



Élaboration du portrait bioclimatique futur du Nunavik

**Tome I
Octobre 2017**

**Rapport produit pour le compte du Ministère des Forêts,
de la Faune et des Parcs**



INRS
UNIVERSITÉ DE RECHERCHE

Financé par

Fondsvert Québec  

Auteurs principaux :	Alain Mailhot, INRS-Eau, Terre et Environnement Diane Chaumont, Ouranos
Auteurs/collaborateurs:	Dominique Berteaux, UQAR Vincent Brodeur, MFFP Nicolas Casajus, UQAR Carl Barette, CEN/ArticNet Ross Brown, Ouranos Steeve Côté, Université Laval Emilia Diaconescu, INRS-Eau, Terre et Environnement Élyse Fournier, Ouranos Catherine Guay, IREQ Travis Logan, Ouranos Pascale Ropars, UQAR Benoît Tremblay, Consultant
Comité de suivi:	Michael Barett, ARK Maxime Bélanger, MERN Jean-François Bergeron, MFFP Frédéric Brassard, MSP Vincent Brodeur, MFFP Diane Frappier, MAMOT Jean-François Gravel, SHQ Anick Guimond, MTMDDET Éric Larrivée, MDDELCC Claude Morneau, MFFP Philippe Raymond, MFFP
Rapport présenté à :	Ministère de la forêt, de la faune et des parcs (MFFP)
Projet :	Élaboration du portrait climatique régional en climat futur en soutien à l'analyse des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques au Nunavik

Citation suggérée : Mailhot A. et Chaumont D. (2017). Élaboration du portrait bioclimatique futur du Nunavik – Tome I. Rapport présenté au Ministère de la forêt, de la faune et des parcs. Ouranos. 216 pages

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres. Toute utilisation ultérieure du document sera au seul risque de l'utilisateur sans la responsabilité ou la poursuite juridique des auteurs.

Remerciements

Les auteurs tiennent à souligner la contribution des équipes responsables de la production des simulations utilisées dans le cadre de ce projet, membres du *World Climate Research Programme's Working Group on Regional Climate*, et du *Working Group on Coupled Modelling*. Les auteurs tiennent également à remercier les équipes qui ont mis à disposition leurs résultats de simulation pour ce projet : l'ESCER de l'UQAM pour les simulations UQAM-CRCM5, l'équipe Simulations et Analyses climatiques d'Ouranos pour les simulations OURANOS-CRCM5 et Environnement et changement climatique Canada pour les simulations CCCma-CanRCM4. Les simulations SMHI-RCA4 et DMI-HIRHAM5 ont été téléchargées à partir du portail *Earth System Grid Federation Infrastructure*. Les séries des données aux stations utilisées dans l'évaluation des simulations climatiques proviennent des archives d'Environnement et changement climatique Canada et du ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Les réanalyses CFSR, MERRA, ERA-Interim, JRA55 et les données GMFD ont été obtenues du portail *NCEP Research Data Archive* (RDA). Les auteurs souhaitent remercier M. Blaise Gauvin St-Denis d'Ouranos pour le téléchargement des données et Mme Dominique Paquin d'Ouranos que nous avons consulté à titre d'experte pour certaines questions scientifiques.

Nos remerciements vont aussi aux organisations membres de la collaboration cQ2 soient la Direction de l'expertise hydrique (MDDELCC), Hydro-Québec (IREQ) et Rio Tinto qui ont produit et rendu disponibles les simulations hydrologiques présentées au chapitre 3.

Nous remercions également Claude Morneau et Jean Mercier de la Direction des inventaires forestiers (MFFP), Kim Damboise et Serge Payette de l'Herbier Louis-Marie de l'Université Laval ainsi que Maël Le Corre de l'Université Laval pour avoir fourni des données et aidé à la production de cartes des chapitres sur la végétation et la faune.

Nous soulignons le support financier d'ArcticNet à l'équipe du professeur Alain Mailhot et au groupe Scénarios et Services climatiques d'Ouranos au cours des dernières années. Ce support a facilité l'avancement de la science du climat en milieu arctique, science sur laquelle sont basés les scénarios climatiques présentés dans le document.

Les coûts relatifs aux travaux réalisés dans cette étude sont assumés par le Fonds vert dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec.

Sommaire exécutif

Les perturbations climatiques au Nunavik risquent d'être très intenses d'ici la fin du siècle. Il est primordial d'identifier les vulnérabilités et les impacts des changements engendrés par ces perturbations. Les décideurs pourront ainsi développer et mettre en œuvre des mesures d'adaptation aux changements climatiques. Une information climatique de qualité est nécessaire pour appuyer ce processus de développement des connaissances dans le contexte d'un climat changeant.

Ce rapport met à jour le portrait climatique récent et futur du Nunavik ainsi que ses sous-composantes hydroclimatiques et bioclimatiques. Une analyse d'impact des changements climatiques sur la végétation et la grande faune est aussi présentée. Les objectifs spécifiques du projet sont :

1. Revoir les données utilisées pour caractériser le climat passé récent du Nunavik;
2. Réaliser des scénarios climatiques sur le Nunavik et analyser l'ampleur des changements climatiques causés par l'augmentation des émissions de GES;
3. Produire des cartes et des tableaux pour des indicateurs climatiques spécifiques;
4. Mettre à jour les bioclimats du passé récent et calculer les bioclimats futurs et produire des cartes;
5. Réaliser des analyses des impacts de l'évolution des bioclimats sur la faune et la végétation du Nunavik;
6. Fournir l'hydrologie du passé récent et du futur développée dans le cadre du projet cQ2;
7. Proposer des recommandations sur les prochaines étapes.

Le rapport est divisé en deux tomes. Le tome I contient les éléments méthodologiques ainsi que les principaux résultats pour cinq thèmes : les scénarios climatiques (chapitre 2), les scénarios hydrologiques (chapitre 3), les bioclimats et leur évolution possible (chapitre 4), la végétation dans un climat changeant (chapitre 5) et la grande faune et son évolution possible (chapitre 6). Le tome I contient également le sommaire exécutif, l'introduction, la conclusion ainsi que les remerciements. Le tome II regroupe l'ensemble des résultats des chapitres 2 sous forme de cartes, de graphiques et de tableaux.

Les scénarios climatiques

Les deux principaux objectifs du volet scénarios climatiques sont, tout d'abord, de définir un climat de référence et, ensuite, de développer des scénarios du climat futurs aux horizons 2050 (2040-2064) et 2080 (2076-2100). Un total de 81 indicateurs climatiques, aux échelles annuelles et mensuelles, ont été définis et classés en trois groupes : les indicateurs associés aux températures (32 indicateurs), aux précipitations (19 indicateurs) et aux précipitations sous forme solide et au couvert de neige (30 indicateurs).

L'ensemble CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*) basé sur les versions les plus récentes des modèles régionaux de climat (MRC) a été utilisé pour établir les projections futures. Trois simulations produites par le groupe *Simulations et analyses climatiques* d'Ouranos ont été ajoutées à l'ensemble CORDEX (OURANOS-CRCM5v3331). Un total de 25 simulations a ainsi été considéré dont 9 couvrent la période historique (1950-2005), 16 la période future (2005-2100) dont sept utilisent le RCP 4.5 et neuf le RCP 8.5. Les *Representative Concentration Pathway* (RCP) représentent les différents scénarios futurs de forçage radiatif résultant de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le RCP 4.5 pose une hypothèse de stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre à la fin du siècle alors que le RCP 8.5 pose une hypothèse d'émissions fortes et soutenues.

Un scénario climatique est une combinaison de données représentatives du climat passé récent et de sorties de modèles climatiques. Considérant le très faible nombre de stations météorologiques au Nunavik, le climat représentatif du climat récent (ou climat de référence) utilisé ici repose sur le jeu de données *Global Meteorological Forcing Dataset for Land Surface Modelling* (GMFD), produit dans lequel on combine des données d'observations globales avec la réanalyse du *National Centers for Environmental Prediction–National Center for Atmospheric Research* (NCEP–NCAR). Ce produit a été sélectionné en comparant les valeurs des indicateurs climatiques estimées à partir de différents produits (réanalyses, modèles climatiques, etc.) aux valeurs correspondantes estimées à partir des séries enregistrées aux stations. La phase 1 du projet utilisait un climat de référence basé sur les quatre réanalyses suivantes : CFSR, ERA-Interim, JRA55 et MERRA. L'analyse subséquente de GMFD a montré une meilleure performance de ce dernier que l'ensemble des quatre réanalyses d'où l'intérêt de le retenir pour caractériser le climat de référence du Nunavik. Pour différentes raisons techniques, la période

de référence de la phase 1 (1981-2010) a aussi été modifiée, elle couvre maintenant la période 1980-2004 de 25 ans. La médiane d'ensemble des MRC a été retenue pour représenter le climat de référence pour les indicateurs associés aux précipitations sous forme solide et au couvert de neige considérant que ces variables ne sont pas disponibles pour les quatre réanalyses et pour GMFD.

Les scénarios développés dans le cadre de ce projet ont permis de montrer que, en moyenne sur l'ensemble du territoire à l'étude :

- les températures moyennes annuelles augmenteront de façon remarquable par rapport à la période de référence sur l'ensemble du territoire; les changements régionaux moyens à l'horizon 2076-2100 pour le scénario RCP 8.5 vont de 5,1 à 9,1 °C (médiane à 8,3 °C);
- les augmentations de température seront nettement plus marquées durant les mois d'hiver et ce peu importe la simulation considérée; ainsi les augmentations moyennes régionales pourront atteindre 13 à 14°C à l'horizon 2076-2100 pour le scénario RCP 8.5 au mois de février alors qu'elles seront de l'ordre de 6°C à 7°C pour les mois de juin, juillet et août;
- ce réchauffement aura des répercussions sur l'ensemble des indicateurs associés aux températures. Ainsi, pour le scénario RCP 8.5 à l'horizon 2076-2100:
 - le début de la saison sans gel sera plus hâtif et sa fin plus tardive et la durée de la saison sans gel augmentera de 66 jours (la moyenne régionale en climat de référence est de 111 jours);
 - le nombre annuel de jours avec gel-dégel diminuera de 6 jours (la moyenne régionale en climat de référence est de 63 jours);
 - le nombre annuel de degrés-jours (DJ) de dégel augmentera de 1160 DJ (la moyenne régionale en climat de référence est de 1098 DJ) et le nombre de degrés-jour de gel diminuera de 1873 DJ (la moyenne régionale en climat de référence est de 3201 DJ);
 - le début de la saison de croissance sera plus hâtif (29 jours) et la fin plus tardive (30 jours) résultant en une augmentation de la durée de la saison de croissance de 60 jours (la moyenne régionale en climat de référence est de 117 jours);
 - les degrés-jours de croissance augmenteront de 843 DJ (la moyenne régionale en climat de référence est de 488 DJ);

- les degrés-jours de chauffage diminueront de 2856 DJ (la moyenne régionale en climat de référence est de 6808 DJ);
- le nombre de jours chauds et de nuits chaudes augmentera de 60 et 63 respectivement (les moyennes régionales en climat de référence sont de 42 jours chauds et 9 nuits chaudes);
- le nombre de jours de gel et englacés diminuera de 68 et 58 jours respectivement (les moyennes régionales en climat de référence sont de 251 et 188 jours respectivement);
- les températures nocturnes minimales, diurnes minimales, nocturne maximale et diurne maximale augmenteront; les températures nocturnes et diurnes minimales seront les plus affectées avec des variations moyennes de +15,6 °C et 16,9 °C alors que les températures nocturnes et diurnes maximales connaîtront des augmentations de l'ordre de 5,6 °C à 5 °C.
- les précipitations annuelles moyennes augmenteront de façon très appréciable sur l'ensemble du territoire, la médiane des changements de la moyenne régionale à l'horizon 2076-2100 par rapport à la période de référence étant de 259 mm pour le scénario RCP 8.5 (la moyenne pour le climat de référence est 616 mm);
- les précipitations mensuelles augmenteront pour tous les mois avec des augmentations plus importantes durant les mois d'hiver. La médiane des changements pour le RCP 8.5 à l'horizon 2076-2100 atteint 71 mm pour déc-jan-fév comparativement à 51 mm pour juin-juil-aou. Les moyennes réciproques pour le climat de référence sont de 94 mm et 218 mm;
- les fractions de précipitations sous forme solide augmenteront durant la période de décembre à février alors qu'elles diminueront de façon très importante au mois d'octobre et dans une moindre mesure au mois de septembre et novembre;
- les précipitations maximales annuelles sur 1 jour et 5 jours augmenteront de 9.9 et 15 mm/jour alors que les valeurs en climat de référence sont respectivement de 33.3 et 53.3 mm/jour;
- les 95e et 99e percentiles des précipitations journalières augmenteront de 2.8 et 5.5 mm/jour alors que les valeurs en climat de référence sont respectivement de 8.7 et 18.6 mm/jour;
- les nombres annuels de jours de précipitations très intenses et extrêmes augmenteront de 6 et 2 jours respectivement (les valeurs correspondantes en climat de référence sont de 5.5 et 1 jours);

- pour les indicateurs associés au couvert de neige (scénario RCP 8.5 à l’horizon 2076-2100) :
 - la date de début du couvert continu de neige est retardée de 32 jours alors que la date de fin du couvert continu de neige surviendra 29 jours plus tôt;
 - la durée du couvert de neige diminuera de 62 jours alors qu’elle est de 244 jours dans le climat de référence;
 - la hauteur de neige maximale diminuera de 10,2 cm alors que cette valeur est de 70,5 cm dans le climat de référence

Il est important de noter que, de façon générale, les variations des différents indicateurs à l’horizon 2040-2064 par rapport à la période de référence 1980-2004 diffèrent peu selon que l’on considère le RCP 4.5 ou 8.5. La différence entre les deux RCP est toutefois très marquée à l’horizon 2076-2100 avec des variations nettement plus importantes pour le RCP 8.5.

