méthodes. Une dizaine de thèses de doctorat et de mémoires de maîtrise ont été menés pendant le déroulement de CC-Bio. Chacun a subi de multiples examens critiques. Nous avons aussi exposé nos recherches lors de nombreux colloques scientifiques au Canada et à l'étranger. Cela nous a permis de déceler des erreurs, d'affiner nos raisonnements, d'approfondir nos interprétations. Le sceau final de légitimité de toute étude scientifique repose sur l'évaluation des résultats par les pairs, dans le cadre d'articles scientifiques. Les premiers articles sont déjà publiés (p. ex. Berteaux *et al.*, 2010; Chambers *et al.*, 2013) et de nombreux autres sont en révision au moment de mettre ce livre sous presse.

2.3. La visibilité

Nous avons choisi le format long d'un livre rédigé en français comme pièce maîtresse de la visibilité de notre travail. Ce n'était pas un choix naturel. Comme la plupart des scientifiques, nous sommes habitués aux articles techniques courts publiés en anglais dans des revues internationales. Ceux-ci rejoignent rapidement nos collègues experts, ils autorisent le jargon auquel nous sommes habitués et ils sont éminemment valorisés par les organismes de financement de la recherche.

Figure C.1. Appartenance institutionnelle et fonctions principales des spécialistes ayant participé aux recherches



Mais l'article scientifique a aussi ses défauts. Il hache la science en courts segments détachés. Il plonge directement au cœur de la découverte en expliquant peu son contexte. Son niveau technique le rend incompréhensible au non-initié. Il autorise peu la description du cheminement de la pensée, pourtant indispensable pour aiguïser le jugement et le sens critique du lecteur. Finalement, la croissance extraordinaire du nombre d'articles publiés chaque semaine rend la plupart d'entre eux invisibles au-delà de quelques cercles restreints.

Nous tenions à sauter les murs de nos universités et de nos spécialités. À continuer d'échanger, comme nous l'avons fait depuis le début du projet CC-Bio,

avec les biologistes, naturalistes, climatologues, décideurs, enseignants, forestiers, gestionnaires, vulgarisateurs scientifiques et étudiants, qui nous ont questionnés et se sont intéressés à nos recherches. Ce sont elles et eux qui influenceront collectivement le devenir de la biodiversité du Québec. La formule du livre en français a été choisie pour que nous puissions les rejoindre.

Finalement, comme nous l'avons souligné dans l'avant-propos, les figures du livre sont toutes disponibles sur le site <<http://cc-bio.uqar.ca>> (consulté le 10 septembre 2013). Une image vaut souvent mille mots. Nous espérons qu'elles faciliteront la diffusion de nos messages principaux.

3. ET LA SUITE ?

Notre travail sera approfondi par d'autres chercheurs et les idées présentées dans cet ouvrage influenceront, espérons-le, des décisions sur la gestion de populations, d'espèces, d'écosystèmes et de paysages. Les suites de ce livre se situent donc dans la recherche et ses applications, tout au long de deux chemins que de multiples sentiers relient.

3.1. Des recherches à poursuivre

On peut prévoir les directions principales que prendront les recherches futures. Trois types de sujets domineront. Premièrement, de nombreux travaux seront nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes écologiques qui régissent la façon dont le changement du climat affecte les populations et les écosystèmes. La modélisation de niche amorce et oriente la réflexion. Elle dessine les contours de ce qui est possible, dans certains cas de ce qui est probable. Mais elle exige la poursuite de la réflexion puisque ni les espèces ni les écosystèmes ne suivront aveuglément les déplacements des niches climatiques. Comme nous l'avons bien décrit, la réorganisation spatiale des répartitions d'espèces fait face à de multiples contraintes. Les interactions entre espèces moduleront notamment toutes les réponses au climat (Post, 2013). Des modèles performants intégrant la dispersion, la compétition et les autres facteurs qui influencent la dynamique des populations sont ainsi nécessaires. Ils feront sans nul doute l'objet de nombreuses thèses, bien qu'une partie infime de la biodiversité du Québec puisse recevoir un traitement aussi détaillé, à cause du manque de données sur l'histoire naturelle de la plupart des espèces.

Deuxièmement, la mise à jour des principes de gestion et de conservation en fonction d'un climat changeant exige de nombreuses recherches. Des développements théoriques, des tests de terrain et des discussions approfondies sur les valeurs à privilégier sont nécessaires pour classer les options de

gestion selon leurs mérites. Par exemple, comment la gestion du réseau d'aires protégées du Québec doit-elle être ajustée? Où doit-on en priorité maintenir ou restaurer la connectivité des habitats? Comment le rétablissement des espèces à statut précaire peut-il prendre en compte la réalité des changements climatiques? Comment manier l'outil de la migration assistée pour atténuer les risques qu'il présente? Les populations, les espèces et les écosystèmes offrent tous des cas distinctifs. Mais des principes généraux doivent être définis pour donner l'élan et servir de balises aux réflexions particulières.

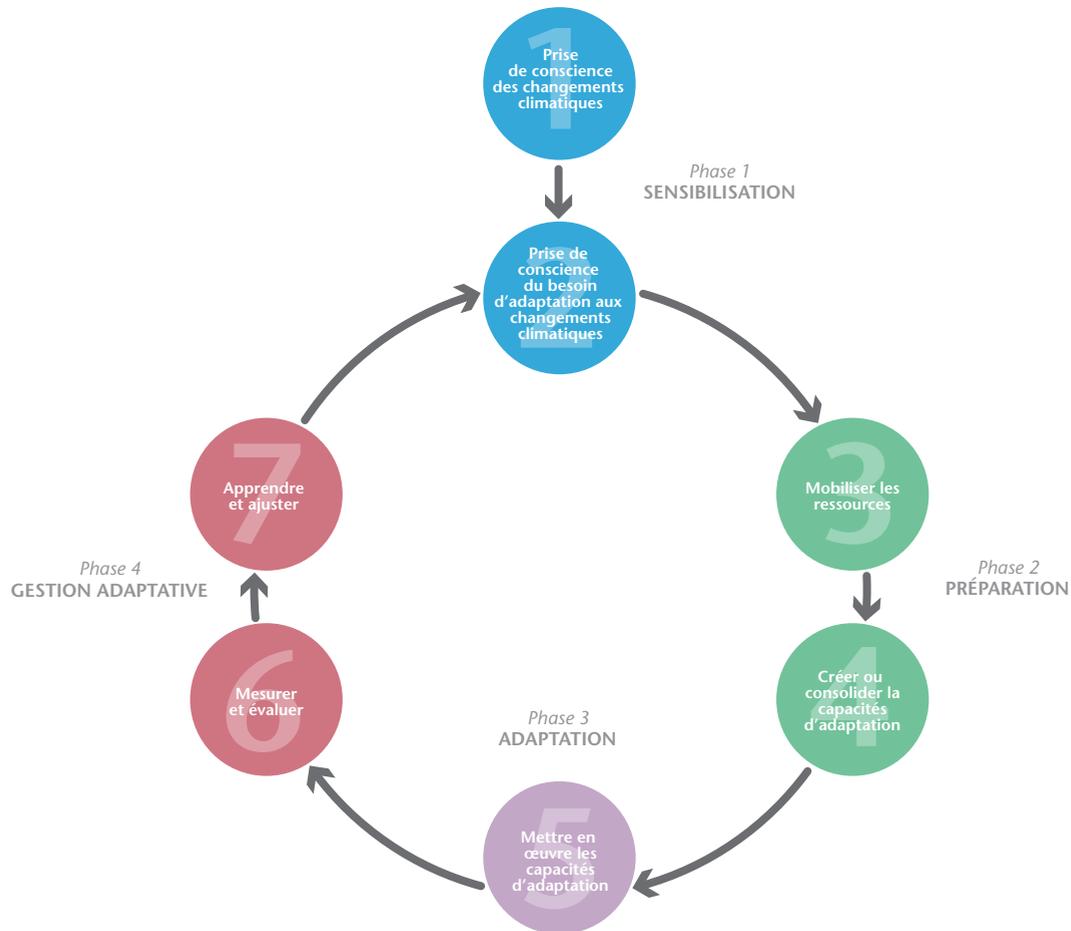
Enfin, de nombreuses recherches sont nécessaires pour résoudre les questions précises que le changement du climat pose pour la gestion de telle population, telle espèce, ou tel écosystème. Les demandes de la société influenceront l'ampleur des efforts de recherche consentis dans chaque cas. Les préoccupations pour la biodiversité ne sont pas les mêmes en Montérégie et en Abitibi. La gestion des populations de saumon atlantique pose des questions fort différentes de celle des populations d'érable à sucre, de caribou des bois, ou d'herbe à la puce. Les questions que pose le réchauffement du climat pour les lacs de l'Estrie n'ont rien à voir avec celles qu'il pose pour la toundra de la péninsule d'Ungava. Les spécialistes répondront aux demandes de la société en fonction des moyens qui seront mis à leur disposition.

3.2. Une nécessaire adaptation aux changements climatiques

La recherche est certes un élément clef de l'adaptation, mais l'adaptation comporte bien d'autres éléments. Identifions pour simplifier quatre phases (figure C.2) du processus d'adaptation. Ce découpage nous aidera à entrevoir certaines des suites pratiques que pourraient avoir nos travaux.

La première phase de l'adaptation est celle de la sensibilisation, qui permet de prendre conscience des changements climatiques, d'une part, et du besoin d'adaptation aux changements climatiques, d'autre part. C'est lors de cette étape initiale que

Figure C.2. Quatre phases du processus d'adaptation aux changements climatiques



Source : Adaptée de Bourque *et al.* (2012).

notre ouvrage peut être le plus utile. Les cartes qui montrent le déplacement géographique des climats (figures 2.6 et 2.7), de même que les graphiques qui illustrent l'ampleur du déplacement des niches climatiques des espèces (voir la figure 5.6), sont par exemple d'excellents outils de sensibilisation. Surtout, le livre rassemble les nombreux raisonnements et les multiples informations qui devraient maintenant rendre incontournable la question des changements climatiques dans le domaine de la conservation de la biodiversité du Québec.

La seconde phase est celle de la préparation à l'adaptation. C'est lors de cette deuxième phase que sont mobilisées des ressources puis est créée ou renforcée la capacité d'adaptation. Par exemple, un ministère peut décider d'évaluer les principales vulnérabilités des parcs nationaux par rapport aux changements climatiques. Un organisme non gouvernemental peut recruter du personnel ayant une expertise en changements climatiques. Une agence de sécurité publique peut cartographier la présence sur le territoire d'un pathogène pour obtenir

une référence à laquelle pourront être comparés des relevés futurs. Les travaux que nous avons présentés peuvent aider à diriger ce type d'effort en orientant la réflexion, en soulevant des questions, ou en résumant l'état des connaissances sur des points particuliers.

La troisième étape, celle durant laquelle sont mises en œuvre les mesures d'adaptation, déborde largement du cercle d'influence qui peut être délimité pour cet ouvrage. Il n'en demeure pas moins que, parmi les personnes qui agissent concrètement dans la gestion des populations et des écosystèmes, les plus motivées sont souvent intéressées par le contexte dans lequel se situe leur action. Nous offrons une description approfondie de ce contexte.

La dernière phase, celle de la gestion adaptative, consiste à examiner sans relâche les résultats des phases précédentes pour mesurer leurs effets, évaluer leur pertinence, et apprendre des erreurs et

succès afin d'ajuster les mesures mises en œuvre. Cette dernière phase est menée par des personnes qui ont participé aux phases précédentes. Elle est essentielle, car, comme le souligne notre quatrième chapitre, la projection écologique est une science exigeante, si bien que la gestion écologique doit souvent progresser par essais-erreurs.

La science n'est qu'une des nombreuses sources d'influence qui orientent le cheminement des sociétés. La climatologie et l'écologie ont à l'évidence une influence croissante, puisqu'elles nous aident à comprendre comment nous modifions notre environnement planétaire. Arrivés à la fin du long cheminement scientifique offert par ce livre, nous espérons ainsi qu'il éclairera quelques pans de nos réflexions, en affûtant des arguments, en élargissant des horizons, en provoquant des prises de conscience, en engageant le sens critique et en stimulant l'action.

RÉFÉRENCES

- Agriculture et Agroalimentaire Canada** (2008). *Zones de rusticité des plantes au Canada*. <<http://sis.agr.gc.ca/siscan/bnds/climat/rusticite/intro.html>>, consulté le 30 septembre 2012.
- Albouy, C., Guilhaumon, F., Araújo, M.B. et al.** (2012). Combining projected changes in species richness and composition reveals climate change impacts on coastal Mediterranean fish assemblages. *Global Change Biology*, 18, 2995-3003.
- Alexander, L., Allen, S., Bindoff, N.L. et al.** (dir.) (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis – Summary for Policy Makers. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report*. <http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf>, consulté le 30 septembre 2013.
- Allard, M., Sarrazin, D. et Marchildon, C.** (2008). *Evidences of Impacts of Climate Warming on Permafrost in Nunavik (Northern Quebec)*. Actes du symposium sur l'environnement et les mines. Rouyn-Noranda, 2 au 5 novembre.
- Anderson, M.J., Crist, T.O., Chase, J.M. et al.** (2011). Navigating the multiple meanings of beta diversity: A roadmap for the practicing ecologist. *Ecology Letters*, 14, 19-28.
- Araújo, M.B., Alagador, D., Cabeza, M. et al.** (2011). Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters*, 14, 484-492.

- Araújo, M.B., Cabeza, M., Thuiller, W. et al.** (2004). Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. *Global Change Biology*, 10, 1618-1626.
- Araújo, M.B. et New, M.** (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution*, 22, 42-47.
- Araújo, M.B. et Pearson, R.G.** (2005). Equilibrium of species' distributions with climate. *Ecography*, 28, 693-695.
- Araújo, M.B., Pearson, R.G., Thuiller, W. et Erhard, M.** (2005). Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, 11, 1504-1513.
- Araújo, M.B. et Peterson, A.T.** (2012). Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*, 93, 1527-1539.
- Araújo, M.B., Whittaker, R.J., Ladle, R.J. et Erhard, M.** (2005b). Reducing uncertainties in projections of extinction risk from climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 14, 529-538.
- Aubin, I., Garbe, C.M., Colombo, S. et al.** (2011). Why we disagree about assisted migration: Ethical implications of a key debate regarding the future of Canada's forests. *The Forestry Chronicle*, 87, 755-765.
- Auzel P., Gaonac'h, H., Poisson, F. et al.** (2012). *Impacts des changements climatiques sur la biodiversité du Québec: résumé de la revue de littérature*. Montréal/Centre de la science de la biodiversité du Québec (CSBQ), Québec/ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), Montréal/Ouranos, <http://www.ouranos.ca/media/publication/231_Revuedelitterature-ResumeWeb.pdf>, consulté le 5 septembre 2013.
- Barnosky, A.D., Matzke, N., Tomiya, S. et al.** (2011). Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 471, 51-57.
- Beardmore, T. et Winder, R.** (2011). Review of science-based assessments of species vulnerability: Contributions to decision-making for assisted migration. *The Forestry Chronicle*, 87, 745-754.
- Berteaux, D.** (2005). Impacts des changements climatiques sur la faune du Québec. *FrancVert, le webzine environnemental*, 2, 1-9.
- Berteaux, D.** (2013). Québec's large-scale Plan Nord. *Conservation Biology*, 27, 242-243.
- Berteaux, D., de Blois, S., Angers, J.-F. et al.** (2010). The CC-Bio project: Studying the effects of climate change on Quebec biodiversity. *Diversity*, 2, 1181-1204.
- Berteaux, D., Diner, B., Dreyfus, C. et al.** (2007). Heavy browsing by a mammalian herbivore does not affect fluctuating asymmetry of its food plants. *ÉcoScience*, 14, 188-194.
- Berteaux, D., Humphries, M.M., Krebs, C.J. et al.** (2006). Constraints to projecting the effects of climate change on mammals. *Climate Research*, 32, 151-158.
- Berteaux, D., Réale, D., McAdam, A.G. et Boutin, S.** (2004). Keeping pace with fast climate change: Can Arctic life count on evolution? *Integrative and Comparative Biology*, 44, 140-151.
- Blandin, P.** (2010). *Biodiversité, l'avenir du vivant*. Paris, Albin Michel.
- Boisvert-Marsh, L., Périé, C. et de Blois, S.** (à paraître). *Can Trees Track Recent Climate Change? Evidence for Range Shift at High Latitudes*.
- Booth, T.H., Jovanovic, T., Ho, N.S. et al.** (2013). A systematic regional approach for climate change adaptation to protect biodiversity. *Climatic Change*, 117, 757-768.
- Bourchier, R.S. et Smith, S.M.** (1996). Influence of environmental conditions and parasitoid quality on field performance of *Trichogramma minutum*. *Entomologica Experimentalis et Applicata*, 80, 461-468.
- Bourque, A., Larrivée, C., Siron, R. et al.** (2012). *Bilan: 10 ans en vulnérabilités, impacts et adaptation*. Montréal, 5^e Symposium scientifique d'Ouranos, 19 au 21 novembre.
- Brisson, J., Paradis, E. et Bellavance, M.-È.** (2008). New evidence of common reed (*Phragmites australis*) sexual reproduction in Eastern Canada: A consequence of the recent global warming? *Rhodora*, 110, 225-230.
- Brooke, C.** (2008). Conservation and adaptation to climate change. *Conservation Biology*, 22, 1471-1476.
- Bugmann, H.** (2001). A review of forest gap models. *Climatic Change*, 51, 259-305.