Les scénarios hydrologiques

Ce chapitre décrit brièvement la démarche menant à la production de scénarios hydrologiques futurs pour la région du Nunavik et présente les principaux résultats. Les données disponibles à cet effet proviennent de l’activité continue cQ2 réunissant Hydro-Québec (IREQ), la Direction de l’expertise hydrique (DEH, MDDELCC), Rio Tinto et Ouranos. La méthodologie utilisée pour produire les résultats est basée sur des simulations hydrologiques avec le modèle HSAMI étalonné spécifiquement pour la production de projections hydrologiques. Les scénarios climatiques alimentant HSAMI proviennent de l’ensemble CMIP5. Deux méthodes de post-traitement sont appliquées aux sorties des modèles climatiques afin de réduire les différences entre ces dernières et le climat plausible localement. Deux scénarios RCP (RCP4.5 et RCP8.5) sont représentés dans l’ensemble et deux horizons futurs sont couverts (2050 et 2080).

Les simulations hydrologiques permettent le calcul d’un signal de changement entre l’hydrologie de la période de référence et l’hydrologie future. Il est d’usage d’appliquer ce changement à l’hydrologie observée sur la période de référence afin d’obtenir une hydrologie future. Dans le cas du Nunavik, les chroniques de débits observés comportent des données manquantes et couvrent rarement toute la période de référence. Pour pallier ce problème, une hydrologie reconstituée sur la période de référence est simulée avec, pour intrants, des observations météorologiques. C’est à cette hydrologie

reconstituée qu'est appliqué le signal de changement hydrologique permettant de produire des scénarios hydrologiques.

Une quantité importante de scénarios hydrologiques, tous considérés équiprobables, a été développée pour chaque bassin versant. Afin de simplifier la présentation des résultats, les 25^e, 50^e et 75^e percentiles des valeurs de changements sont présentés. Les reconstitutions hydrologiques ainsi que les scénarios hydrologiques futurs développés sur le Nunavik se résument ainsi:

- le débit annuel moyen et le débit de crue moyen varient grandement entre les bassins versants du Nunavik puisque la superficie des bassins versants est hautement variable. Les débits spécifiques (rapportés au kilomètre carré) permettent la comparaison interbassin : le débit annuel moyen spécifique varie de 0.0104 m³s-1/km² à 0.0191 m³s-1/km² et le débit de crue moyen spécifique varie de 0.0204 m³s-1/km² à 0.0790 m³s-1/km²;
- l'hydrologie reconstituée suggère que la crue débute entre le 129^e et le 159^e jour de l'année;
- les scénarios hydrologiques indiquent qu'il est très probable que le débit annuel moyen et le débit moyen de crue augmenteront dans le futur, et ce, pour tous les bassins versants à l'étude. Les augmentations projetées varient d'un bassin à l'autre et elles sont plus prononcées à l'horizon 2080 et avec le RCP8.5. À titre indicatif, les changements relatifs médians du débit annuel moyen pour l'horizon 2080 et le RCP8.5 se situent entre 26 % (rivière George) et 49 % (rivière Arnaud). Pour les débits de crue, les changements relatifs de la médiane varient entre 19 % (rivière False) et 46 % (Grande rivière de la Baleine) (horizon 2080, RCP8.5);
- les résultats suggèrent un devancement très probable de la crue sauf pour le 75^e percentile sur la Grande Rivière de la Baleine. Sur l'horizon 2080 et le RCP8.5, le devancement médian varie de 11 jours sur la Grande rivière de la Baleine à 23 jours sur la rivière Arnaud;

Les bioclimats et leur évolution possible

Ce chapitre porte sur la mise à jour de la carte des bioclimats du passé récent avec le produit climatique GMFD ainsi que la cartographie des bioclimats futurs pour les RCP4.5 et RCP8.5 et pour deux horizons temporels, 2040-2064 et 2076-2100. Les écarts obtenus entre la période de référence et la période future de l'ensemble climatique CORDEX sont combinés au produit GMFD pour obtenir la classification des bioclimats dans le futur. Deux types de

combinaisons sont effectués : l'une pour le scénario moyen et l'autre pour les scénarios supérieur et inférieur. Pour le scénario moyen, les valeurs des indicateurs bioclimatiques futurs pour chaque simulation de l'ensemble sont moyennées à chaque point de grille et classées afin d'obtenir la carte des bioclimats. Pour les scénarios supérieur et inférieur, la simulation obtenant la plus petite distance euclidienne standardisée avec l'écart minimal global est sélectionnée pour la classification. L'écart minimal global est une valeur artificielle, il correspond à l'écart minimal pour les trois indicateurs bioclimatiques. Les valeurs qui le constituent peuvent provenir de simulations différentes.

La carte des bioclimats actuels du Nunavik basée sur GMFD contient sept bioclimats distincts. Les classes de température polaire et subpolaire froide sont présentes sur le territoire, la classe polaire étant située plus au nord et dans la région des monts Torngat. La classe de saison de croissance courte couvre la majorité du territoire. La classe de saison de croissance très courte est observée à l'extrême nord et dans la région des monts Torngat alors que la classe de saison de croissance moyenne est observée au sud-ouest de la région du Nunavik. La classe de précipitation modérée couvre la majorité du territoire. La classe de précipitation semi-aride est présente à l'extrême nord alors que la classe subhumide est présente dans l'extrême sud-est.

Le portrait des bioclimats futurs couvre 24 bioclimats distincts. Ceux-ci varient selon le scénario RCP, selon l'horizon temporel et selon le scénario climatique étudié : moyen, supérieur ou inférieur. Toutefois, il ressort clairement que l'augmentation des températures et des précipitations du Nunavik entraînera une modification de la répartition des classes bioclimatiques. Notamment :

- il est probable que la classe de température polaire disparaisse;
- il est extrêmement probable que la classe de température subpolaire fasse son apparition et il est probable que la classe de température subpolaire douce émerge aussi;
- il est peu probable que la classe de température modérée apparaisse;
- il est extrêmement probable que la classe de saison de croissance longue fasse son apparition alors qu'il est peu probable que la classe très longue émerge;
- finalement, il est extrêmement probable que la classe de précipitation semi-aride disparaisse.

La végétation dans un climat changeant

Au Nunavik, il apparaît peu probable qu'on assiste à une remontée significative de la limite latitudinale des arbres d'ici 2100, malgré de possibles réponses locales rapides et spectaculaires. C'est probablement plus au sud, au niveau des limites des arbres altitudinales de la toundra forestière, que se produiront les réponses les plus fortes. L'évolution des forêts du Haut-Boréal dans les décennies à venir est incertaine et implique une gamme étendue de facteurs biotiques et abiotiques; tous plus ou moins étroitement gouvernés par le climat. Il demeure probable qu'on assiste à une densification et une expansion des forêts, pourvu qu'il n'y ait pas de stress hydrique important durant la saison de croissance. Une telle expansion des forêts se soldera par une augmentation de l'étendue du domaine bioclimatique de la pessière à lichens au détriment de celui de la toundra forestière.

Une expansion majeure des arbustes érigés sera vraisemblablement la principale réponse de la toundra arctique face aux changements climatiques. La conséquence sera donc une hausse des superficies occupées par la toundra à arbustes érigés au détriment de celles occupées par la toundra à arbustes rampants. Ce sont surtout les sites aux conditions édaphiques et topographiques favorables tels que les portions inférieures des versants et le fond des vallées qui devraient subir le gros du verdissement et de l'arbustification. De grandes portions du Nunavik sont dépourvues ou presque de dépôts meubles et ne devraient donc pas voir de changement significatif du couvert végétal. Le rôle que joueront les grands herbivores au sein des environnements subarctiques et arctiques soumis à des conditions climatiques changeantes dépendra de leur évolution démographique, à savoir si les troupeaux de caribous reprennent de l'ampleur et si la population de bœuf musqué maintient sa tendance à la hausse.

Les impacts des changements climatiques toucheront vraisemblablement davantage l'abondance relative des espèces sur le territoire et la productivité que la biodiversité. La qualité des sites de cueillette de petits fruits, une activité de grande importance culturelle et alimentaire pour les Inuits du Nunavik, pourrait être mise en péril par une expansion généralisée des arbustes érigés au détriment des arbustes rampants producteurs de petits fruits. De plus, il faut s'attendre à l'arrivée d'espèces introduites (actuellement rares et peu abondantes sur le territoire) qui trouveront des niches climatiques nouvellement favorables. Parmi les six types d'écosystèmes exceptionnels du

Nunavik, ce sont les forêts feuillues subarctiques qui risquent de répondre le plus, via une augmentation de la croissance radiale et en hauteur des individus de même que par une expansion là où le contexte environnant le permet.

La grande faune et son évolution possible

Le caribou migrateur est une espèce clé du Nunavik, tant pour le rôle central qu'il joue dans les écosystèmes qui le supportent que pour l'importance culturelle et socioéconomique qu'il occupe dans les communautés autochtones du nord. Dans une vision de conservation des écosystèmes naturels comme celle dont s'est doté le Québec, il devient primordial de mieux cerner les changements potentiels que subiront les troupeaux du Nunavik. Nous proposons donc de projeter l'aire de répartition potentielle de cette espèce jusqu'au tournant du 21^e siècle et de discuter des impacts éventuels de différents facteurs biotiques et abiotiques sur la dynamique des populations de caribous migrants du Nunavik, en s'intéressant particulièrement au troupeau de la rivière aux Feuilles (TRF).

Pour ce faire, nous avons réalisé un exercice de modélisation de niche climatique, exercice nous ayant permis d'utiliser les corrélations entre le climat et la répartition actuelle de l'espèce pour projeter l'enveloppe des conditions climatiques qui lui seront favorables dans un horizon temporel donné. Cet exercice a été réalisé pour le caribou migrateur, mais également pour ses principaux prédateurs. Nous avons par la suite mis en relation ces résultats avec les nombreuses connaissances de la biologie et de l'écologie du cervidé.

Nous avons d'abord montré que l'enveloppe des conditions climatiques favorables au caribou migrateur du TRF devrait diminuer au cours du 21^e siècle, et ce, pour toutes les saisons. Bien que ceci ne se traduise pas nécessairement par une diminution réelle de l'aire de répartition du troupeau, il suggère que les changements climatiques prévus induiront une pression négative sur les individus du TRF. De plus, la modélisation de niche climatique prédit que l'enveloppe des conditions favorables aux populations de prédateurs du caribou migrateur devrait se maintenir et même augmenter, la pression de prédation serait donc elle aussi accrue. Deuxièmement, l'hypothèse dominante suggère que la taille des troupeaux de caribous migrants suit un cycle naturel s'échelonnant sur quelques décennies. Selon cette hypothèse, un retour à de fortes abondances du TRF est prévu à partir du milieu du siècle, et serait suivi par un déclin important. Les changements engendrés par le réchauffement climatique en cours et à prévoir pourraient cependant moduler

l'ampleur ou la durée de ces cycles. Entre autres, les changements du régime climatique pourraient permettre une plus forte abondance d'une ressource alimentaire importante du caribou migrateur, mais aussi accroître le harcèlement par les insectes piqueurs et influencer la diversité des parasites ayant des effets délétères sur le cervidé. Bien que la disponibilité des ressources sur les aires d'estivage soit un élément clé de la santé des troupeaux, l'effet net des changements climatiques sur cette espèce est difficile à prévoir de façon exacte. Ceci est d'autant plus vrai que les troupeaux de caribous migrants pourraient subir des pressions supplémentaires, notamment en raison du développement industriel du Québec nordique.

Afin de gérer durablement les populations de ce grand cervidé et d'en assurer un accès constant aux communautés autochtones qui en font une chasse de subsistance, l'ensemble des facteurs affectant la dynamique du caribou migrateur et dont nous avons discuté dans ce chapitre doit être considéré.

Conclusion et recommandations pour l'adaptation

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet ont permis de montrer que les changements climatiques modifieront de façon très significative le climat du Nunavik et ce tant en matière de température, de régimes de précipitations que de couvert de neige. On assistera globalement à un réchauffement important du climat du Nunavik aux horizons 2046-2060 et 2076-2100, ce qui se traduira par une modification importante de plusieurs indicateurs liés aux températures (p. ex. augmentation de la durée de saison de croissance, diminution des degrés-jours de chauffage). De même, les précipitations annuelles augmenteront à l'échelle de l'ensemble du territoire avec des augmentations plus marquées pendant les mois d'automne et d'hiver. La couverture de neige diminuera de façon globale entraînant une réduction de la durée du couvert de neige et son épaisseur maximale.

Ces modifications auront elles-mêmes des impacts importants sur le régime hydrologique. Notamment, le débit annuel moyen et le débit de crue moyen augmenteront alors que la crue printanière sera plus hâtive. L'augmentation des températures et des précipitations entraînera également une modification de la répartition des classes bioclimatiques. Les modifications climatiques affecteront l'abondance relative et la productivité des espèces végétales et offriront des conditions climatiques futures défavorables au caribou migrateur.

Il appert que l'évolution du climat s'ajoute comme facteur justifiant la poursuite du développement de connaissances sur la dynamique des

écosystèmes nordiques, leur taux de changement ainsi que leur diversité afin d'anticiper et d'évaluer les impacts cumulés de la combinaison des activités socio-économiques, des changements climatiques et du développement du territoire. Aussi, l'évolution des espèces indigènes et l'évaluation de leur potentiel à faire face à la compétition des espèces migrant vers le nord ou introduites et potentiellement mieux adaptées aux conditions climatiques changeantes devra être prise en compte pour appuyer les décisions de protection du territoire et de gestion des ressources.

Considérant l'importance des espèces aquatiques phares pour la sécurité alimentaire des peuples Cris et Inuits, des travaux de modélisation de la température des cours d'eau seraient pertinents afin de projeter les valeurs de température de l'eau dans un climat futur et de mieux en évaluer les impacts sur la faune aquatique.

Table des matières

Remerciements	iii
Sommaire exécutif.....	v
Table des matières.....	xvi
Liste des figures	xix
Liste des tableaux.....	xxvii
Chapitre 1 Introduction	1
1.1 Références.....	4
Chapitre 2 Les scénarios climatiques	5
2.1 Mise en contexte	6
2.2 Définitions et concepts de base	7
2.3 Indicateurs climatiques	11
2.4 Simulations climatiques.....	14
2.5 Climat de référence (1980-2004).....	16
2.6 Climat futur (2040-2064 et 2076-2100)	19
2.7 Résultats	22
2.8 Synthèse	33
2.9 Références.....	42
Chapitre 3 Les scénarios hydrologiques	43
3.1 Mise en contexte	44
3.2 Méthodologie	45
3.3 Résultats	54
3.4 Synthèse	66
3.5 Références.....	68

Chapitre 4	Les bioclimats et leur évolution possible	70
4.1	Mise en contexte	71
4.2	Méthodologie	72
4.3	Résultats	77
4.4	Synthèse	84
4.5	Références.....	85
Chapitre 5	La végétation dans un climat changeant : portrait et perspectives d'évolution	86
5.1	Mise en contexte	87
5.2	La végétation et les domaines bioclimatiques actuels du Nunavik.....	89
5.3	Dynamique spatio-temporelle de la végétation : scénarios possibles face à un climat changeant	114
5.4	Synthèse	148
5.5	Références.....	152
Chapitre 6	La grande faune et son évolution possible	163
6.1	Mise en contexte	164
6.2	Méthodologie	172
6.3	Modélisation des changements potentiels pour les horizons futurs ..	179
6.4	Impacts indirects des changements climatiques sur la répartition et l'abondance potentielles du caribou migrateur	187
6.5	Autres facteurs influençant la répartition et l'abondance futures du caribou migrateur	190
6.6	Impacts potentiels des changements d'abondance et de répartition du caribou migrateur	195
6.7	Synthèse	198
6.8	Références.....	200
Chapitre 7	Conclusion.....	210

7.1	Recommandations pour les études de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptation	212
7.2	Travaux futurs	213

Liste des figures

Figure 1-1	Topographie du nord du Québec.....	1
Figure 2-1	Évolution du forçage radiatif durant la période 2000-2100 selon les différents scénarios RCP (RCP 2.6 : courbe vert; RCP 4.5 : courbe rouge; RCP 6.0 : courbe noire; RCP 8.5 : courbe bleue). Figure tirée de van Vuuren et al. (2011).	8
Figure 2-2	Domaine des simulations CORDEX – Nord Amérique (NA-CORDEX), OURANOS-CRCM5v3331 (OURANOS) et UQAM-CRCM5v333 (UQAM).	15
Figure 2-3	Stations utilisées dans l'évaluation des produits sur grille pour les indicateurs associés : a) aux températures; b) aux précipitations totales; c) à la neige au sol et d) aux précipitations sous forme solide.	17
Figure 2-4	Diagramme de dispersion des écarts absolus entre les températures moyennes annuelles (en abscisse) et des écarts relatifs pour les précipitations moyennes annuelles projetés à l'horizon 2050 moyennés sur l'ensemble du Québec par rapport à la période 1980-2004. Le diagramme le long de l'abscisse présente les distributions des écarts absolus des températures à l'horizon 2050 pour les simulations CMIP5 – RCP4.5 (tirets rouges), les simulations CMIP5 – RCP8.5 (tirets bleus) et les simulations CORDEX RCP4.5 et RCP8.5 (lignes noires). Le diagramme le long de l'axe des ordonnées présente les distributions correspondantes pour les écarts relatifs des précipitations moyennes annuelles à l'horizon 2050.....	20
Figure 2-5	Diagramme de dispersion des écarts absolus entre les températures moyennes annuelles (en abscisse) et des écarts relatifs pour les précipitations moyennes annuelles projetés à l'horizon 2080 moyennés sur l'ensemble du Québec par rapport à la période 1980-2004. Le diagramme le long de l'abscisse présente les distributions des écarts absolus des températures à l'horizon 2080 pour les simulations CMIP5 – RCP4.5 (tirets rouges), les simulations CMIP5 – RCP8.5 (tirets bleus) et les simulations CORDEX RCP4.5 et RCP8.5 (lignes noires). Le	

diagramme le long de l'axe des ordonnées présente les distributions correspondantes pour les écarts relatifs des précipitations moyennes annuelles à l'horizon 2080.....	21
Figure 2-6 Diagramme en violon pour les indicateurs climatiques : a) température moyenne annuelle et b) durée du couvert de neige. L'ensemble utilisé pour représenter le climat de référence (GMFD pour la température moyenne annuelle et la moyenne d'ensemble des MRC – Ensemble MRC - pour la durée du couvert de neige) est indiqué sous chacun des diagrammes. La valeur moyenne de l'indicateur climatique pour l'ensemble des stations est indiquée dans la partie supérieure de chacun des diagrammes.....	23
Figure 2-7 Cartes de la température moyenne annuelle pour le climat de référence (en haut à gauche) et pour l'horizon 2040-2064 selon le scénario RCP 4.5 (carte centrale en haut) et le scénario RCP 8.5 (carte centrale en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux scénarios supérieur et inférieur pour chacun des scénarios RCP. Le diagramme en violon présente les biais entre les valeurs aux stations et aux points de grille du climat de référence (voir la figure 2.6 pour une description détaillée des diagrammes en violon).	26
Figure 2-8 Cartes de la durée du couvert de neige pour le climat de référence (en haut à gauche) et pour l'horizon 2040-2064 selon le scénario RCP 4.5 (carte centrale en haut) et le scénario RCP 8.5 (carte centrale en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux scénarios supérieur et inférieur pour chacun des scénarios RCP. Le diagramme en violon présente les biais entre les valeurs aux stations et aux points de grille du climat de référence (voir la figure 2.6 pour une description détaillée des diagrammes en violon).	27
Figure 2-9 Carte des sites retenus (voir tableau 2.1).....	29
Figure 2-10 Évolution de la durée du couvert de neige au site Akulivik. Les lignes en tirets correspondent aux projections climatiques selon les scénarios RCP 4.5 (bleu) et RCP 8.5 (rouge) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs violet (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe de l'ensemble des simulations sur la période	

2006-2100. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations sur la période 1950-2005.	31
Figure 2-11 Évolution de la température moyenne annuelle au site Akulivik. Les lignes en tirets correspondent aux projections climatiques selon les scénarios RCP 4.5 (bleu) et RCP 8.5 (rouge) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs violet (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en gris correspond aux valeurs annuelles de GMFD utilisée pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations sur la période 1950-2005.	32
Figure 2-12 Boîtes à moustaches (box plot) des variations moyennes régionales des températures moyennes mensuelles pour la période : a) 2040-2064 et b) 2076-2100.	39
Figure 2-13 Boîtes à moustaches (box plot) des variations moyennes régionales des précipitations totales mensuelles pour la période : a) 2040-2064 et b) 2076-2100.	40
Figure 2-14 Boîtes à moustaches (box plot) des variations moyennes régionales des fractions mensuelles de précipitations sous forme de solide pour la période : a) 2040-2064 et b) 2076-2100.	41
Figure 3-1 Chaîne de modélisation hydroclimatique.....	45
Figure 3-2 Contours des bassins versants au nord du 55 ^e parallèle.....	46
Figure 3-3 Stations météorologiques utilisées pour la mise en place de la grille météo de Ressources Naturelles Canada. Figure tirée de Hutchinson et al. (2009)	48
Figure 3-4 Exemple de série de débits avec un fort pourcentage de données manquantes.....	49
Figure 3-5 Proportion des codes par bassin	50
Figure 3-6 Coefficients de Nash-Sutcliffe obtenus lors de la calibration d'HSAMI	52
Figure 3-7 Cartes du débit annuel moyen spécifique de référence (en bas à gauche) et pour l'horizon 2050 selon le scénario RCP 4.5 (milieu et droite en haut) et le scénario RCP 8.5 (milieu et droite en bas). Les	

deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux 75 ^e et 25 ^e percentiles de l'ensemble pour chacun des scénarios RCP.	60
Figure 3-8 Cartes du débit annuel moyen spécifique de référence (en bas à gauche) et pour l'horizon 2080 selon le scénario RCP 4.5 (milieu et droite en haut) et le scénario RCP 8.5 (milieu et droite en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux 75 ^e et 25 ^e percentiles de l'ensemble pour chacun des scénarios RCP.	61
Figure 3-9 Cartes du débit de crue moyen spécifique de référence (en bas à gauche) et pour l'horizon 2050 selon le scénario RCP 4.5 (milieu et droite en haut) et le scénario RCP 8.5 (milieu et droite en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux 75 ^e et 25 ^e percentiles de l'ensemble pour chacun des scénarios RCP.	62
Figure 3-10 Cartes du débit de crue moyen spécifique de référence (en bas à gauche) et pour l'horizon 2080 selon le scénario RCP 4.5 (milieu et droite en haut) et le scénario RCP 8.5 (milieu et droite en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux 75 ^e et 25 ^e percentiles de l'ensemble pour chacun des scénarios RCP.	63
Figure 3-11 Cartes du jour de début de crue de référence (en bas à gauche) et pour l'horizon 2050 selon le scénario RCP 4.5 (milieu et droite en haut) et le scénario RCP 8.5 (milieu et droite en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux 75 ^e et 25 ^e percentiles de l'ensemble pour chacun des scénarios RCP.	64
Figure 3-12 Cartes du jour de début de crue de référence (en bas à gauche) et pour l'horizon 2080 selon le scénario RCP 4.5 (milieu et droite en haut) et le scénario RCP 8.5 (milieu et droite en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux 75 ^e et 25 ^e percentiles de l'ensemble pour chacun des scénarios RCP.	65
Figure 4-1 Classification des bioclimats, calculée à partir des moyennes climatiques de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFRS, JRA55, MERRA)	

sur une grille de 50 km. La classification suit les critères établis par Litynski tels que présentés dans Gerardin et McKenney (2001). (Tirée de Charron (2015)) 73

Figure 4-2 Agencement des cartes de bioclimat du passé récent (A) et de leur évolution dans le futur (B,C et D). La carte B présente le portrait futur moyen alors que les cartes C et D présentent les scénarios supérieurs et inférieurs respectivement. Quatre agencements de ce genre sont créés pour présenter les deux scénarios de gaz à effet de serre avec les deux horizons temporels. 76

Figure 4-3 Carte des bioclimats du passé récent (carte de gauche) et leurs évolutions futures (cartes du milieu et de droite) pour le scénario de gaz à effet de serre RCP4.5 à l'horizon 2040-2064. Toutes les cartes sont obtenues en utilisant la classification de Litynski (1988) telle que décrite dans Gerardin et McKenney (2001). La carte des bioclimats du passé récent se base sur le produit climatique GMFD. Les cartes d'évolution future se basent sur une combinaison du produit climatique GMFD et des projections climatiques de l'ensemble CORDEX. La carte du milieu présente le scénario futur moyen alors que les cartes de droite présentent les scénarios futurs supérieur et inférieur. 80

Figure 4-4 Carte des bioclimats du passé récent (carte de gauche) et leurs évolutions futures (cartes du milieu et de droite) pour le scénario de gaz à effet de serre RCP4.5 à l'horizon 2076-2100. Toutes les cartes sont obtenues en utilisant la classification de Litynski (1988) telle que décrite dans Gerardin et McKenney (2001). La carte des bioclimats du passé récent se base sur le produit climatique GMFD. Les cartes d'évolution future se basent sur une combinaison du produit climatique GMFD et des projections climatiques de l'ensemble CORDEX. La carte du milieu présente le scénario futur moyen alors que les cartes de droite présentent les scénarios futurs supérieur et inférieur. 81

Figure 4-5 Carte des bioclimats du passé récent (carte de gauche) et leurs évolutions futures (cartes du milieu et de droite) pour le scénario de gaz à effet de serre RCP8.5 à l'horizon 2040-2064. Toutes les cartes sont obtenues en utilisant la classification de Litynski (1988) telle que décrite dans Gerardin et McKenney (2001). La carte des

bioclimats du passé récent se base sur le produit climatique GMFD. Les cartes d'évolution future se basent sur une combinaison du produit climatique GMFD et des projections climatiques de l'ensemble CORDEX. La carte du milieu présente le scénario futur moyen alors que les cartes de droite présentent les scénarios futurs supérieur et inférieur. 82