- Buckley, L.B. et Kingsolver, J.G.** (2012). Functional and phylogenetic approaches to forecasting species' responses to climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 43, 205-226.
- Buisson, L., Thuiller, W., Casajus, N. et al.** (2010). Uncertainty in ensemble forecasting of species distribution. *Global Change Biology*, 16, 1145-1157.
- Carbayo, F. et Marques, A.C.** (2011). The costs of describing the entire animal kingdom. *Trends in Ecology and Evolution*, 26, 154-155.
- Cardinale, B.J., Duffy, J.E., Gonzalez, A. et al.** (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486, 59-67.
- Caya, D. et Laprise, R.** (1999). A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model: The Canadian RCM. *Monthly Weather Review*, 127, 341-362.
- Chambers, D., Périé, C., Casajus, N. et de Blois, S.** (2013). Challenges in modelling the abundance of 105 tree species in eastern North America using climate, edaphic, and topographic variables. *Forest Ecology and Management*, 291, 20-29.
- Chambers, L.E., Hughes, L. et Weston, M.A.** (2005). Climate change and its impacts on Australia's avifauna. *Emu*, 105, 1-20.
- Chapman, A.D.** (2009). *Numbers of Living Species in Australia and the World*. Report for the Australian Biological Resources Study, <<http://www.environment.gov.au/biodiversity/abrs/publications/other/species-numbers/2009/pubs/nlsaw-2nd-complete.pdf>>, consulté le 5 septembre 2013.
- Charest, P.** (2009). Première mention au Québec de la demoiselle *Ischnura hastata* (Say, 1839) (Odonata: Coenagrionidae). *Le naturaliste canadien*, 133, 29-30.
- Chen, I.-C., Hill, J. K., Ohlemuller, R. et al.** (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333, 1024-1026.
- Chuine, I.** (2010). Why does phenology drive species distribution? *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365, 3149-3160.
- Chuine, I., Aitken, S.N. et Ying, C.C.** (2001). Temperature thresholds of shoot elongation in provenances of *Pinus contorta*. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 1444-1455.
- Commission de coopération environnementale – CCE** (1997). *Les régions écologiques de l'Amérique du Nord: vers une perspective commune*. Rapport. Montréal, CCE.
- Commission géologique du Canada** (1981). *Geology and Canada*. Adaptation de l'ouvrage *La prospection au Canada* – 4^e édition, Ottawa, Commission géologique du Canada.
- Costello, M.J., May, R.M. et Stork, N.E.** (2013). Can we name Earth's species before they go extinct? *Science*, 339, 413-416.
- Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F.I. et al.** (2001). Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: Results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 7, 357-373.
- Crozier, L.** (2003). Winter warming facilitates range expansion: Cold tolerance of the butterfly *Atalopedes campestris*. *Oecologia*, 135, 648-656.
- Cyr, A. et Larivée, J.** (1995). *Atlas saisonnier des oiseaux du Québec*. Sherbrooke, Les Presses de l'Université de Sherbrooke et La Société de loisir ornithologique de l'Estrie.
- Dawson, T.P., Jackson, S.T., House, J.I. et al.** (2011). Beyond predictions: Biodiversity conservation in changing climate. *Science*, 332, 53-58.
- de Blois, S., Boisvert-Marsh, L., Schmucki, R. et al.** (2013). *Outils pour évaluer les risques d'invasion biologique dans un contexte de changements climatiques*. Montréal, Université McGill.
- de Dios, V.R., Fischer, C. et Colinas, C.** (2007). Climate change effects on Mediterranean forests and preventive measures. *New Forests*, 33, 29-40.
- D'Eon, R.G., Glenn, S.M., Parfitt, I. et Fortin, M.-J.** (2002). Landscape connectivity as a function of scale and organism vagility in a real forested landscape. *Conservation Ecology*, 6, 10.
- Desjarlais, C., Allard, M., Bélanger, D. et al.** (2010). *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Montréal, Ouranos.
- Desroches, J.-F. et Rodrigue, D.** (2004). *Amphibiens et reptiles du Québec et des Maritimes* – 2^e édition. Waterloo, Michel Quintin.

- Díaz, S., Tilman, D., Fargione, J. et al.** (2005). Biodiversity regulation of ecosystem services. Dans Hassan, R., Scholes, R. et Ash, N. (dir.), *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group*. Washington, Island Press, 297-329.
- Diniz-Filho, J.A.F., Bini, M.L., Rangel, T.F.L.V.B. et al.** (2009). Partitioning and mapping uncertainties in ensembles of forecasts of species turnover under climate change. *Ecography*, 32, 897-906.
- Doerr, J.A.J., Barrett, T. et Doerr, E.D.** (2011). Connectivity, dispersal behaviour and conservation under climate change: A response to Hodgson et al. *Journal of Applied Ecology*, 48, 143-147.
- Farrar, J.L.** (1996). *Les arbres du Canada*. Ottawa, FIDES et Service canadien des forêts (Ressources naturelles du Canada).
- Faubert, J., Tardif, B. et Lapointe, M.** (2010). *Les bryophytes rares du Québec. Espèces prioritaires pour la conservation*. Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du patrimoine écologique et des parcs, Centre de données sur le patrimoine naturel du Québec.
- Forbes, D.L., Parkes, G.S., Manson, G.K. et al.** (2004). Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Geology*, 210, 169-204.
- Fordham, D.A., Watts, M.J., Delean, S. et al.** (2012). Managed relocation as an adaptation strategy for mitigating climate change threats to the persistence of an endangered lizard. *Global Change Biology*, 18, 2743-2755.
- Francoeur, A.** (2010). *Liste des espèces de fourmis (formicides, hyménoptères)*. Document faunique 01. Entomofaune du Québec, <<http://entomofaune.qc.ca/Feuilles/DF01-formicides.pdf>>, consulté le 15 septembre 2012.
- Francoeur, X.** (2012). *Effets des changements climatiques sur la phénologie printanière de l'avifaune du Québec*. Mémoire de maîtrise. Rimouski, Université du Québec à Rimouski.
- Franklin, J.** (2010). *Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction*. Cambridge (UK), Cambridge University Press.
- Frère Marie-Victorin, Rouleau, E. et Brouillet, L.** (2002). *Flore laurentienne* – 3^e édition. Montréal, Gaëtan Morin.
- Galatowitsch, S., Frelich, L. et Philipps-Mao, L.** (2009). Regional climate change adaptation strategies for biodiversity conservation in a midcontinental region of North America. *Biological Conservation*, 142, 2012-2022.
- Gauthier, J. et Aubry, Y.** (1995). *Les oiseaux nicheurs du Québec: atlas des oiseaux nicheurs du Québec méridional*. Montréal, Association québécoise des groupes d'ornithologues, Société québécoise de protection des oiseaux et Service canadien de la faune (Environnement Canada).
- Gendreau, Y.** (2013). *Rôle du réseau d'aires protégées proposé au Bas-Saint-Laurent dans le contexte des changements climatiques: Avis scientifique*. Rimouski, Université du Québec à Rimouski, Chaire de recherche du Canada en biodiversité nordique.
- Gillson, L., Dawson, T.P., Jack, S. et al.** (2013). Accommodating climate change contingencies in conservation strategy. *Trends in Ecology and Evolution*, 28, 135-142.
- Gouvernement du Québec** (2012a). « Économie ». <<http://www.gouv.qc.ca/portail/quebec/pgs/common/portrait/economie/>>, consulté le 30 septembre 2012.
- Gouvernement du Québec** (2012b). *Loi sur les parcs L.R.Q.* <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/P_9/P9.html>, consulté le 5 septembre 2013.
- Gray, L.K. et Hamann, A.** (2011). Strategies for reforestation under uncertain future climates: Guidelines for Alberta, Canada. *PLoS ONE*, 6, e22977.
- Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie et environnement aquatique – GRIL** (2007). *Les cyanobactéries dans les lacs québécois: un portrait de la situation selon les chercheurs du GRIL*. Rapport. Trois-Rivières, Université du Québec à Trois-Rivières, GRIL.
- Groves, C.R., Game, E.T. et Anderson, M.G.** (2012). Incorporating climate change into systematic conservation planning. *Biodiversity Conservation*, 21, 1651-1671.
- Guisan, A. et Theurillat, J.-P.** (2000). Equilibrium modelling of alpine plant distribution: How far can we go? *Phytocoenologia*, 30, 353-384.
- Guisan, A. et Thuiller, W.** (2005). Predicting species distribution: Offering more than simple habitat models. *Ecology letters*, 8, 993-1009.

- Guisan, A. et Zimmermann, N.E.** (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147-186.
- Hagerman, S., Dowlatabadi, H., Chan, K.M.A. et al.** (2010). Integrative propositions for adapting conservation policy to the impacts of climate change. *Global Environmental Change*, 20, 351-362.
- Haila, Y.** (1999). Islands and fragments. Dans Hunter, M.J. Jr. (dir.), *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*. Cambridge (UK), Cambridge University Press, 234-264.
- Halfpenny, J.C. et Ozanne, R.D.** (1989). *Winter: An Ecological Handbook*. Boulder (CO), Johnson Books.
- Hammond, P.M.** (1992). Species inventory. Dans Groombridge, B. (dir.), *Global Diversity: Status of the Earth's Living Resources*. Londres, Chapman and Hall, 17-39.
- Handfield, L.** (2011). *Les papillons du Québec*. Saint-Constant (QC), Les Éditions Broquet.
- Hannah, L.** (2008). Protected areas and climate change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134, 201-212.
- Hannah, L.** (2010). A global conservation system for climate-change adaptation. *Conservation Biology*, 24, 70-77.
- Hannah, L.** (2011). Climate change, connectivity, and conservation success. *Conservation Biology*, 25, 139-1142.
- Hannah, L.** (2012). *Saving a Million Species: Extinction Risk from Climate Change*. Washington (DC), Island Press.
- Hannah, L., Midgley, G.F., Andelman, S. et al.** (2007). Protected area needs in a changing climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5, 131-138.
- Hannah, L., Midgley, G.F., Lovejoy, T. et al.** (2002a). Conservation of biodiversity in a changing climate. *Conservation Biology*, 16, 264-268.
- Hannah, L., Midgley, G.F. et Millar, D.** (2002b). Climate change-integrated conservation strategies. *Global Ecology and Biogeography*, 11, 485-495.
- Hayward, M.W.** (2009). Conservation management for the past, present and future. *Biodiversity Conservation*, 18, 765-775.
- Heller, N.E. et Zavaleta, E.S.** (2009). Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*, 142, 14-32.
- Hewitt, N., Klenk, N., Smith, A.L. et al.** (2011). Taking stock of the assisted migration debate. *Biological Conservation*, 144, 2560-2572.
- Hitch, A.T. et Leberg, P.L.** (2007). Breeding distributions of North American bird species moving north as a result of climate change. *Conservation Biology*, 21, 534-539.
- Hodgson, J.A., Thomas, C.D., Wintle, B.A. et al.** (2009). Climate change, connectivity and conservation decision making: Back to basics. *Journal of Applied Ecology*, 46, 964-969.
- Houle, G.** (2007). Spring-flowering herbaceous plant species of the deciduous forests of eastern Canada and 20th century climate warming. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 505-512.
- Hulme, P.E.** (2005). Adapting to climate change: Is there scope for ecological management in the face of a global threat? *Journal of Applied Ecology*, 42, 784-794.
- Humphries, M.M., Thomas, D. et Speakman J.** (2002). Climate-mediated energetic constraints on the distribution of hibernating mammals. *Nature*, 418, 313-316.
- Hunter, A.F.** (1993). Gypsy moth population sizes and the window of opportunity in spring. *Oikos*, 68, 531-538.
- Hunter, M. Jr.** (2007). Climate change and moving species: Furthering the debate on assisted colonization. *Conservation Biology*, 21, 1356-1358.
- Huntley, B., Green, R.E., Collingham, Y.C. et Willis, S.G.** (2007). *A Climatic Atlas of European Breeding Birds*. Barcelone, Lynx Edicions.
- Hutchinson, G.E.** (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 145-159.
- Hutchinson, R.** (2003). L'étude des araignées (Araneae) au Québec: le point et perspectives. *Le naturaliste canadien*, 127, 24-31.