Figure 4-6 Carte des bioclimats du passé récent (carte de gauche) et leurs évolutions futures (cartes du milieu et de gauche) pour le scénario de gaz à effet de serre RCP8.5 à l'horizon 2076-2100. Toutes les cartes sont obtenues en utilisant la classification de Litynski (1988) telle que décrite dans Gerardin et McKenney (2001). La carte des bioclimats du passé récent se base sur le produit climatique GMFD. Les cartes d'évolution future se basent sur une combinaison du produit climatique GMFD et des projections climatiques de l'ensemble CORDEX. La carte du milieu présente le scénario futur moyen alors que les cartes de droite présentent les scénarios futurs supérieur et inférieur. 83

Figure 6-1 (a) Le caribou migrateur est une espèce emblématique du Nunavik, spécialement pour ses habitants qui le (b, c) représentent dans leur art, (d) le chassent et (e) l'utilisent comme support pour sculpter. Crédits photos : (a) Alamy photography (www.alamy.com), (b) Musée canadien de l'histoire, représentation d'un caribou sur ivoire, baie d'Hudson, (c) Musée RISD, œuvre de l'artiste inuit Tivi Etok, « Dogs in trouble with a caribou », 1974, Nunavik, (d) Staffant Widstrand, WWF et (e) Galerie Invaluable (www.invaluable.com), sculpture sur bois de l'artiste Tivi Etok, Nunavik..... 165

Figure 6-2 Aires de répartition annuelles des caribous des troupeaux de la rivière aux Feuilles (TRF; vert) et de la rivière George (TRG; rouge). Les traits pointillés représentent la situation en 1993, tandis que les traits pleins représentent celle de 2011. Figure tirée de Le Corre (2016). 166

Figure 6-3 Taille des troupeaux de la rivière aux Feuilles (TRF) et de la rivière George (TRG) évaluée à partir des inventaires du gouvernement du Québec entre 1963 et 2016. L'intervalle de confiance (IC) n'est pas disponible pour les estimations antérieures à 1980, et ce, pour les deux troupeaux. Il est à noter que les IC pour le TRG en 2012, 2014 et

2016 sont trop petits pour être visibles sur la figure. L'estimation du TRF de 2001 (point blanc) correspond à la limite inférieure de l'IC (628 000 caribous).....	167
Figure 6-4 Représentation simplifiée du réseau trophique du Nunavik, Québec. Les liens prédateurs-proies sont représentés par une ligne reliant deux espèces ou groupes d'espèces. Les lignes plus foncées unissent le caribou migrateur à ses principaux prédateurs ainsi que sa source de nourriture.	170
Figure 6-5 Schématisation des étapes nécessaires à l'élaboration d'un modèle de niche climatique et à la projection de la répartition potentielle future d'une espèce. Les étapes pour la modélisation future doivent être répétées pour chacun des scénarios climatiques (10), pour chacun des horizons (2) ainsi que pour chacune des saisons (4). Le schéma a été modifié à partir de celui présenté dans Berteaux et al. 2014.	175
Figure 6-6 Modélisation de la répartition pour la période de référence (à gauche) et potentielle future du caribou du troupeau de la rivière aux Feuilles pour les horizons 2041-2070 (au centre) et 2071-2100 (à droite), en fonction de la saison. Les projections présentées ici sont basées sur les résultats obtenus en utilisant le scénario optimiste d'émission de gaz à effets de serre (RCP 4.5).	180
Figure 6-7 Scénarios potentiels d'abondance du troupeau de caribous migrants de la rivière aux Feuilles. Les scénarios 60 et 80 ans correspondent à la longueur des cycles d'abondance, tandis que le scénario récolte correspond à une régulation hypothétique de l'abondance par la récolte pendant la période de croissance du cycle de 60 ans.	183
Figure 6-8 Modélisation de la répartition actuelle (1981-2010) et potentielle future (2041-2070 et 2071-2100) de l'ours noir au Québec nordique, sous le scénario pessimiste (RCP 8.5). Les gains (bleu) et les pertes (orange) dans l'aire de répartition de l'ours noir pour les horizons futurs sont exprimés en fonction de la période de référence....	186
Figure 6-9 Chevauchement entre les aires de répartition du bœuf musqué et du caribou migrateur du troupeau de la rivière aux Feuilles. Les rectangles rouges correspondent aux localisations annuelles du	

caribou migrateur reportées sur une grille de 10 km x 10 km, tandis que les cercles blancs correspondent à des données d'observation de groupes de bœufs musqués (nombre d'individus par groupes, lorsqu'indiqué : 1 à 60). Toutes les données sont issues du suivi télémétrique effectué par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs en cours depuis 1994 pour le caribou migrateur, tandis que les données d'observations du bœuf musqué proviennent de différentes sources, mais sont colligées par le même ministère..... 192

Figure 6-10 Résultat potentiel de la compétition apparente entre le bœuf musqué, l'orignal et le caribou migrateur. Une augmentation potentielle des populations de bœufs musqués et d'orignaux au Nunavik (1) pourraient permettre de soutenir de plus grandes populations de loups gris et d'ours noirs (2). De ce fait, la pression de prédation subie par le caribou pourrait elle aussi augmenter, réduisant ainsi ses effectifs (3). 193

Liste des tableaux

Tableau 2-1	Nom, définition et unité des indicateurs climatiques associés aux températures	12
Tableau 2-2	Nom, définition et unité des indicateurs climatiques associés aux précipitations	13
Tableau 2-3	Nom, définition et unité des indicateurs climatiques associés aux précipitations sous forme solide et au couvert de neige	13
Tableau 2-4	Liste et caractéristiques des simulations retenues.....	15
Tableau 2-5	Liste des sites sélectionnés	30
Tableau 2-6	Médiane des moyennes spatiales des changements projetés pour les indicateurs associés aux températures pour les deux périodes futures et les deux scénarios RCP. Les moyennes spatiales des changements minimaux et maximaux sont indiquées entre parenthèses. Les moyennes spatiales des indicateurs pour le climat de référence (GMFD) sont également présentées. Toutes les valeurs portent sur l'ensemble du territoire.	36
Tableau 2-7	Médiane des moyennes spatiales des changements projetés pour les indicateurs associés aux précipitations pour les deux périodes futures et les deux scénarios RCP. Les moyennes spatiales des changements minimaux et maximaux sont indiquées entre parenthèses. Les moyennes spatiales des indicateurs pour le climat de référence (GMFD) sont également présentées. Toutes les valeurs portent sur l'ensemble du territoire.	37
Tableau 2-8	Médiane des moyennes spatiales des changements projetés pour les indicateurs associés aux précipitations sous forme solide et couvert de neige pour les deux périodes futures et les deux scénarios RCP. Les moyennes spatiales des changements minimaux et maximaux sont indiquées entre parenthèses. Les moyennes spatiales des indicateurs pour le climat de référence (médiane de l'ensemble des MRC) sont également présentées. Toutes les valeurs portent sur l'ensemble du territoire.	38

Tableau 3-1	Superficie des bassins versants	46
Tableau 3-2	Historique de débits observés des bassins versants.....	48
Tableau 3-3	Moyenne et écart-type des débits annuels moyens reconstitués pour la période de référence (1970-2000) et changements du débit annuel moyen projetés pour les 25 ^e , 50 ^e et 75 ^e percentiles de l'ensemble pour les RCP4.5 et RCP8.5 selon les horizons H50 et H80.	57
Tableau 3-4	Moyenne et écart-type des débits moyens de crue reconstitués pour la période de référence (1970-2000) et changements du débit de crue moyen projetés pour les 25 ^e , 50 ^e et 75 ^e percentiles de l'ensemble pour les RCP4.5 et RCP8.5 selon les horizons H50 et H80.	58
Tableau 3-5	Moyenne et écart-type du jour de début de la crue reconstitué pour la période de référence (1970-2000) et changements du jour de début de la crue projeté pour les 25 ^e , 50 ^e et 75 ^e percentiles de l'ensemble pour les RCP4.5 et RCP8.5 selon les horizons H50 et H80.	59
Tableau 4-1	Caractéristiques sommaires de la classification de Litynski (modifiée de Gerardin et McKenney 2001).....	74
Tableau 6-1	Variables bioclimatiques utilisées pour modéliser la répartition du troupeau de caribous migrants de la rivière aux Feuilles au Nunavik, Québec. Ces variables ont été dérivées à partir de trois variables de base : la température minimale et maximale de l'air et les précipitations totales.....	174
Tableau 6-2	Performance prédictive des modèles pour chacune des saisons selon deux métriques : le KAPPA et le <i>true skill statistic</i> (TSS). Les valeurs et métriques sont indiquées en gras lorsqu'elles atteignent le plus haut niveau de performance (> 0,80).....	179
Tableau 6-3	Importance des différentes variables climatiques pour la modélisation de niche de chacune des saisons. Plus l'importance d'une variable climatique s'approche de 1, plus le poids de cette dernière sera important dans la modélisation de l'aire de répartition du caribou migrant de la rivière aux Feuilles. La saisonnalité fait référence à la variation des précipitations et des températures mensuelles au cours de l'année. Plus la valeur est grande, plus les précipitations ou les	

températures fluctueront. L'écart diurne moyen des températures correspond à la moyenne des écarts mensuels des températures, tandis que les degrés-jours de croissance sont une mesure représentant l'accumulation de chaleur servant à estimer la durée d'un développement biologique..... 182

Chapitre 1 Introduction

Le Nunavik est le territoire québécois situé au nord du 55° parallèle. Sa topographie est marquée par les monts Torngat à l'est, à la limite du Labrador (figure 1-1). Bordé par la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava, le climat de type continental subit des influences côtières causant de fortes précipitations le long du littoral de la baie d'Hudson.

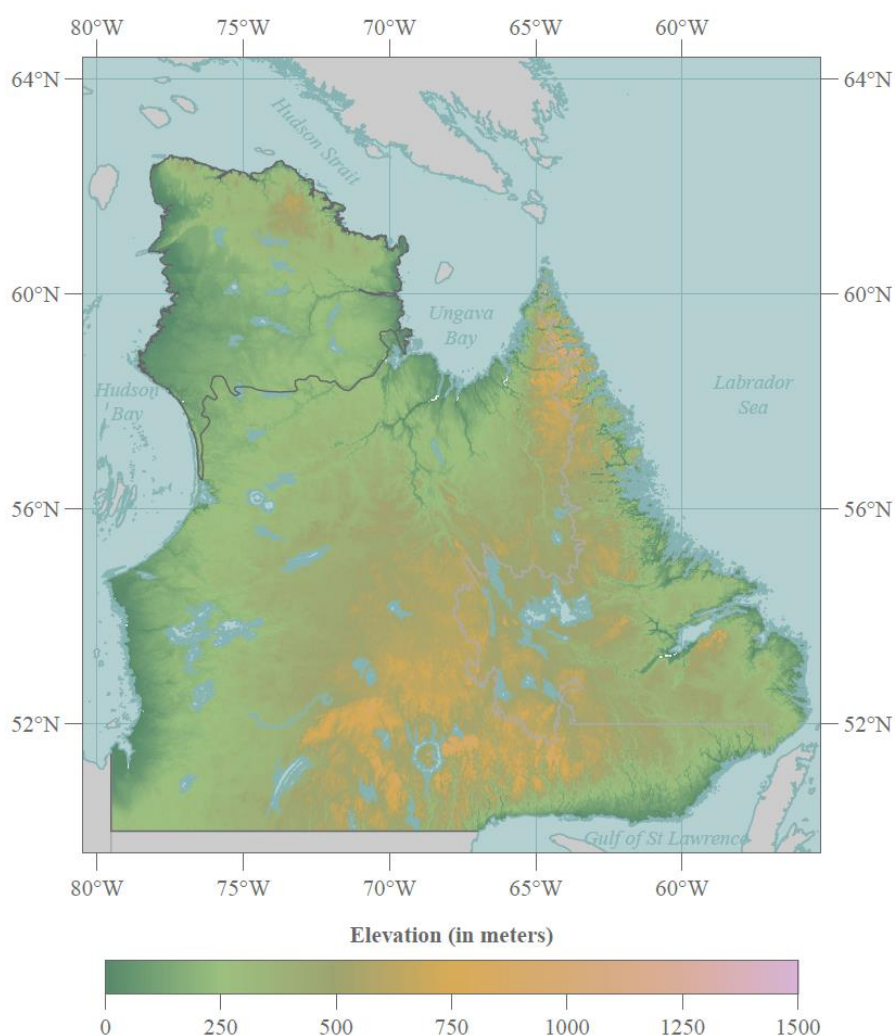


Figure 1-1 Topographie du nord du Québec

Les changements climatiques réchaufferont les territoires nordiques beaucoup plus rapidement que le reste du globe (IPCC, 2013; Ouranos, 2015). D'autres perturbations climatiques accompagneront l'augmentation de température, notamment une augmentation des précipitations et un changement du couvert de neige. Les perturbations climatiques affecteront la faune et la végétation du Nunavik, mais également les infrastructures et les populations qui y vivent. Dans ce contexte, il est primordial de bien connaître les vulnérabilités et les impacts induits par le climat d'aujourd'hui et de demain sur le territoire. Ces connaissances aideront les décideurs à identifier les mesures d'adaptation aux changements climatiques les plus adéquates, équitables et efficaces.

Charron (2015) a caractérisé le climat passé récent du Nunavik en utilisant quatre réanalyses climatiques. Le recours à des ensembles tels les réanalyses offre des avantages majeurs considérant la faible couverture spatiale et temporelle des stations météorologiques dans la région. De nouveaux produits de réanalyses ont été produits depuis, ceux-ci méritent qu'on les visite à nouveau afin de tenter d'améliorer les connaissances sur le climat régional récent du Nunavik.

Brown et Lemay (2013) ont caractérisé le climat futur du Nunavik selon un scénario d'émission de gaz à effet de serre élevé. De nouveaux ensembles de projections climatiques régionales utilisant plus d'un scénario de gaz à effet de serre ainsi que des versions plus récentes des Modèles régionaux du climat (MRC) ont été récemment rendus disponibles. Ces ensembles permettent de mettre à jour les travaux de 2013, tout en caractérisant une plus grande variété d'indicateurs climatiques.

Le présent rapport met à jour le portrait climatique récent et futur du Nunavik ainsi que ses sous-composantes hydroclimatiques et bioclimatiques. Une analyse d'impact des changements climatiques sur la végétation et la grande faune est ensuite présentée. Les objectifs spécifiques du projet sont les suivants :

1. Revoir les données utilisées pour caractériser le climat passé récent du Nunavik;
2. Réaliser des scénarios climatiques sur le Nunavik et analyser l'ampleur des changements climatiques causés par l'augmentation des émissions de GES;
3. Produire des cartes et des tableaux pour des indicateurs climatiques spécifiques;

4. Mettre à jour les bioclimats passés récents et calculer les bioclimats futurs et produire des cartes;
5. Réaliser des analyses d'impact de l'évolution des bioclimats sur la faune et la végétation du Nunavik;
6. Fournir l'hydrologie du passé récent et du futur développée dans le cadre du projet cQ2;
7. Proposer des recommandations sur les prochaines étapes.

Cinq chapitres répondant aux objectifs spécifiques mentionnés ici haut constituent le corps du document. Le chapitre 2 caractérise le climat passé récent et le climat futur du Nunavik. Le chapitre 3 fournit l'hydrologie reconstituée du Nunavik ainsi que les projections hydrologiques en climat futur. Le chapitre 4 caractérise les bioclimats du passé récent et leur évolution possible dans le futur. Le chapitre 5 présente la végétation actuelle du Nunavik et son évolution possible dans le futur. Le chapitre 6 discute de la faune du Nunavik et de son évolution possible dans le futur. Finalement, le chapitre 7 présente un résumé et les principales conclusions de l'étude et formule quelques recommandations pour les études de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptation. Le rapport est divisé en deux tomes. Le tome I donne une description des méthodes et présente les résultats. Quant au tome II, il regroupe l'ensemble des résultats produits dans le cadre des travaux du chapitre 2. Les résultats sont présentés sous forme de cartes, de graphiques et de tableaux.

1.1 Références

- Brown, R. & Lemay, M., 2013. Variabilité et changements climatiques dans la péninsule du Nunavik et du Nunatsiatvut (IRIS de la région subarctique de l'Est du Canada). In M. Allard & M. Lemay, eds. *Le Nunavik et le Nunatsiatvut: De la science aux politiques publiques*. Québec: ArticNet inc., pp. 57–115.
- Charron, 2015. Élaboration du portrait climatique régional en soutien à l'analyse des vulnérabilités et au développement du Nunavik, Ouranos, Montréal, 86 pp.
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Ouranos, 2015. Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos, 114 p.

Chapitre 2 Les scénarios climatiques

Auteurs:

Alain Mailhot, INRS-ETE
Émilie Diaconescu, INRS-ETE

Collaborateurs:

Ross Brown, Ouranos
Diane Chaumont, Ouranos
Élyse Fournier, Ouranos
Travis Logan, Ouranos



2.1 Mise en contexte

Ce chapitre rend compte des travaux visant à définir le climat de référence et les climats futurs aux horizons 2050 (2040-2064) et l'horizon 2080 (2076-2100). La liste des indicateurs climatiques considérés et des ensembles de données utilisées (simulations climatiques, données aux stations) ainsi qu'une description des méthodes utilisées sont présentées. Des exemples de résultats sous forme de cartes, de graphiques et de tableaux sont également illustrés. Ces exemples visent à décrire en détail le contenu des figures et expliquent comment interpréter les différents résultats. L'ensemble des cartes, des graphiques et des tableaux pour tous les indicateurs climatiques est regroupé au tome II.

Le chapitre est divisé en quatre sections. La première (section 2.2) présente certaines définitions et concepts de base utiles à la compréhension des méthodes et résultats. La section 2.3 donne une description des indicateurs climatiques retenus. Les simulations et données climatiques utilisées pour développer les projections en climat futur sont présentées à la section 2.4. La méthode utilisée pour sélectionner le climat de référence est décrite à la section 2.5 de même que les ensembles retenus pour représenter ce climat de référence. La section 2.6 s'attarde à présenter la méthode utilisée pour le développement des projections climatiques des différents indicateurs aux horizons retenus. La section 2.7 décrit la structure d'ensemble des résultats et explique, à partir de quelques exemples, comment interpréter les différentes cartes, graphiques et tableaux produits dans le cadre du projet et regroupés dans le tome II du rapport. Enfin, une synthèse des principaux résultats obtenus à l'échelle du Nunavik est présentée à la section 2.7.

2.2 Définitions et concepts de base

Certains concepts et définitions de base nécessaires à la compréhension des méthodes mises en œuvre et à l'interprétation des résultats sont décrits aux sections suivantes. Ces concepts et définitions de base sont : 1) *Representative Concentration Pathway* (RCP; section 2.2.1); 2) périodes de référence (historique et futurs; section 2.2.2) ; 3) modèles globaux et régionaux (section 2.2.3); 4) moyenne et médiane d'ensemble (section 2.2.4).

2.2.1 *Representative Concentration Pathway* (RCP)

Les *Representative Concentration Pathway* (RCP) ont été développées afin de représenter les différents scénarios futurs de forçage radiatif résultant de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (la principale référence utilisée pour cette section est van Vuuren et al., 2011). Ces scénarios ont été développés sur la base de divers scénarios d'évolution démographique, technologique, économique, énergétique et d'occupation du territoire. Ces scénarios remplacent les scénarios du *Special Report on Emissions Scenarios* autrefois utilisés pour produire les projections climatiques (SRES; IPCC, 2000).

Quatre scénarios RCP ont été définis : RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5. Le nombre suivant l'acronyme RCP correspond à la variation du forçage radiatif pendant la période 1850-2100 soit depuis le début de l'ère industrielle jusqu'à la fin du XXI^e siècle (le forçage radiatif correspond à la variation du bilan d'énergie radiative du système climatique terrestre; les fluctuations d'énergie dues aux variations des cycles solaires en font partie, de même que la quantité d'énergie radiative ajoutée au système climatique suite à l'augmentation des gaz à effet de serre; un forçage positif contribue à réchauffer le système climatique terrestre; définition fournie par Mme Dominique Paquin d'Ouranos). Ainsi le RCP 2.6 correspond à un forçage radiatif de 2.6 W/m² alors que le RCP 8.5 correspond à un forçage radiatif de 8.5 W/m². Une valeur plus élevée indique des émissions de gaz à effet de serre plus importants. La figure 2.1 montre l'évolution du forçage radiatif selon chacun de ces scénarios pour la période 1850-2100. Dans le cadre du présent projet, deux scénarios RCP sont considérés à savoir les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Le premier suppose un plafonnement du forçage (et des concentrations de GES) au cours des dernières décennies du XXI^e siècle alors que le second suppose une croissance continue du forçage (et des émissions de GES) jusqu'à la fin du siècle (figure 2.1).

2.2.2 Périodes de référence (historique et futurs)

Les simulations climatiques sont généralement réalisées en continu et couvrent une période donnée (p. ex. 1950-2100 pour les simulations CORDEX utilisées dans le cadre du présent projet; voir section 2.4). Pour fin d'analyse, cette période est souvent subdivisée en sous-périodes, l'une représentant le climat historique ou de référence, et les autres représentant le climat futur (dans ce cas on parlera également d'horizon). Les moyennes climatiques des différents indicateurs sont ainsi calculées pour chacune de ces périodes et les majorations en climat futur sont estimées en comparant les moyennes des périodes futures à la moyenne correspondante pour la période de référence. Dans le cadre de la présente étude, la période de référence historique correspond à la période 1980-2004 et les deux périodes futures retenues sont 2040-2064 et 2076-2100. Chacune de ces périodes (historique et futures) couvre 25 ans.

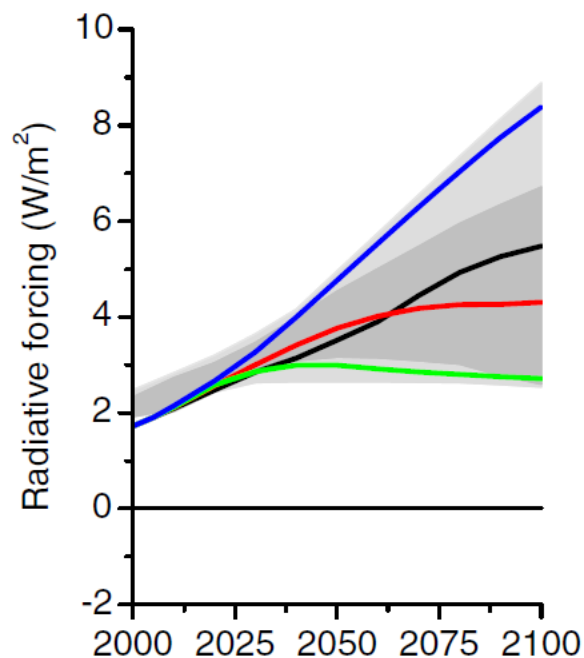


Figure 2-1 Évolution du forçage radiatif durant la période 2000-2100 selon les différents scénarios RCP (RCP 2.6 : courbe vert; RCP 4.5 : courbe rouge; RCP 6.0 : courbe noire; RCP 8.5 : courbe bleue). Figure tirée de van Vuuren et al. (2011).

2.2.3 Modèles globaux et régionaux

Des modèles climatiques ont été développés au cours des dernières décennies pour simuler comment le climat futur sera affecté par une augmentation des

gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. Ces modèles intègrent les connaissances les plus à jour sur les différents mécanismes régissant les interactions entre les différentes composantes du climat terrestre (atmosphère, océan, biosphère, surface terrestre, etc.).

Les modèles simulant l'ensemble de la planète sont dits globaux. Plusieurs modèles globaux ont été développés par diverses équipes à travers le monde. Même si tous ces modèles s'inspirent des mêmes principes fondamentaux de la physique (p. ex. conservation de la masse, de l'énergie), chacun se distingue par sa représentation du système réel et de certains processus. Chaque modèle global est donc un 'laboratoire virtuel' où il est possible de construire des projections du climat futur et considérant que tous ces modèles ne donnent pas la même 'réponse' et qu'ils sont tous des représentations vraisemblables du système réel, il est important de comparer les 'réponses' fournies par ces différents modèles.

La simulation du système climatique terrestre demande des ressources informatiques très importantes qui imposent une limite à la résolution spatiale et temporelle de ces modèles. Dans le but de développer des projections climatiques à des échelles plus locales, les modèles régionaux du climat ont été développés (voir sur le sujet Laprise 2008). Ces modèles simulent une région spécifique (que l'on appelle domaine de simulation) et sont couplés à un modèle global qui simule l'ensemble de la planète et 'alimente' le modèle régional (c'est-à-dire lui fournit l'information aux limites de son domaine de simulation). On dit alors que le modèle global 'pilote' le modèle régional. Ainsi lorsque l'on fait référence à une simulation d'un modèle régional, il convient de préciser le 'pilote' c'est-à-dire le modèle global utilisé (tel qu'indiqué dans le tableau 2.4). Au même titre qu'il existe plusieurs modèles globaux, plusieurs modèles régionaux ont été développés au fil des ans. Chaque modèle est unique et, autant que faire se peut, il est d'usage de comparer les résultats de plusieurs modèles régionaux (pilotes par différents modèles globaux) afin de pouvoir apprécier les incertitudes sur les projections résultant des différences de structures de ces modèles. Si la mise en œuvre des modèles globaux exige des ressources informatiques importantes (puissance de calcul et espace mémoire), ce constat est encore plus vrai pour les modèles régionaux. Ce faisant le nombre de simulations de modèles régionaux disponibles demeure modeste bien qu'en nette progression. L'ensemble CORDEX, utilisé dans le cadre du présent projet, est un exemple d'un ensemble de simulations régionales (voir section 2.4).

2.2.4 Moyenne et médiane d'ensemble

L'une des approches communément utilisées pour combiner les résultats de plusieurs simulations réalisées à partir de différents modèles globaux et régionaux consiste à considérer la moyenne ou la médiane d'ensemble. La moyenne d'ensemble consiste simplement à faire la moyenne sur les diverses simulations à chaque point de grille alors que la médiane d'ensemble est obtenue en prenant la médiane de la distribution des valeurs simulées. Dans le premier cas, l'expression moyenne d'ensemble des MRC (pour Modèles Régionaux du Climat) sera utilisée alors que l'expression médiane d'ensemble des MRC sera utilisée dans le second cas. Considérant le faible nombre de simulations actuellement disponibles la médiane d'ensemble a été considérée dans le cadre de cette étude.

2.3 Indicateurs climatiques

Les indicateurs climatiques retenus sont présentés aux tableaux 2.1, 2.2 et 2.3. La liste de ces indicateurs a été établie après consultations auprès des usagers potentiels et des collaborateurs du projet. Ces indicateurs peuvent être classés en trois groupes : les indicateurs associés aux températures (tableau 2.1), aux précipitations (tableau 2.2) et aux précipitations sous forme solide et au couvert de neige (tableau 2.3). Les noms apparaissant dans la première colonne de ces tableaux sont utilisés pour identifier les différentes cartes et graphiques relatifs à chacun de ces indicateurs. Ces indicateurs sont estimés sur une base annuelle ou mensuelle et la moyenne climatique d'un jeu de données est obtenue en faisant la moyenne des valeurs annuelles ou mensuelles sur la période considérée (historique ou futures).