- Iverson, L.R., Prasad, A.M., Hale, B.J. et Sutherland, E.K. (1999). *An Atlas of Current and Potential Future Distributions of Common Trees of the Eastern United States*. Rapport technique général NE-265. Newtown Square (PA), U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station.
- Iverson, L.R., Schwartz, M.W. et Prasad, A.M. (2004). Potential colonization of newly available tree-species habitat under climate change: An analysis for five eastern US species. *Landscape Ecology*, 19, 787-799.
- Jackson, S.T. et Sax, D.F. (2010). Balancing biodiversity in a changing environment: Extinction debt, immigration credit and species turnover. *Trends in Ecology and Evolution*, 25, 153-160.
- Kauserud, H., Stige, L.C., Vik, J.O. et al. (2008). Mushroom fruiting and climate change. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 105, 3811-3814.
- Kostyack, J., Lawler, J.J., Goble, D.D. et al. (2011). Beyond reserves and corridors: Policy solutions to facilitate the movement of plants and animals in a changing climate. *BioScience*, 61, 713-719.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C. et al. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259-263.
- Krosby, M., Tewksbury, J., Haddad, N.M. et al. (2010). Ecological connectivity for a changing climate. *Conservation Biology*, 24, 1686-1689.
- Labrecque, J. et Lavoie, G. (2002). *Les plantes vasculaires menacées ou vulnérables du Québec*. Québec, ministère de l'Environnement, Direction du patrimoine écologique et du développement durable.
- La Sorte, F.A. et Thompson, F.R III (2007). Poleward shifts in winter ranges of North American birds. *Ecology*, 88, 1803-1812.
- Lavoie, C. (2012). Les plantes vasculaires exotiques naturalisées: une nouvelle liste pour le Québec. *Le naturaliste canadien*, 136, 6-32.
- Lavoie, C. (2013). Biological collections in an ever changing world: Herbaria as tools for biogeographical and environmental studies. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 15, 68-76.
- Lavoie, C. et Lachance, D. (2006). A new herbarium-based method for reconstructing the phenology of plant species across large areas. *American Journal of Botany*, 93, 512-516.
- Lawler, J.J. (2009). Climate change adaptation strategies for resource management and conservation planning. *The Year in Ecology and Conservation Biology*, 1162, 79-98.
- Lawler, J.J. et Olden, J.D. (2011). Reframing the debate over assisted colonization. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9, 569-574.
- Lawler, J.J., Tear, T.H., Pyke, C. et al. (2010). Resource management in a changing and uncertain climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8, 35-43.
- Lebœuf, M. (2010). *Nous n'irons plus au bois: la biodiversité québécoise en péril*. Québec, Vélo Québec Éditions.
- Lee, T.M. et Jetz, W. (2008). Future battlegrounds for conservation under global change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 275, 1261-1270.
- Lelong, B., Lavoie, C., Jodoin, Y. et Belzile, F. (2007). Expansion pathways of the exotic common reed (*Phragmites australis*): A historical and genetic analysis. *Diversity and Distributions*, 13, 430-437.
- Lemieux, C.J., Beechey, T.J., Scott, D.J. et al. (2011). The state of climate change adaptation in Canada's protected areas sector. *The George Wright Forum*, 28, 216-236.
- Lemieux, C.J. et Scott, D.J. (2005). Climate change, biodiversity conservation and protected area planning in Canada. *The Canadian Geographer/Le géographe canadien*, 49, 384-399.
- Lepetz, V., Massot, M., Chaine, A. et Clobert, J. (2009). Climate warming and the evolution of morphotypes in a reptile. *Global Change Biology*, 15, 454-466.
- Lescop-Sinclair, K. et Payette, S. (1995). Recent advance of the Arctic treeline along the eastern coast of Hudson Bay. *Journal of Ecology*, 83, 929-936.
- Lévêque, C. et Mounolou, J.-C. (2001). *Biodiversité: dynamique biologique et conservation*. Paris, Dunod.
- Limoges, B. (2009). Biodiversité, services écologiques et bien-être humain. *Le naturaliste canadien*, 133, 15-19.
- Lindenmayer, D.B., Steffen, W., Burbidge, A.A. et al. (2010). Conservation strategies in response to rapid climate change: Australia as a study case. *Biological Conservation*, 143, 1587-1593.

- Liu, C., Berry, P.M., Dawson, T.P. et Pearson, R.G. (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28, 385-393.
- Loarie, S.R., Duffy, P.B., Hamilton, H. et al. (2009). The velocity of climate change. *Nature*, 462, 1052-1055.
- Logan, T., Charron, I., Chaumont, D. et al. (2011). *Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise*. Montréal/Ouranos, Québec/ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF).
- Loss, S.R., Terwilliger, L.A. et Peterson, A.C. (2011). Assisted colonization: Integrating conservation strategies in the face of climate change. *Biological Conservation*, 144, 92-100.
- Lovejoy, T.E. (2006). Protected areas: A prism for a changing world. *Trends in Ecology and Evolution*, 21, 329-333.
- Malmsheimer, R.W., Hefferman, P., Brink, S. et al. (2008). Forest management solutions for mitigating climate change in the United States. *Journal of Forestry*, 106, 115-117.
- Marchand, P.J. (1996). *Life in the Cold: An Introduction to Winter Ecology*. Hanovre et Londres, University Press of New England.
- Maris, V. (2010). *Philosophie de la biodiversité: petite éthique pour une nature en péril*. Paris, Buchet/Chastel.
- Marmion, M., Luoto, M., Heikkinen, R.K. et Thuiller, W. (2009a). The performance of state-of-the-art modelling techniques depends on geographical distribution of species. *Ecological Modelling*, 220, 3512-3520.
- Marmion, M., Parviainen, M., Luoto, M. et al. (2009b). Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and Distributions*, 15, 59-69.
- Matthews, S., O'Connor, R., Iverson, L.R. et Prasad, A.M. (2004). *Atlas of Climate Change Effects in 150 Bird Species of the Eastern United States*. Rapport technique général NE-318. Newtown Square (PA), U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station.
- Mawdsley, J.R., O'Malley, R. et Ojima, D.S. (2009). A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation. *Conservation Biology*, 23, 1080-1089.
- Mazaris, A.D., Papanikolaou, A.D., Barbet-Massin, M. et al. (2013). Evaluating the connectivity of a protected areas' network under the prism of global change: The efficiency of the European Natura 2000 network for four birds of prey. *PLoS ONE*, 8, e59640.
- McCulloch, M.M., Forbes, D.L. et Shaw, R.W. (2002). *Coastal Impact of Climate Change and Sea-level Rise on Prince Edward Island*. Rapport synthèse, dossier public 4261. Ottawa, Commission géologique du Canada.
- McKenney, D.W., Kesteven, J.L., Hutchinson, M.F. et Venier, L.A. (2001). Canada's Plant Hardiness zones revisited using modern climate interpolation techniques. *Canadian Journal of Plant Science*, 81, 117-129.
- McKenney, D.W., Pedlar, J.H., Papadopol, P. et al. (2006). The development of 1901-2000 historical monthly climate models for Canada and the United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138, 69-81.
- McLachlan, J.S., Hellmann, J.J. et Schwartz, M.K. (2007). A framework for debate of assisted migration in an era of climate change. *Conservation Biology*, 21, 297-302.
- McManus, K.M., Morton, D.C., Masek, J.G. et al. (2012). Satellite-based evidence for shrub and graminoid tundra expansion in Northern Quebec from 1986 to 2010. *Global Change Biology*, 18, 2313-2323.
- McNeil, R. (2006). *Le grand livre des champignons du Québec et de l'Est du Canada*. Waterloo (QC), Michel Quintin.
- Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T. et al. (2007). The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1383-1394.
- Meir, E., Andelman, S. et Possingham, H.P. (2004). Does conservation planning matter in a dynamic and uncertain world? *Ecology Letters*, 7, 615-622.
- Millar, C.I., Stephenson, N.L. et Stephens, S.L. (2007). Climate change and forests of the future: Managing in the face of uncertainty. *Ecological Applications*, 17, 2145-2151.

- Millenium Ecosystem Assessment – MEA** (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis. A report of the millenium ecosystem assessment*. Washington (DC), Island Press.
- Millien, V., Fiset, J., Lapointe, J.F. et al.** (2012). Effets des changements climatiques et de la fragmentation de l'habitat sur la répartition de la souris à pattes blanches: conséquences sur l'expansion de la maladie de Lyme au Québec. Présentation au colloque *Écosystèmes, biodiversité et changements climatiques: Préparer les stratégies d'adaptation pour le Québec*, Montréal, ACFAS, 9 mai.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune – MRNF** (2010). *Ressources et industries forestières: portrait statistique*. Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction du développement de l'industrie des produits forestiers.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune – MRNF** (2011). *L'importance économique des ressources naturelles au Québec*. <<http://mrnf.gouv.qc.ca/ministere/economique/index.jsp/>>, consulté le 30 septembre 2012.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune – MRNF** (2013). *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*. <<http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaires-zones-carte.jsp>>, consulté le 3 mai 2013.
- Minteer, B.A. et Collins, J.P.** (2010). Move it or lose it? The ecological ethics of relocating species under climate change. *Ecological Applications*, 20, 1801-1804.
- Moir, M.L., Vesk, P.A., Brennan, K.E.C. et al.** (2012). Considering extinction of dependant species during translocation, ex-situ conservation, and assisted migration of threatened hosts. *Conservation Biology*, 26, 199-207.
- Morecroft, M.D., Crick, H.Q.P., Duffield, S.J. et al.** (2012). Resilience to climate change: Translating principles into practice. *Journal of Applied Ecology*, 49, 547-551.
- Mueller, J.M. et Hellmann, J.J.** (2008). An assessment of invasion risk from assisted migration. *Conservation Biology*, 22, 562-567.
- Musée Redpath** (1999). *La biodiversité du Québec*. Montréal, Université McGill, <<http://redpath-museum.mcgill.ca/>>, consulté le 15 septembre 2013.
- Nakicenovic, N. et Swart, R.** (dir.) (2000). *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge (UK), Cambridge University Press.
- Nation Unies** (1992). *Convention sur la diversité biologique*. <<http://www.cbd.int/doc/legal/cbd-fr.pdf>>, consulté le 5 septembre 2013.
- Noss, R.F.** (1992). Essay: Issues of scale in conservation biology. Dans Fiedler, P.L. et Jain, S.K. (dir.), *Conservation Biology: The Theory and Practice of Nature Conservation, Preservation and Management*. New York, Chapman and Hall, 239-250.
- Noss, R.F.** (2001). Beyond Kyoto: Forest management in a time of rapid climate change. *Conservation Biology*, 15, 578-590.
- Nuñez, T.A., Lawler, J.J., McRae, B.H. et al.** (2013). Connectivity planning to address climate change. *Conservation Biology*, 27, 407-416.
- O'Donnell, J.A., Jorgenson, M.T., Harden, J.W. et al.** (2012). The effects of permafrost thaw on soil hydrologic, thermal, and carbon dynamics in an Alaskan peatland. *Ecosystems*, 15, 213-229.
- Ogden, N.H., Maarouf, A., Barker, I.K. et al.** (2006). Climate change and the potential for range expansion of the Lyme disease vector *Ixodes scapularis* in Canada. *International Journal of Parasitology*, 36, 63-70.
- Oliver, T.H., Smithers, R.J., Bailey, S. et al.** (2012). A decision framework for considering climate change adaptation strategies in biodiversity conservation planning. *Journal of Applied Ecology*, 49, 1247-1255.
- O'Neill, G.A., Ukrainetz, N., Carlson, M. et al.** (2008). Assisted migration to address climate change in British Columbia: Recommendations for interim seed transfer standards. Rapport technique 048, <<http://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Tr/Tr048.pdf>>, consulté le 5 septembre 2013.
- Opdam, P. et Wascher, D.** (2004). Climate change meets habitat fragmentation: Linking landscape and biogeographical scale levels in research and conservation. *Biological Conservation*, 117, 285-297.
- Parcs Canada** (2013). *Parcs nationaux du Canada: l'intégrité écologique. Qu'est-ce que l'intégrité écologique?* <<http://www.pc.gc.ca/fra/progs/np-pn/ie-ei.aspx>>, consulté le 4 décembre 2013.
- Parmesan, C. et Yohe, G.** (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37-42.

- Paterson, J.S., Araújo, M.B., Berry, P.M. *et al.* (2008). Mitigation, adaptation, and the threat to biodiversity. *Conservation Biology*, 22, 1352-1355.
- Patterson, B.D., Ceballos, G., Sechrest, W. *et al.* (2007). *Digital Distribution Maps of the Mammals of the Western Hemisphere, Version 3.0*. Arlington (TX), NatureServe.
- Payette, S., Delwaide, A., Caccianiga, M. et Beauchemin, M. (2004). Accelerated thawing of subarctic peatland permafrost over the last 50 years. *Geophysical Research Letters*, 31, L18208.
- Payette, S. et Fillon, L. (1985). White spruce expansion at the tree line and recent climate change. *Canadian Journal of Forest Research*, 15, 241-251.
- Payette, S. et Lavoie, C. (1994). The arctic tree line as a record of past and recent climate changes. *Environmental Reviews*, 2, 78-90.
- Pearson, R.G. et Dawson, T.P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: Are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12, 361-371.
- Pearson, R.G. et Dawson, T.P. (2005). Long-distance plant dispersal and habitat fragmentation: Identifying conservation targets for spatial landscape planning under climate change. *Biological Conservation*, 123, 389-401.
- Pearson, R.G., Thuiller, W., Araújo, M.B. *et al.* (2006). Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography*, 33, 1704-1711.
- Pedlar, J.H., McKenney, D.W., Aubin, I. *et al.* (2012). Placing forestry in the assisted migration debate. *BioScience*, 62, 835-842.
- Pedlar, J.H., McKenney, D.W., Beaulieu, J. *et al.* (2011). The implementation of assisted migration in Canadian forests. *The Forestry Chronicle*, 87, 766-777.
- Perron, J.-M. et Ruel, Y. (2002). Saison de vol des Odonates du Territoire du marais Léon-Provancher, Neuville, division de recensement de Portneuf (Québec). *Le naturaliste canadien*, 126, 13-17.
- Pilon, J.-G. et Lagacé, D. (1998). *Les Odonates du Québec*. Québec, Corporation Entomofaune du Québec.
- Post, E. (2013). *Ecology of Climate Change: The Importance of Biotic Interactions*. Princeton (BC), Princeton University Press.
- Potvin, F., Huot, J. et Duchesneau, F. (1981). Deer mortality in the Pohenegamook wintering area, Quebec. *Canadian Field Naturalist*, 95, 80-84.
- Prasad, A.M., Iverson, L.R. et Liaw, A. (2006). Newer classification and regression tree techniques: Bagging and random forests for ecological prediction. *Ecosystems*, 9, 181-199.
- Prentice, I.C. (1986). Vegetation response to past climatic variation. *Vegetatio*, 67, 131-141.
- Prentice, I.C., Cramer, W., Harrison, S.P. *et al.* (1992). A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 19, 117-134.
- Prescott, J. et Richard, P. (2004). *Mammifères du Québec et de l'Est du Canada – 2^e édition*. Waterloo (QC), Michel Quintin.
- Pressey, R.L., Cabeza, M., Watts, M.E. *et al.* (2007). Conservation planning in a changing world. *Trends in Ecology and Evolution*, 22, 583-592.
- Primack, D., Imbres, C., Primack, R.B. *et al.* (2004). Herbarium specimens demonstrate earlier flowering times in response to warming in Boston. *American Journal of Botany*, 91, 1260-1264.
- Prober, S.M., Thiele, K.R., Rundel, P.W. *et al.* (2012). Facilitating adaptation of biodiversity to climate change: A conceptual framework applied to the world's largest Mediterranean-climate woodland. *Climatic Change*, 110, 227-248.
- Pyke, C.R. et Fischer, D.T. (2005). Selection of bioclimatically representative biological reserve systems under climate change. *Biological Conservation*, 121, 429-441.
- Raudsepp-Hearne, C., Peterson, G.D., Tengö, M. *et al.* (2010). Untangling the environmentalist's paradox: Why is human well-being increasing as ecosystem services degrade? *BioScience*, 60, 576-589.
- R Development Core Team (2009). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienne (Autriche), R Foundation for Statistical Computing, <<http://www.r-project.org>>, consulté le 5 septembre 2013.
- Regan, H.M., Syphard, A.D., Franklin, J. *et al.* (2012). Evaluation of assisted colonization strategies under global change for a rare, fire-dependant plant. *Global Change Biology*, 18, 936-947.