Tableau 2-1 Nom, définition et unité des indicateurs climatiques associés aux températures

Nom	Définition	Unité
Température moyenne annuelle	Moyenne annuelle des températures moyennes journalières	°C
Température moyenne mensuelle	Moyenne mensuelle des températures moyennes journalières	°C
Début de la saison sans gel	Premier jour (à partir du 5 ^{er} janvier) où la moyenne mobile des températures minimales journalières sur la période de 10 jours centrée sur ce jour est supérieure ou égale à 0°C	jour julien
Fin de la saison sans gel	Premier jour (à partir du 5 ^{er} août) où la moyenne mobile des températures minimales journalières sur la période de 10 jours centrée sur ce jour est inférieure ou égale à 0°C	jour julien
Durée de la saison sans gel	Nombre de jours entre la date de fin et de début de la saison sans gel	jours
Gel-dégel	Nombre annuel de jours où, pour un même jour, la température minimale journalière est inférieure à 0°C et la température maximale journalière supérieure à 0°C	jours
Degrés-jours de dégel annuel	Cumul annuel (janvier à décembre) des températures pour les jours où la température moyenne journalière est supérieure à 0°C	degrés-jours
Degrés-jours de gel annuel	Cumul annuel (de juillet à juin) des valeurs absolues de températures pour les jours où la température moyenne journalière est inférieure à 0°C	degrés-jours
Début de la saison de croissance	Premier jour (à partir du 1 ^{er} janvier) où la température moyenne journalière est égale ou supérieure à 5°C pendant 5 jours consécutifs	jour julien
Fin de la saison de croissance	Premier jour (après le 1 ^{er} août) où la température moyenne journalière est inférieure à -2°C	jour julien
Durée de la saison de croissance	Nombre de jours entre la date de début et de fin de la saison de croissance	jours
Degrés-jours de croissance	Cumul annuel des écarts entre la température moyenne journalière et 5°C pour tous les jours où la température moyenne journalière est supérieure à 5°C	degrés-jours
Degrés-jours de chauffage	Cumul annuel des écarts absolus entre la température moyenne journalière et 17°C pour tous les jours où la température moyenne journalière est inférieure à 17°C	degrés-jours
Jours chauds ¹	Nombre annuel de jours avec une température maximale journalière supérieure à 15°C	jours
Nuits chaudes ¹	Nombre annuel de jours avec une température minimale journalière supérieure à 10°C	jours
Jours de gel	Nombre annuel de jours avec une température minimale journalière inférieure à 0°C	jours
Jours englacés	Nombre annuel de jours avec une température maximale journalière inférieure à 0°C	jours
Température nocturne minimale ¹	Minimum annuel des températures minimales journalières	°C
Température diurne minimale ¹	Minimum annuel des températures maximales journalières	°C
Température nocturne maximale ¹	Maximum annuel des températures minimales journalières	°C
Température diurne maximale ¹	Maximum annuel des températures maximales journalières	°C

1. Ces dénominations reposent sur l'hypothèse, vraie pour une très grande majorité de jours, que les températures minimales sont enregistrées la nuit et les températures maximales le jour.

Tableau 2-2 Nom, définition et unité des indicateurs climatiques associés aux précipitations

Nom	Définition	Unité
Précipitation totale annuelle	Cumul annuel de précipitation	mm
Précipitation totale mensuelle	Cumul mensuel de précipitation	mm
Précipitation maximale annuelle 1 jour	Maximum annuel de précipitation sur 1 jour	mm/jour
Précipitation maximale annuelle 5 jours	Maximum annuel de précipitation sur 5 jours consécutifs	mm/jour
95e percentile des précipitations journalières	95e percentile de la distribution annuelle des précipitations	mm/jour
99e percentile des précipitations journalières	99e percentile de la distribution annuelle des précipitations	mm/jour
Jours de précipitations très intenses	Nombre annuel de jours avec des précipitations plus intenses que le 95e percentile de la distribution des précipitations des jours humides (plus de 1 mm) sur la période de référence	jours
Jours de précipitations extrêmes	Nombre annuel de jours avec précipitations extrêmes plus intense que le 99e percentile de la distribution des précipitations des jours humides (plus de 1 mm) sur la période de référence	jours

Tableau 2-3 Nom, définition et unité des indicateurs climatiques associés aux précipitations sous forme solide et au couvert de neige

Nom	Définition	Unité
Précipitation solide annuelle	Cumul annuel de précipitation sous forme solide	mm
Précipitation solide mensuelle	Cumul mensuel de précipitation sous forme solide	mm
Fraction des précipitations annuelles sous forme de neige	Précipitation annuelle sous forme de neige divisée par la précipitation totale annuelle	%
Fraction des précipitations mensuelles sous forme de neige	Précipitation mensuelle sous forme de neige divisée par la précipitation totale mensuelle	%
Début du couvert continu de neige	Premier jour après le 1er août où l'épaisseur de neige accumulée franchit le seuil de 2 cm et reste supérieure à ce seuil pendant les 14 jours suivants	jours à partir du 1er août
Fin du couvert continu de neige	Premier jour d'une année centrée sur l'hiver (août-juillet) où l'épaisseur de neige accumulée au sol descend sous le seuil de 2 cm et reste sous ce seuil pendant les 14 jours suivants	jours à partir du 1er août
Durée du couvert de neige	Nombre de jours d'une année centrée sur hiver (août-juillet) où l'épaisseur de la neige accumulée au sol est supérieure ou égale à 2 cm	jours
Hauteur de neige maximale	Accumulation maximale de neige durant une année centrée sur hiver (août-juillet)	m

2.4 Simulations climatiques

La communauté internationale en modélisation régionale du climat a mis sur pied le projet CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*) afin de produire un nouvel ensemble de simulations régionales sur différents domaines (p. ex. Arctique, Amérique du Nord) avec de nouvelles versions des MRC. Le domaine de simulation pertinent pour le territoire sous étude (partie du Québec au nord du 55e parallèle) est le domaine Nord-Amérique, le domaine Arctique ne couvrant que la partie nord-ouest du Canada. Le tableau 2.4 dresse la liste des simulations disponibles pour ce domaine et retenues dans le cadre du présent projet. La colonne «modèle régional» du tableau 2.4 identifie le MRC considéré et le domaine de simulation (Nord-Amérique, Ouranos ou UQAM; les domaines dans ces derniers cas diffèrent légèrement comme le montre la figure 2.2) alors que la colonne «modèle global» (conditions aux frontières) identifie le modèle global qui simule le climat sur l'ensemble de la planète et définit les conditions aux frontières des domaines de simulations des MRC. Les variables pertinentes au projet à savoir précipitations (solides et liquides) et températures ont été extraites des bases de données.

Trois simulations produites par le groupe Simulations et analyses climatiques d'Ouranos ont aussi été ajoutées à l'ensemble CORDEX (OURANOS-CRCM5v3331).

Deux scénarios d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre (GES) et des aérosols sont considérés pour le climat futur. Il s'agit des RCP4.5 et RCP8.5; le premier pose une hypothèse de stabilisation des concentrations à l'horizon de la fin du siècle alors que le second pose une hypothèse d'émissions fortes et soutenues (voir section 2.2.1 pour plus d'explications sur ces scénarios).

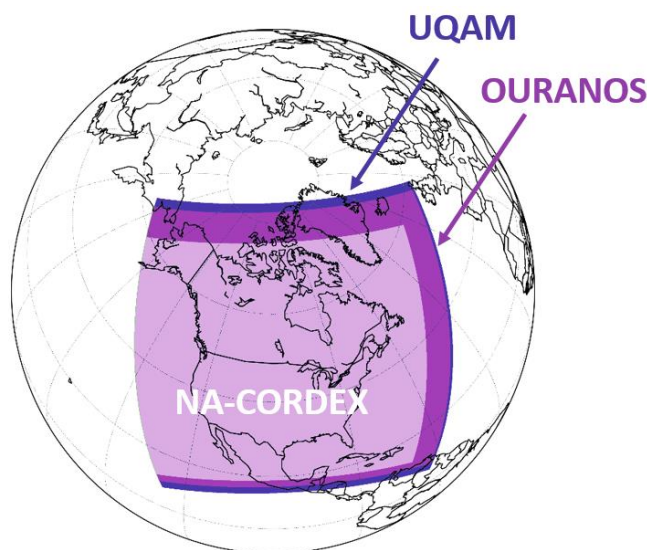


Figure 2-2 Domaine des simulations CORDEX – Nord Amérique (NA-CORDEX), OURANOS-CRCM5v3331 (OURANOS) et UQAM-CRCM5v333 (UQAM).

Tableau 2-4 Liste et caractéristiques des simulations retenues

Modèle régional	Modèle global (conditions aux frontières)	Période simulée (scénario de forçage radiatif)	Résolution spatiale (degrés)
CCCma-CanRCM4	CCCma-CanESM2m1	1950-2005 (historique) 2006-2100 (RCP 4.5 et RCP 8.5)	0.22
DMI-HIRHAM5	ICHEC-EC-EARTH	1951-2005 (historique) 2006-2100 (RCP 4.5* et RCP 8.5*)	0.44
OURANOS-CRCM5v3331	CCCma-CanESM2m2	1950-2005 (historique) 2006-2100 (RCP 8.5)	0.22
	CCCma-CanESM2m3	1950-2005 (historique) 2006-2100 (RCP 8.5)	0.22
	CCCma-CanESM2m4	1950-2005 (historique) 2006-2100 (RCP 8.5*)	0.22
SMHI-RCA4	CCCma-CanESM2m1	1951-2005 (historique) 2006-2100 (RCP 4.5 et RCP 8.5)	0.44
	ICHEC-EC-EARTH	1951-2005 (historique) 2006-2100 (RCP 4.5 et RCP 8.5)	0.44
UQAM-CRCM5v333	MPI-M-MPI-ESM-LR/MR	1949-2005 (historique) 2006-2100 (RCP 4.5 et RCP 8.5)	0.44
	CCCma-CanESM2m1	1949-2005 (historique) 2006-2100 (RCP 4.5 et RCP 8.5*)	0.44

* Toutes ces simulations ont été utilisées pour l'étude d'impact sur la faune présentée au chapitre 6 à l'exception de celles marquées d'un astérisque.

2.5 Climat de référence (1980-2004)

La phase 1 du projet utilisait un climat de référence basé sur la moyenne d'ensemble des quatre réanalyses suivantes : CFRS, ERA-Interim, JRA55 et MERRA. Depuis le dépôt de la phase 1, des travaux réalisés par l'équipe du prof. Mailhot dans le cadre d'un projet Arctic-Net a conduit à l'évaluation de l'ensemble *Global Meteorological Forcing Dataset for Land Surface Modeling* (GMFD; Sheffield et al. 2006). Cet ensemble n'est pas une réanalyse à proprement parler. Il a été construit en combinant différents ensembles de données d'observations globales avec la réanalyse du *National Centers for Environmental Prediction–National Center for Atmospheric Research* (NCEP–NCAR; Kalnay et al. 1996; Kistler et al. 2001). Le lecteur est invité à consulter Sheffield et al. (2006) pour obtenir plus de détails sur cet ensemble.

Les valeurs des indicateurs climatiques estimées à partir du produit GMFD et de plusieurs autres jeux de données, dont les réanalyses utilisées à la Phase 1 du projet, ont été comparées aux valeurs correspondantes estimées à partir des séries aux stations. Considérant le faible nombre de stations sur le territoire sous étude, les stations situées au Labrador et au nord du 50e parallèle ont également été considérées. Seules les stations avec plus de 15 années valides (moins de 20 % de données manquantes) pendant la période de référence (1980-2004) ont été retenues. Quatre groupes de stations ont été considérés selon que les indicateurs sont associés : a) aux températures; b) aux précipitations totales; c) à la neige au sol et d) aux précipitations sous forme solide (figure 2.3).

Pour les indicateurs associés aux températures et aux précipitations, la comparaison des réanalyses et de GMFD a permis de montrer que ce dernier présente la meilleure performance, c'est-à-dire qu'il reproduit globalement le mieux les moyennes climatiques des indicateurs calculés aux stations. Ce faisant, nous proposons d'utiliser GMFD pour définir le climat de référence du territoire à l'étude plutôt que la moyenne d'ensembles des quatre réanalyses (CFRS, ERA-Interim, JRA55 et MERRA) tel que proposé à l'issue de la phase 1 du projet. Le lecteur intéressé à plus de détails sur ce travail de comparaison entre les observations et les différents ensembles (réanalyses, stations météo interpolées sur grille et GMFD) à l'échelle de l'Arctique canadien, où des résultats similaires ont été obtenus, peut consulter Diaconescu et al. (2017).