- Rehfeldt, G.E.** (2006). *A Spline Model of Climate for the Western United States*. Rapport technique général RMRS-GTR-165. Fort Collins (CO), US. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Ressources naturelles Canada** (2013). *Agrile du frêne*. <<http://scf.rncan.gc.ca/pages/318>>, consulté le 15 juin 2013.
- Ricciardi, A. et Simberloff, D.** (2009). Assisted colonization is not a viable conservation strategy. *Trends in Ecology and Evolution*, 24, 248-253.
- Richardson, D.M., Hellmann, J.J., McLachlan, J.S. et al.** (2009). Multidimensional evaluation of managed relocation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 9721-9724.
- Ridgely, R.S., Allnutt, T.F., Brooks, T. et al.** (2007). *Digital Distribution Maps of the Birds of the Western Hemisphere, Version 3.0*. Arlington (TX), NatureServe.
- Root, T.L.** (1988). Energy constraints on avian distributions and abundances. *Ecology*, 69, 330-339.
- Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R. et al.** (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421, 57-60.
- Ropars, P. et Boudreau, S.** (2012). Shrub expansion at the forest-tundra ecotone: Spatial heterogeneity linked to local topography. *Environmental Research Letters*, 7, 015501.
- Rose, N.-A. et Burton, P.J.** (2009). Using bioclimatic envelopes to identify temporal corridors in support of conservation planning in a changing climate. *Forest Ecology and Management*, 258S, S64-S74.
- Roy, H.E., Pocock, M.J.O., Preston, C.D. et al.** (2012). *Understanding Citizen Science and Environmental Monitoring*. <<http://www.ukeof.org.uk/documents/understanding-citizen-science.pdf>>, consulté le 5 septembre 2013.
- Roy, V. et de Blois, S.** (2008). Evaluating hedgerow corridors for the conservation of native forest herb diversity. *Biological Conservation*, 141, 298-307.
- Sainte-Marie, C.** (2011). Chasing climate change: Exploring the option of assisted migration. *The Forestry Chronicle*, 87, 707-710.
- Sainte-Marie, C., Nelson, E.A., Dabros, A. et al.** (2011). Assisted migration: Introduction to a multifaceted concept. *The Forestry Chronicle*, 87, 724-730.
- Sakai, A.** (1970). Freezing resistance in willows from different climates. *Ecology*, 51, 485-491.
- Sakai, A. et Weiser, C.J.** (1973). Freezing resistance in trees in North America with reference to tree regions. *Ecology*, 54, 118-126.
- Sandler, R.** (2010). The value of species and the ethical foundations of assisted colonization. *Conservation Biology*, 24, 424-431.
- Savard, J.P., Bernatchez, P., Morneau, F. et al.** (2008). *Étude de la sensibilité des côtes et de la vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques*. Montréal, Ouranos.
- Savard, M.** (1986). La saison de vol des Odonates dans le Québec méridional. *Fabriques*, 12, 49-55.
- Savard, M.** (2012). Expansion du papillon cécropia dans la zone tempérée mixte du Québec. *Le naturaliste canadien*, 136, 60-68.
- Scheffers, B.R., Yong, D.L., Harris, J.B.C. et al.** (2011). The World's rediscovered species: Back from the brink? *PLoS ONE*, 6, e22531.
- Scheller, R.M., Domingo, J.B., Sturtevant, B.R. et al.** (2007). Design, development and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution. *Ecological Modelling*, 201, 409-419.
- Schwartz, M.W.** (2012). Using niche models with climate projections to inform conservation management decisions. *Biological Conservation*, 155, 149-156.
- Scott, D.J. et Lemieux, C.J.** (2005). Climate change and protected area policy and planning in Canada. *The Forestry Chronicle*, 81, 696-703.
- Scott, D.J., Malcom, J.R. et Lemieux, C.J.** (2002). Climate change and modelled biome representation in Canada's national park system: implications for system planning and park mandates. *Global Ecology and Biogeography*, 11, 475-484.
- Seddon, P.J.** (2010). From reintroduction to assisted colonization: Moving along the conservation translocation spectrum. *Restoration Ecology*, 18, 796-802.
- Shirley, P.D. et Lamberti, G.A.** (2010). Assisted colonization under the U.S. Endangered Species Act. *Conservation Letters*, 3, 45-52.

- Simard, A., Banville, D. et Jutras, J.** (2010). *La biodiversité au Québec : 400 ans d'histoire humaine et naturelle*. Colloque annuel du Centre de la science de la biodiversité du Québec, Montréal, 1^{er} décembre, <<http://qcbs.ca/fr/evenements/colloque-annuel-en-science-de-la-biodiversite/colloque-du-csbq-2010/presentations-oraales/>>, consulté le 15 septembre 2013.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M. et al.** (dir.) (2007). *Changements climatiques 2007 : les éléments scientifiques*. Contribution du groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, <<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-frontmatter-fr.pdf>>, consulté le 5 septembre 2013.
- Stapp, P., Pekins, P.J. et Mautz, W.W.** (1991). Winter energy expenditure and the distribution of southern flying squirrels. *Canadian Journal of Zoology*, 69, 2548-2555.
- Svenning, J.-C., Fløjgaard, C., Morueta-Holme, N. et al.** (2009). Big moving day for biodiversity? A macroecological assessment of the scope for assisted colonization as a conservation strategy under global warming. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 8, 012017.
- Taberlet, P. et Cheddadi, R.** (2002). Quaternary refugia and persistence of biodiversity. *Science*, 297, 2009-2010.
- Tardif, B., Lavoie, G. et Lachance, Y.** (2005). *Atlas de la biodiversité du Québec : les espèces menacées ou vulnérables*. Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du développement durable, du patrimoine écologique et des parcs.
- Thibault, S. et Payette, S.** (2009). Recent permafrost degradation in bogs of the James Bay area, Northern Quebec, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, 20, 383-389.
- Thomas, C.D.** (2011). Translocation of species, climate change, and the end of trying to recreate past ecological communities. *Trends in Ecology and Evolution*, 26, 216-221.
- Thornwaite, C.W.** (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55-94.
- Thuiller, W.** (2004). Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. *Global Change Biology*, 10, 2020-2027.
- Thuiller, W., Araújo, M.B., Pearson, R.G. et al.** (2004a). Uncertainty in predictions of extinction risk. *Nature*, 430, 34.
- Thuiller, W., Brotons, L., Araújo, M.B. et Lavorel, S.** (2004b). Effects of restricting environmental range of data to project current and future species distribution. *Ecography*, 27, 165-172.
- Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R. et Araújo, M.B.** (2009). BIOMOD : A platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32, 369-373.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M.B. et al.** (2005). Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 8245-8250.
- Tranquillini, W.** (1979). *Physiological Ecology of the Alpine Timberline*. Berlin, Springer-Verlag.
- Turbis, C., Hébert, C. et Desrochers, P.** (2010). Ravageurs forestiers exotiques : protéger la productivité et l'intégrité de nos forêts. *Le naturaliste canadien*, 134, 36-42.
- Union internationale pour la conservation de la nature – UICN** (2011a). *IUCN Red List of Threatened Species. Version 2011.2*, <<http://www.iucnredlist.org>>, consulté le 15 septembre 2012.
- Union internationale pour la conservation de la nature – UICN** (2011b). *Torreya taxifolia*, <<http://www.iucnredlist.org/details/30968/0>>, consulté le 15 juin 2013.
- Van der Putten, W.H.** (2012). Climate change, aboveground-belowground interactions, and species' range shifts. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 43, 365-383.
- Vescovi, L., Berteaux, D., Bird, D. et de Blois, S.** (2009). *Freshwater Biodiversity Versus Anthropogenic Climate Change*. Paris, UNESCO, <[http://www.uqar.ca/files/biodiversite-nordique/2009VescovietalUN Water.pdf](http://www.uqar.ca/files/biodiversite-nordique/2009VescovietalUN%20Water.pdf)>, consulté le 5 septembre 2013.
- Vitt, P., Havens, K. et Hoegh-Guldberg, O.** (2009). Assisted migration : Part of an integrated conservation strategy. *Trends in Ecology and Evolution*, 24, 473-474.

- Vitt, P., Havens, K., Kramer, A.T. et al.** (2010). Assisted migration of plants: Changes in latitudes, changes in attitudes. *Biological Conservation*, 143, 18-27.
- Vos, C.C., Berry, P.M., Opdam, P. et al.** (2008). Adapting landscapes to climate change: Examples of climate-proof ecosystem networks and priority adaptation zones. *Journal of Applied Ecology*, 45, 1722-1731.
- Walmsley, C.A., Smithers, R.J., Berry, P.M. et al.** (2007). *MONARCH-Modelling Natural Resource Responses to Climate Change: A Synthesis for Biodiversity Conservation*. Oxford, UKCIP.
- Walther, G.-R., Post, E., Convey, P. et al.** (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389-395.
- Watson, J.E.M., Rao, M., Kang, A.-I. et al.** (2012). Climate change adaptation planning for biodiversity conservation: A review. *Advances in Climate Change Research*, 3, 1-11.
- Webb, T.I.** (1981). The past 11,000 years of vegetational change in eastern North America. *BioScience*, 31, 501-506.
- Webber, B.L. et Scott, J.K.** (2012). Rapid global change: Implications for defining natives and aliens. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 305-311.
- Weeks, A.R., Sgro, C.M., Young, A.G. et al.** (2011). Assessing the benefits and risks of translocations in changing environments: A genetic perspective. *Evolutionary Applications*, 4, 709-725.
- Welch, D.** (2005). What should protected areas managers do in the face of climate change? *The George Wright Forum*, 22, 75-93.
- Wilby, R.L. et Perry, G.L.W.** (2006). Climate change, biodiversity and the urban environment: A critical review based on London, UK. *Progress in Physical Geography*, 30, 73-98.
- Williams, J.E.** (2000). The biodiversity crisis and adaptation to climate change: A case study from Australia's forests. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61, 65-74.
- Williams, P., Hannah, L., Andelman, S. et al.** (2005). Planning for climate change: Identifying minimum-dispersal corridors for the Cape Proteaceae. *Conservation Biology*, 19, 1063-1074.
- Winder, R., Nelson, E. et Beardmore, T.** (2011). Ecological implications for assisted migration in Canadian forests. *The Forestry Chronicle*, 87, 731-744.
- Zech, G. et Aslan, B.** (2003). A new test for the multivariate two-sample problem based on the concept of minimum energy. *PHYSTAT*, 97-100.