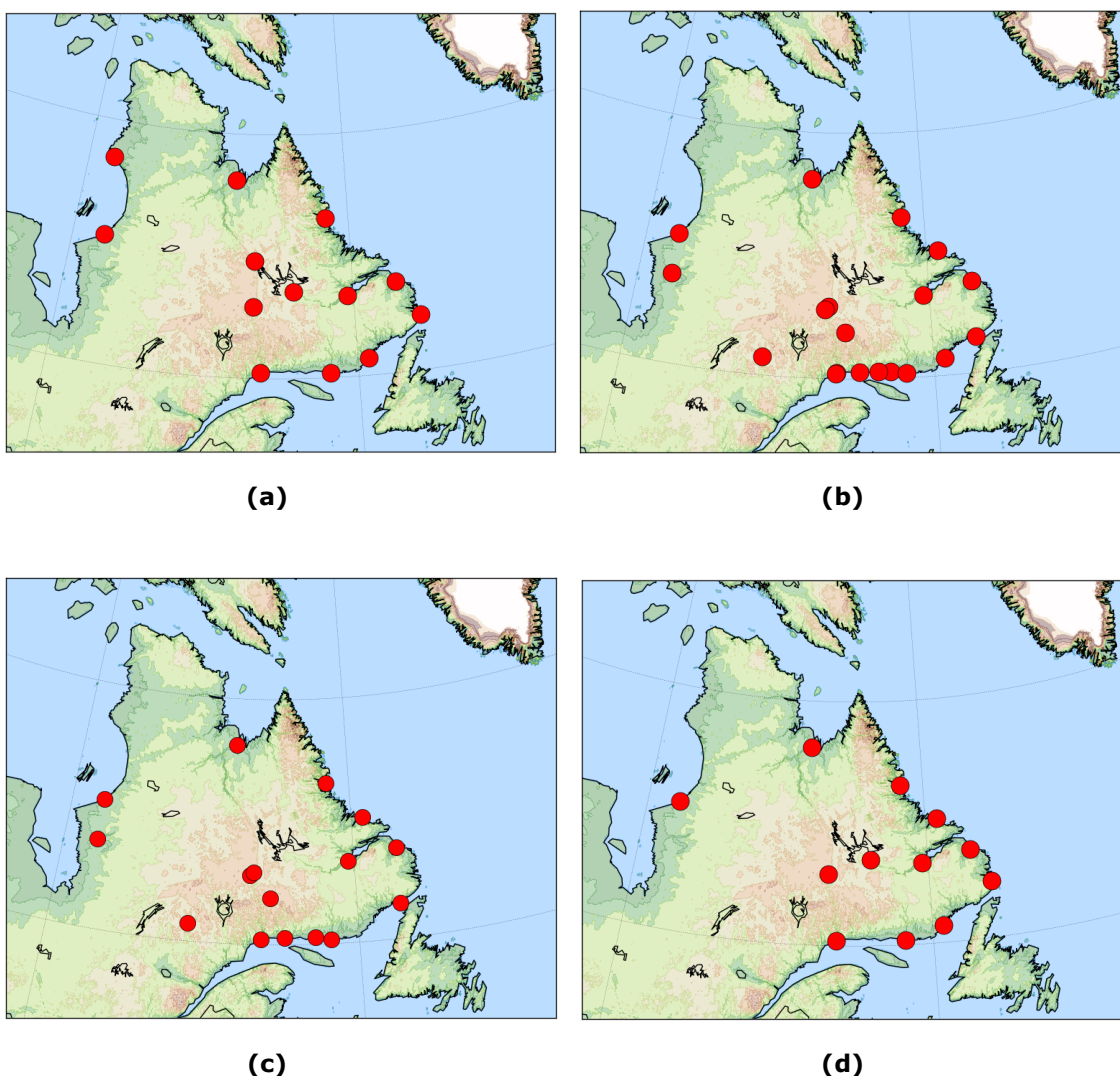


Figure 2-3 Stations utilisées dans l'évaluation des produits sur grille pour les indicateurs associés : a) aux températures; b) aux précipitations totales; c) à la neige au sol et d) aux précipitations sous forme solide.

Le produit GMFD représentera donc le climat de référence pour la phase 2 du projet MFFP. Pour différentes raisons techniques, la période de référence de la phase 1 (1981-2010) a aussi été modifiée, elle couvre maintenant 25 ans soit 1980-2004. Ainsi toutes les valeurs des indicateurs associés aux températures (tableau 2.1) et aux précipitations (tableau 2.2) en climat historique (1980-2004) seront donc estimées à partir de GMFD. Il convient de noter toutefois que la performance de GMFD se dégrade lorsque l'on considère les indicateurs associés aux extrêmes de précipitations (p. ex. RX1day) par rapport aux autres indicateurs. Les distributions spatiales de ces indicateurs sont irréalistes et ne

doivent donc pas être utilisées (des travaux futurs devront examiner et corriger ces lacunes). Cependant, par souci de cohérence, le même jeu de données (GMFD) a été sélectionné pour représenter le climat de référence pour les précipitations et les températures.

Un autre ensemble doit cependant être sélectionné pour représenter le climat de référence pour les indicateurs associés aux précipitations sous forme solide et au couvert de neige considérant que ces variables ne sont pas disponibles pour les quatre réanalyses et pour GMFD. La médiane d'ensemble des simulations disponibles (voir section 2.2.3) a été retenue dans ce cas puisqu'elle présentait la meilleure performance, lorsque comparée aux valeurs observées. Ainsi toutes les valeurs des indicateurs associés aux précipitations sous forme solide et au couvert de neige (tableau 2.3) en climat historique (1980-2004) seront estimées à partir de cette médiane d'ensemble.

2.6 Climat futur (2040-2064 et 2076-2100)

Pour la synthèse des résultats en climat futur, deux horizons sont considérés : 2050 et 2080, l'horizon 2050 correspondant à la période 2040-2064 et l'horizon 2080 à la période 2076-2100. Deux scénarios d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre (forçage radiatif) seront considérés, soient les RCP 4.5 et 8.5 (voir la section 2.2.1 pour plus de détails sur les RCP). Quatre combinaisons sont ainsi obtenues (RCP 4.5, horizon 2050; RCP 4.5, horizon 2080 ; RCP 8.5, horizon 2050; RCP 8.5, horizon 2080). L'ensemble des résultats pour tous les indicateurs et les différentes combinaisons RCP/horizons sont regroupés dans le tome II du rapport. Les résultats pour chacune de ces combinaisons seront présentés sous forme de cartes ou de graphiques (des exemples de ces cartes et graphiques sont décrits à la section 2.7).

2.6.1 Comparaison modèles globaux vs modèles régionaux : diagrammes de dispersion

Les diagrammes de dispersion ont pour objectif d'évaluer dans quelle mesure les simulations de MRC disponibles permettent de couvrir la variabilité des projections obtenues à partir de plus grands ensembles (plus de simulations provenant de plus de modèles différents), tels que ceux des modèles globaux. Ce type d'analyse permet donc de fournir aux usagers une appréciation qualitative des scénarios en appui à l'évaluation des impacts et à la prise de décision pour l'adaptation. Les simulations de l'ensemble *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) ont été utilisées aux fins de comparaison.

Les figures 2.4 et 2.5 présentent les changements annuels projetés pour les températures moyennes (en abscisse) et les précipitations moyennes annuelles (en ordonnée), exprimés dans ce dernier cas en terme relatif, sur l'ensemble du territoire du Québec pour les périodes 2046-2060 et 2076-2100 respectivement. Cette comparaison a aussi été effectuée à l'échelle saisonnière, mais n'est pas présentée par souci de concision. Ces figures montrent que les simulations régionales couvrent adéquatement l'amplitude des changements projetés par les simulations globales tant pour la température que pour la précipitation.

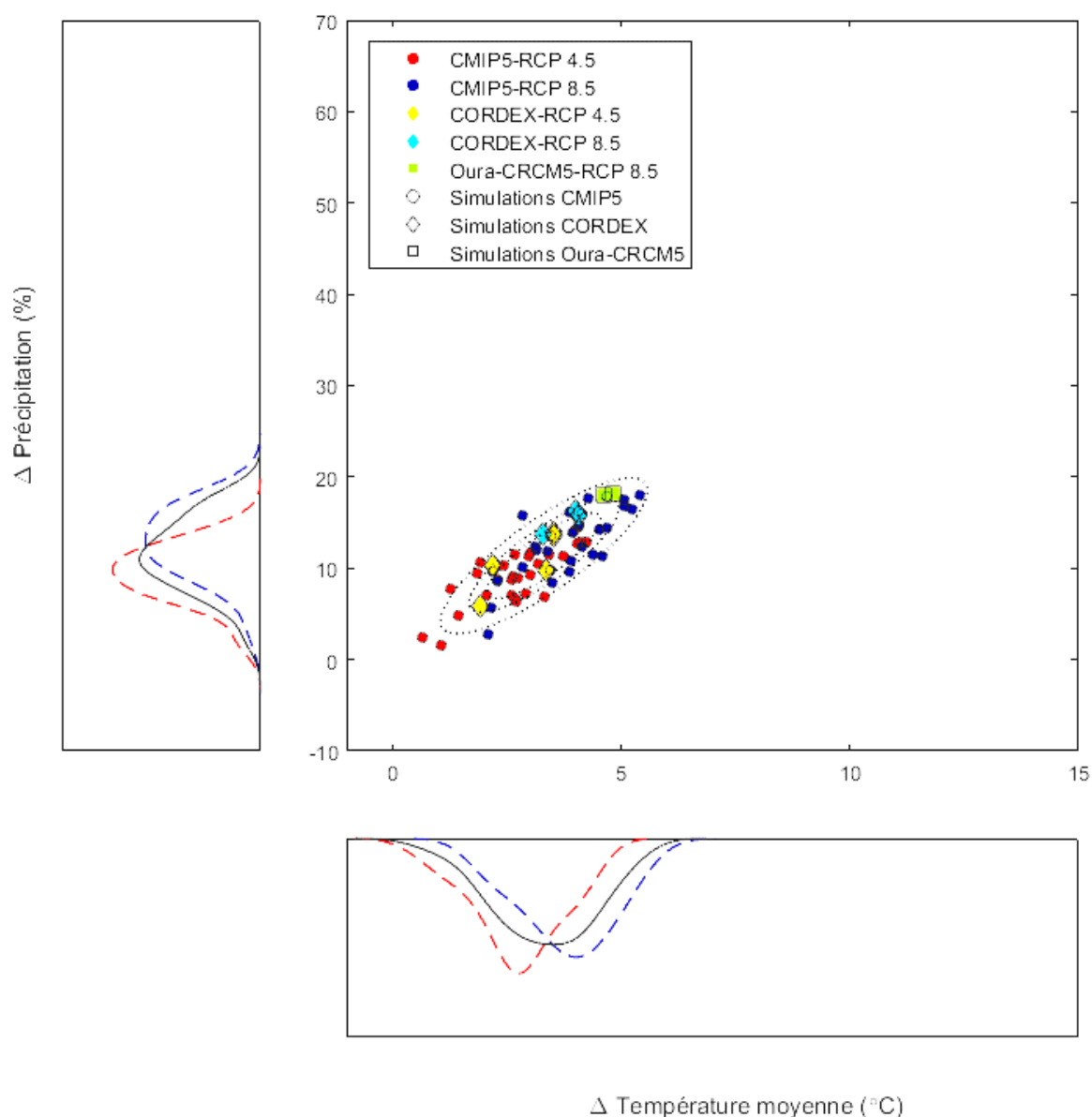


Figure 2-4 Diagramme de dispersion des écarts absolus entre les températures moyennes annuelles (en abscisse) et des écarts relatifs pour les précipitations moyennes annuelles projetés à l'horizon 2050 moyennés sur l'ensemble du Québec par rapport à la période 1980-2004. Le diagramme le long de l'abscisse présente les distributions des écarts absolus des températures à l'horizon 2050 pour les simulations CMIP5 – RCP4.5 (tirets rouges), les simulations CMIP5 – RCP8.5 (tirets bleus) et les simulations CORDEX RCP4.5 et RCP8.5 (lignes noires). Le diagramme le long de l'axe des ordonnées présente les distributions correspondantes pour les écarts relatifs des précipitations moyennes annuelles à l'horizon 2050.