INDEX GÉNÉRAL

A

acclimatation, 54, 61
adaptation, ix, xvi, xviii, 3, 38, 44, 46, 47, 61, 120-125,
127-136, 142, 146, 150-153, 155-158, 160-163, 167
 planifiée, 120
 réactive, 120
agriculture, 23, 27, 32, 33, 54, 62, 110, 129, 134-136
aire protégée, 36, 39, 40, 124, 125, 127, 128, 131, 134,
135, 143, 148, 150, 155
anticipation, 74
ANUSPLIN, 33, 44, 45, 82
Appalaches, 19, 24, 116, 131
Arctique, 36, 54
Atlas des amphibiens et des reptiles du Québec, 63, 65, 68,
84, 85
Atlas des oiseaux nicheurs du Québec, 65
attribution, 58, 60, 69-71, 135
AUC, 85-87, 95, 97

B

barrière géographique, 30, 110
besoin énergétique, 52

bien-être humain, 33-35, 157
 biodiversité
 à l'équilibre, 37
 crise de la –, 1, 12, 25
 excédent de –, 108
 inventaire, 13
 programme de suivi de la –, 64, 134
 remaniement de la –, 114
 biomasse, 12, 14, 28, 34
 biome, 163, 164
 BIOMOD, 84, 148, 166
 bordure
 effet de –, 129-132, 138-140, 132
 Bouclier canadien, 23-25
 Breeding Bird Survey, 66, 85

C

calcicole, 25, 37
 calcifuge, 25
 Canards Illimités Canada, ix, xv, xvi, 39, 148
 capital écologique, 34
 changements climatiques
 biologie des –, 2, 3, 67
 classification climatique de Köppen-Geiger, 32, 34, 157
 colinéarité, 87
 colonisation
 européenne, 27
 postglaciaire, 25, 52, 78, 121
 communauté, 3, 12, 13, 26, 33, 37, 42, 60, 61, 64, 76, 78,
 79, 95, 114, 118, 122, 123, 128, 134, 138, 143, 164
 compétition, 28, 29, 59, 78, 150
 conditions initiales, 43, 49, 51
 connectivité, 124, 127-132, 134, 140, 150
 consensus
 analyse de –, 91
 mesure de –, 53, 90, 158
 conservation
 biologie de la –, 125, 128
 Conservation de la nature Canada, ix, xvi, 39, 148
 consortium Ouranos, ix, x, xv, xvi, xviii, 46-48, 135, 146,
 148, 152-154, 158, 164
 contraction, 53, 93, 102, 103, 105, 107, 109,
 Convention sur la diversité biologique, 13, 38
 cordillère arctique, 21, 38
 corrélation, 58, 60, 74, 75, 91
 courbe de réponse, 84
 crédibilité scientifique, xii, 58, 146, 147

D

date
 de floraison, 62, 63
 de premier chant, 66, 68
 débourement, 61
 déglaciation, 27

degrés-jours de croissance, 36, 38, 39, 51, 54, 56, 69, 82
 déplacement
 amplitude de –, 109
 avec contraction, 105, 107
 avec expansion, 105, 107
 direction de –, 103
 latitudinal, 56, 100
 net, 106, 107
 vitesse de –, 101, 107
 dérive des continents, 17
 désynchronisation, 70
 détection, 58, 60, 64, 65, 69-71, 141
 développement larvaire, 56
 dispersion
 capacité de –, 14, 17, 20, 22, 25, 29, 68, 72, 74, 76, 78,
 80, 96, 100, 103, 110
 domaine bioclimatique, 21, 118

E

échantillonnage, 24, 30, 69, 83-86, 88-90, 97, 102, 104,
 105, 107
 échelle spatiale, 21, 28, 29, 119, 129
 réduction, 44, 49-51
 régionale, 43, 129, 136
 écologique
 dette –, 34
 empreinte –, 27
 intégrité –, 4, 39, 143, 161
 surveillance –, 39, 62, 76, 134
 économie, 4-6, 12, 27, 39, 41, 43, 44, 68, 83, 84, 121,
 123, 124, 132, 134, 136, 138, 140, 160
 écosystème
 déséquilibre, 123
 fonctionnement, 3, 14, 59, 69, 70, 111, 141
 énergie fossile, 43, 34
 envahissement, 134, 135
 épidémie d'insectes, 70
 équilibre, 36, 37, 43, 58, 76, 77, 100, 119
 espèce
 à statut précaire, 4, 35, 36, 84, 85, 134, 135, 148, 150
 clé, 14, 16, 134
 endémique, 13
 exotique, 5, 28, 77, 130, 140, 144, 145
 introduite, 134, 135
 menacée, 36, 39, 135, 166
 rare, 16, 76
 vulnérable, 37
 essence forestière, 4, 83
 étendue spatiale, 81, 82
 éthique, 122, 127, 130, 133, 158
 Étude des populations d'oiseaux du Québec, 63-67, 71,
 84, 85
 évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 31, 33, 160
 expansion, 68, 93, 102-104, 106, 107, 109, 123, 154, 159,
 160, 164
 exposition, 28, 80, 120

extinction, 12, 35-37, 39, 70, 110, 129, 132, 135, 136, 138, 140, 144, 152, 160, 166
 dette d'–, 35, 37
 différée, 35, 103
 extirpation, 93, 103-105, 109

F

facilitation, 28
 facteur
 écologique, 28, 29
 limitant, 58
 Fondation de la faune Québec, 39
 forçage radiatif, 36
 foresterie, 4, 27, 33, 135
 forêt boréale, 23, 53, 54, 94
 forêt septentrionale, 38
 forêt tempérée de l'Est, 38
 fragmentation, 110, 131, 161, 162
 front
 de colonisation, 100, 108
 de décolonisation, 101, 108

G

gaz à effet de serre, 1, 3, 36, 40, 43, 44, 48-51, 88, 129, 125
 gestion adaptative, 120, 138, 141
 glaciation
 dernière –, 12
 glycérol, 52, 53
 Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 1, 3, 40, 42-44, 50

H-I

holocène, 78
 immigration, 37, 81, 93, 103, 104, 106, 109, 110, 135, 157
 immigration
 crédit d'–, 37
 incertitude, 13, 43, 49-51, 55-57, 89, 90, 101
 indice
 de dissimilarité de Jaccard, 114, 118, 120
 de vulnérabilité, 80
 industrialisation, 27
 industrie, 4, 23, 27, 160
 Institut québécois de la biodiversité, 39
 interaction biotique, 28-30, 59, 78
 interpolation spatiale, 45, 159
 introduction d'espèces, 33, 136
 isotherme, 53, 54, 93

K-L

Kappa, 86-88, 98, 101
 Laurentides, 32, 116
 législation, 36, 62
 limite nordique, 17, 28, 52, 54, 58, 68, 70, 86, 101, 103, 106, 108, 109, 137
 logiciel R, 84
 loi d'Arrhenius, 62
 lutte biologique, 59

M

marcottage, 56
 mésadaptation, 122
 mesures
 d'adaptation, 120, 124, 125, 129, 132, 141, 145, 153
 d'atténuation, 38
 métabolisme, 25, 52, 54, 62
 microclimat, 28
 microévolution, 61
 migration, 12, 13, 25, 53, 54, 64, 69, 107, 108, 127, 132-137, 140, 142, 150, 152, 156, 160-162, 164, 166, 167
 assistée, 127, 132-137, 140, 142, 150, 160
 modèle climatique
 global, 40, 42-46, 48, 49, 51, 88
 régional, 41, 45, 46
 mondialisation, 28
 morale, 6, 7, 122
 mutualisme, 28, 59

N-O

niche
 climatique, 30, 75, 88, 89, 92-95, 98-103, 105, 106, 109, 110, 118, 125, 127, 128, 130, 132, 137, 138, 142, 144, 152
 écologique, 12, 29-31, 74, 101
 fondamentale, 29
 modèle de –, 74-78, 80, 81-88, 90, 93
 nordicité, 12, 13, 52
 Organisation météorologique mondiale, 44
 Ouranos, ix, x, xv, xvi, xviii, 46-48, 135, 146, 148, 152-154, 158, 164

P

paradigme, 31, 121, 127, 130
 paradoxe de la biodiversité nordique, 118, 123, 144
 parasite, 31, 134, 144
 parc national, 4, 38, 39, 143, 152
 pathogène, 152
 patrimoine naturel, xii, xvi, 7, 36, 41, 58, 76, 85, 131, 145, 148, 155
 performance prédictive, 86-88, 91

pergélisol, 21, 23, 36, 59, 61, 70, 123
 période de référence, 33, 46, 48, 51, 87, 88, 93, 94, 102, 104, 105, 107, 113, 114, 118
 perte d'habitat, 33
 perturbation anthropique, 124, 129
 phénologie, 60-62, 66, 68-70, 76, 155
 photopériode, 65
 physiologie, 16, 52, 54, 58, 75, 77, 80, 133
 plaines d'Hudson, 21, 23, 38
 plasticité phénotypique, 61
 pollinisation, 14, 32, 33
 pollution, 33, 62
 prédation, 28, 59, 78, 129
 prédiction, 74
 pression de changement, 56, 93, 103, 105, 142, 144
 prévision, 88, 102, 120
 principe
 d'autonomie, 122
 d'humilité, 122
 de bienveillance, 122
 de diversité, 122
 de responsabilité, 122
 probabilité d'occurrence, 86, 91
 projection, xvi, 70, 74, 76-78, 83, 85, 87, 90, 92, 95, 153
 projection d'ensemble, 90

R

ravageur, 135
 Recensement des oiseaux de Noël, 66
 refuge climatique, 106, 138
 région écologique, 12, 16, 21, 23, 37, 38, 113, 116, 121, 131, 154
 région naturelle, 4, 21, 143, 144
 remontée nordique, 71
 répartition
 aire de –, xviii, 17, 19, 27, 60, 65, 68-70, 77, 80, 81, 94, 96, 97, 99, 100, 102, 104, 105, 121, 132, 136, 137
 boréale, 17
 disjointe, 17
 méditerranéenne, 105
 nordique, 17, 61, 60
 périphérique nord, 87
 subcosmopolite, 87
 repositionnement géographique, 93, 106
 représentativité, 39, 134, 143, 144
 résilience, 120
 résolution spatiale, 44-46, 48, 80, 81
 résolution spatiale
 horizontale, 33, 42, 46, 48, 51, 53, 55
 verticale, 42
 ressources naturelles, 4, 27, 33, 38, 40, 134, 136
 restauration, 39, 130, 140, 132
 révolution industrielle, 34
 richesse spécifique, 13, 19, 113, 114

S

Saint-Laurent
 basses terres du –, 23-25, 105, 102
 fleuve –, ix, xi, xv, xvi 19, 28, 36, 64, 93, 109, 110, 121, 127, 142, 148, 155, 164
 saisonnalité, 13, 43, 82
 science citoyenne, 74, 84
 sélection naturelle, 61
 sensibilité, 80, 101, 120, 164
 serpentine, 25
 service écologique, 1, 12, 31, 33-35, 157
 d'approvisionnement, 32
 de régulation, 32, 33
 de soutien, 32, 33
 ontogénique, 33
 socioculturel, 32, 33
shifting baseline, 134
 signature écologique des changements climatiques, 59, 61, 62, 70, 71
 Sommet de la Terre de Rio, 6, 13, 38
 stratégie d'adaptation, 127, 130
 structuration latitudinale, 12, 19
 substrat rocheux, 24, 25
 surexploitation, 33

T

taïga, 21, 23, 38, 68, 103
 taxonomie, 3
 topographie, 28, 44, 46, 74, 89
 tundra, 21, 32, 38, 68, 103, 123, 150
 tourbière, 70

U-V

urbanisation, 23, 62, 110, 129, 134
 validation croisée, 86, 89
 vecteur de maladie, 130
 vitesse climatique, 56, 58
 vision anthropocentrique, 123
 vision écocentrique, 123
 vulnérabilité, 3, 80, 84, 120, 140, 164

Z

zone de rusticité, 54



INDEX DES ESPÈCES

A

abeille domestique, 27
abies balsamea, 17
acer
 rubrum, 69
 saccharum, 69, 118, 121, 150
agrile du frêne, 135
agrilus planipennis, 135
alces alces, 27
anaxyrus americanus, 17
apis mellifera, 27
atalopedes campestris, 53

B

betula
 glandulosa, 68, 109, 103
 papyrifera, 69
bonasa umbellus, 27
bouleau
 blanc, 69
 glanduleux, 68, 109, 103

bruant
à couronne blanche, 52
chanteur, 92-103

C

camptorhynchus labradorius, 27
carcajou, 27
cardinal rouge, 71, 67
caribou, 4, 17, 27, 140, 150
de la Gaspésie, 4, 140
des bois, 17, 150
carpe allemande, 27
cassiope tetragona, 17
cassiope tétragone, 17
castor canadensis, 17
castor du Canada, 17
cathartes aura, 65
cerf de Virginie, 27, 58
chardonneret jaune, 52
chêne
blanc, 17
vert, 54
chevalier cuivré, 19
choristoneura fumiferana, 53
columba livia, 27
couleuvre tachetée, 17
crapaud d'Amérique, 17
cygne trompette, 19
cygnus buccinator, 19
cyprinus carpio, 27
cypripède tête-de-bélier, 19
cypripedium arietinum, 19

D

danaus plexippus, 53
dendroctone du pin, 136
dendroctonus ponderosae, 136
dicentra cucullaria, 62
dicentre capuchon-jaune, 62
dryade arctique, 17
dryas integrifolia, 17

E

ectopistes migratorius, 27
eider du Labrador, 27
épinette, 4, 17, 23, 54, 56, 68, 109, 102, 103
blanche, 23, 54, 68
noire, 4, 17, 23, 56, 68, 109, 102, 103
érable
à sucre, 69, 118, 121, 150
rouge, 69
étourneau sansonnet, 145

F

fagus grandifolia, 69
fraxinus pennsylvanica, 54
frêne de Pennsylvanie, 54

G

gélinotte huppée, 27
glaucomys volans, 53
grand pingouin, 27
grenouille des marais, 109, 102
gulo gulo, 27

H

herbe à la puce, 150
hêtre à grandes feuilles, 69
hyla versicolor, 17

I-J

iris versicolor, 105, 107
iris versicolore, 105, 107
ixodes scapularis, 144
junco ardoisé, 17
junco hyemalis, 17

L

lampropeltis triangulum, 17
larix occidentalis, 136
lepus arcticus, 17
lièvre arctique, 17
linnaea borealis, 105-107
linnée boréale, 105-107
lithobates palustris, 102, 109
lottia alveus, 27
lymantria dispar, 27, 53
lythrum salicaria, 27

M

martes americana, 17
martre d'Amérique, 17
mélèze de l'Ouest, 136
melospiza melodia, 93-103
mésange de Caroline, 102, 109
mitella nuda, 106, 107
mitrelle nue, 106, 107
moineau domestique, 27
monarque, 53
mouche domestique, 27

moxostoma hubbsi, 19
musca domestica, 27
myotis lucifugus, 53

O

odocoileus virginianus, 27, 58
oncorhynchus mykiss, 27
 orignal, 27
 ours noir, 27

P

passer domesticus, 27
 patelle des zostères, 27
peromyscus leucopus, 144, 160
 petit polatouche, 53
 petite chauve-souris brune, 53
 peuplier
 baumier, 23
 faux tremble, 23, 69
phragmites australis, 68
picea
 glauca, 23, 54, 68
 mariana, 23, 56
 pigeon biset, 27
 pin
 à écorce blanche, 136
 flexible, 136
 ponderosa, 136
 tordu latifolié, 136
pinguinus impennis, 27
pinus
 albicaulis, 136
 contorta, 136
 flexilis, 136
 ponderosa, 136
pipilo erythrophthalmus, 17
plantago major, 27
 plantain majeur, 27
 plectrophane des neiges, 17
plectrophenax nivalis, 17
poecile carolinensis, 109, 102
 polémoine de van-Brunt, 19
polemonium vanbruntiae, 19
populus
 balsamifera, 23
 tremuloides, 23, 69
pseudacris crucifer, 65, 68
pseudotsuga menziesii, 136

Q-R

quercus
 alba, 17
 ilex, 54

rainette
 crucifère, 65, 68
 versicolore, 17
rangifer tarandus caribou, 4, 17, 27, 140, 150
ranunculosa flabellaris, 17
regulus satrapa, 17
 renoncule à éventails, 17
 renouée japonaise, 69
 roitelet à couronne dorée, 17
 roseau commun, 68

S

sachem, 53
 salicaire pourpre, 27
salix chlorolepis, 19
salmo salar, 27
 sapin
 baumier, 17, 23
 de Douglas, 136
 saule à bractées vertes, 19
 saumon de l'Atlantique, 27
saxifraga gaspensis, 19
 saxifrage de Gaspésie, 19
 souris à pattes blanches, 144, 160
spinus tristis, 52
 spongieuse, 27, 53
sturnus vulgaris, 145

T

tique à pattes noires, 144
 tohi à flancs roux, 17
 tordeuse du bourgeon de l'épinette, 53
 tourte migratrice, 27
 trille
 blanc, 62
 rouge, 62
trillium
 erectum, 62
 grandiflorum, 62
 truite arc-en-ciel, 27
 tussilage pas-d'âne, 62
tussilago farfara, 62

U-V

ursus americanus, 27
 urubu à tête rouge, 65
valeriana uliginosa, 19
 valériane des tourbières, 19

Z

zonotrichia leucophrys, 52



CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET BIODIVERSITÉ DU QUÉBEC

VERS UN NOUVEAU PATRIMOINE NATUREL

Les changements climatiques sont une question environnementale majeure de ce siècle. Afin de comprendre et de prévoir leurs effets sur la biodiversité du Québec, des climatologues, des biologistes, des naturalistes et des gestionnaires de notre patrimoine naturel ont collaboré durant cinq années pour produire cet ouvrage.

Ils ont analysé les répartitions de près de 1 000 espèces d'animaux et de plantes et ont tenté d'anticiper les changements potentiels de ces répartitions pour la fin du XXI^e siècle. En utilisant des approches scientifiques parmi les plus perfectionnées ainsi que des modèles climatiques et des informations sur la biodiversité parmi les plus à jour, ils ont dressé un tableau saisissant des changements profonds qui sont anticipés sur le territoire québécois.

Les premiers chapitres présentent avec clarté le patrimoine naturel et les climats du Québec. Le lecteur est ensuite amené, à partir de résultats de modélisation publiés ici pour la première fois, à se projeter dans l'avenir pour entrevoir l'évolution du patrimoine naturel québécois. Les conséquences des recherches sur la gestion des espèces, des aires protégées et des écosystèmes sont enfin exposées.

Les biologistes, les naturalistes, les techniciens en écologie, les gestionnaires de la faune et des parcs, les ingénieurs et les techniciens forestiers, les professionnels et les militants de la conservation de la nature, les décideurs ainsi que les étudiants et enseignants en biologie trouveront tous dans ce livre matière à d'intenses réflexions. Les points à retenir sont résumés, des dizaines de cartes en couleur sont présentées et de multiples figures illustrent les messages importants. Un site Web fournit des milliers de cartes complémentaires et permet de télécharger toutes les figures du livre.

DOMINIQUE BERTEAUX, Ph. D., est professeur en écologie à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), où il est aussi titulaire de la Chaire de recherche du Canada en biodiversité nordique.

Il dirige depuis 2007 le projet CC-Bio, une vaste étude sur les effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec.

NICOLAS CASAJUS est professionnel de recherche à l'UQAR, où il assume les responsabilités de coordonnateur, de gestionnaire de bases de données et de modélisateur du projet CC-Bio.

SYLVIE DE BLOIS, Ph. D., est professeure au Département de sciences végétales et à l'École d'environnement de l'Université McGill. Elle a lancé avec Dominique Berteaux le projet CC-Bio et dirige le projet Changements climatiques et plantes envahissantes au Québec.

Ont également collaboré
Travis Logan et Catherine Périé

PUQ.CA

ISBN 978-2-7605-3950-1