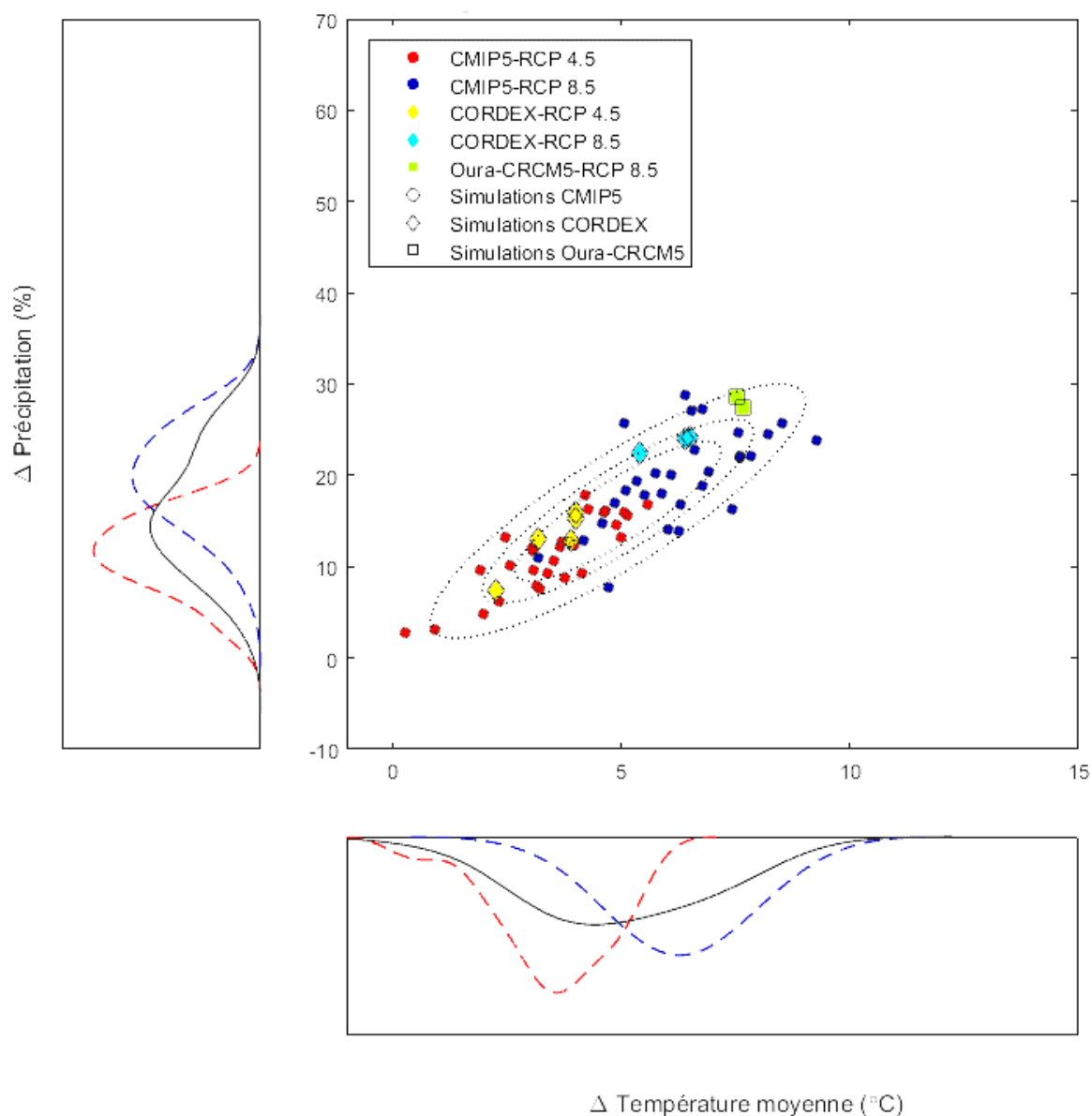


Figure 2-5 Diagramme de dispersion des écarts absolus entre les températures moyennes annuelles (en abscisse) et des écarts relatifs pour les précipitations moyennes annuelles projetés à l'horizon 2080 moyennés sur l'ensemble du Québec par rapport à la période 1980-2004. Le diagramme le long de l'abscisse présente les distributions des écarts absolus des températures à l'horizon 2080 pour les simulations CMIP5 – RCP4.5 (tirets rouges), les simulations CMIP5 – RCP8.5 (tirets bleus) et les simulations CORDEX RCP4.5 et RCP8.5 (lignes noires). Le diagramme le long de l'axe des ordonnées présente les distributions correspondantes pour les écarts relatifs des précipitations moyennes annuelles à l'horizon 2080.

2.7 Résultats

Les moyennes climatiques des indicateurs pour les périodes futures et historiques ont été calculées de même que les écarts entre les moyennes climatiques estimées à partir des simulations et les valeurs correspondantes aux stations. L'ensemble de ces résultats est présenté sous quatre formats différents : 1) des diagrammes en violons (*violon plots*); 2) des cartes ; 3) des graphiques de l'évolution des indicateurs en fonction du temps en certains sites; 4) des tableaux. Les sections suivantes expliquent comment ces différents éléments graphiques ont été élaborés et comment les interpréter. Tous les résultats sont regroupés et présentés sous l'un ou l'autre de ces formats dans le tome II du rapport.

2.7.1 Comparaison des indicateurs simulés et observés : diagramme en violon

Les diagrammes en violon (*violon plots*) sont utilisés pour représenter la distribution des écarts (ou biais) entre les moyennes climatiques des indicateurs aux stations et les valeurs correspondantes du climat de référence. Chaque station est ainsi couplée au point de grille le plus proche du climat de référence. Le biais est estimé en prenant la différence entre la valeur de l'indicateur estimée à partir du jeu de données de référence et la valeur estimée à partir des enregistrements aux stations, une valeur positive indiquant donc que le jeu de données de référence surestime la valeur observée. La performance du jeu de données retenu pour le climat de référence pour un indicateur donné sera d'autant meilleure que la médiane des biais sera près de zéro et que les biais aux différentes stations seront faiblement dispersés autour de cette valeur médiane.

Tel que mentionné à la section 2.5, deux produits différents sont considérés pour le climat de référence. Pour les indicateurs associés aux températures et aux précipitations (tableaux 2.1 et 2.2), le jeu de données GMFD a été retenu et pour les indicateurs associés aux précipitations sous forme solide et au couvert de neige, la médiane d'ensemble des MRC a été retenue.

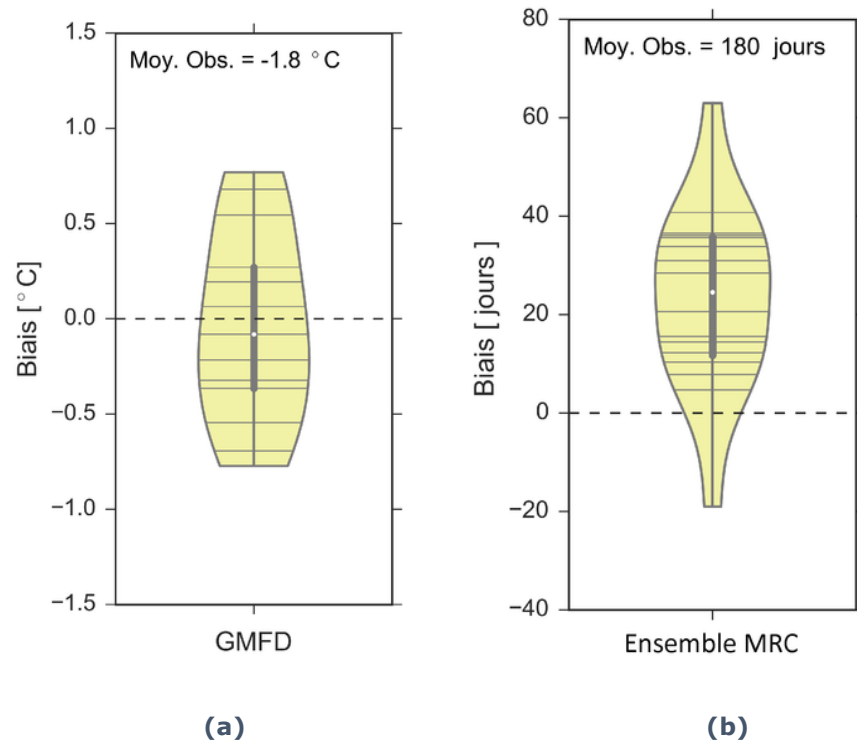


Figure 2-6 Diagramme en violon pour les indicateurs climatiques : a) température moyenne annuelle et b) durée du couvert de neige. L'ensemble utilisé pour représenter le climat de référence (GMFD pour la température moyenne annuelle et la moyenne d'ensemble des MRC – Ensemble MRC – pour la durée du couvert de neige) est indiqué sous chacun des diagrammes. La valeur moyenne de l'indicateur climatique pour l'ensemble des stations est indiquée dans la partie supérieure de chacun des diagrammes.

Les stations auxquelles sont comparées les valeurs du climat de référence varient selon les indicateurs (voir section 2.5). Ainsi quatre groupes de stations sont considérés (figure 2.3). Le premier groupe est formé des stations mesurant les températures (13 stations; figure 2.3a), le second les précipitations (17 stations; figure 2.3b), le troisième le couvert de neige (16 stations; figure 2.3c) et enfin le quatrième groupe les stations mesurant les précipitations sous forme solide (12 stations; figure 2.3d). Seules les stations avec plus de 15 années valides (une année est considérée valide lorsqu'elle compte moins de 20 % de données manquantes) pendant la période de référence (1980-2004) ont été retenues. Considérant le faible nombre de stations sur le territoire sous étude, les stations situées au Labrador et au nord du 50e parallèle ont également été considérées.

La figure 2.6 présente deux exemples de diagrammes en violon pour la température moyenne annuelle et la durée du couvert de neige. Ces deux

indicateurs utilisent deux produits différents pour représenter le climat de référence (GMFD pour la valeur moyenne des températures et la médiane d'ensemble des MRC pour la durée du couvert de neige; le produit en question est indiqué sous chacun des diagrammes). Dans ce cas précis, les stations auxquelles les valeurs du climat de référence sont comparées sont présentées aux figures 2.3a (stations où est mesurée la température) et 2.3c (stations où est mesuré le couvert de neige). Chaque ligne horizontale apparaissant dans chaque diagramme correspond au biais entre l'indicateur du climat de référence et l'indicateur observé (un biais positif indique une surestimation de la valeur observée par le produit de référence). La largeur du diagramme donne un aperçu de la dispersion des valeurs. Ainsi une partie plus large du diagramme indique un plus grand nombre de valeurs et à l'inverse une partie plus étroite un plus petit nombre de valeurs (la largeur du diagramme correspond en quelque sorte à la distribution des valeurs). Dans le cas présent, le diagramme de gauche suggère une dispersion quasi uniforme des valeurs de biais avec une légère prédominance de biais négatif alors que le diagramme de droite montre une concentration des biais entre 10 et 30 jours avec quelques biais plus extrêmes uniformément distribués de part et d'autre de ce noyau central.

Un diagramme à moustaches (*box plot*) apparaît également au centre de chacun des diagrammes en violon. La ligne verticale grise plus épaisse délimite les 1^{er} et 3^e quartiles de la distribution des biais et les moustaches (deux traits verticaux minces) les biais maximum et minimum. Enfin le point blanc correspond à la médiane de la distribution des biais.

La valeur moyenne de l'indicateur climatique pour l'ensemble des stations est indiquée dans la partie supérieure de chacun des diagrammes (p. ex. -1.8°C pour la température). Cette valeur permet d'apprécier l'ampleur du biais par rapport à la moyenne de l'indicateur aux stations. Ainsi, dans le cas du diagramme des températures moyennes annuelles, les biais maximums positif et négatif sont de l'ordre de $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ soit environ $\pm 40\%$ de la valeur moyenne aux stations (-1.8°C) et la médiane des biais (point blanc dans le diagramme à moustaches) est près de zéro. Dans le cas de la durée du couvert de neige, le biais positif maximum est de l'ordre de 62 jours et le biais maximum négatif de l'ordre de -18 jours ce qui représente respectivement $+34\%$ et -10% de la moyenne aux stations (180 jours). Dans ce cas, toutefois on constate que la médiane des biais est nettement différente de zéro (de l'ordre de $+25$ jours)

montrant que l'ensemble de référence a nettement tendance à surestimer la durée du couvert de neige enregistrée par rapport aux valeurs observées.

2.7.2 Cartes des climats de référence et futurs

Des cartes des moyennes climatiques des indicateurs pour la période historique (climat de référence) et pour les horizons futurs ont été réalisées. Les figures 2.7 et 2.8 présentent des exemples de telles cartes pour la température moyenne annuelle et la durée du couvert de neige respectivement.

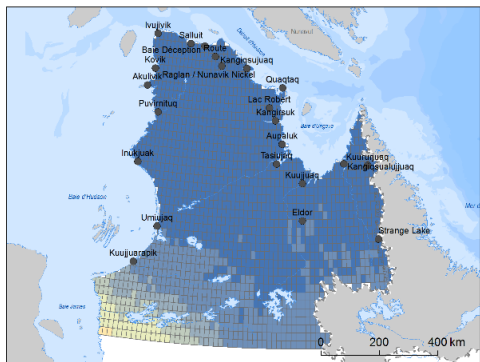
Les cartes des indicateurs pour le climat de référence sont construites à partir du produit retenu pour représenter celui-ci (le produit retenu est indiqué au-dessus de la carte de gauche). Dans le cas de GMFD, les valeurs affichées correspondent aux moyennes climatiques de l'indicateur en chacun des points de grille du territoire à l'étude. Dans le cas de la médiane d'ensemble des MRC, les valeurs affichées en chacun des points de grille correspondent à la médiane des moyennes climatiques simulées.

Les cartes des indicateurs en climat futur présentent les moyennes climatiques pour l'horizon et le scénario RCP considérés. Les valeurs affichées en chaque point de grille correspondent à la médiane des moyennes climatiques simulées pour la période considérée.

Plus spécifiquement, ces valeurs sont estimées de la façon suivante. Tout d'abord, les écarts entre les moyennes climatiques des indicateurs pour l'une des périodes futures et la période de référence sont calculés pour chaque simulation en chacun des points de grille. La médiane de ces écarts est ensuite calculée et est ajoutée à la moyenne climatique de l'indicateur pour le climat de référence.

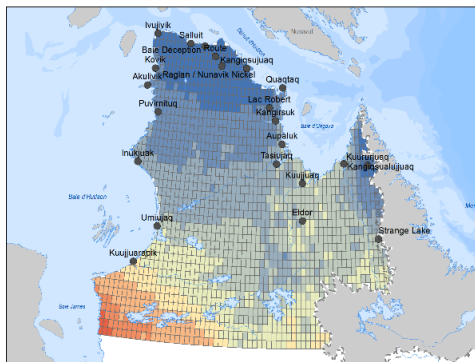
Référence 1980-2004

GMFD

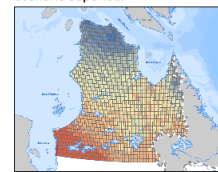


Horizon 2040-2064 : RCP 4.5

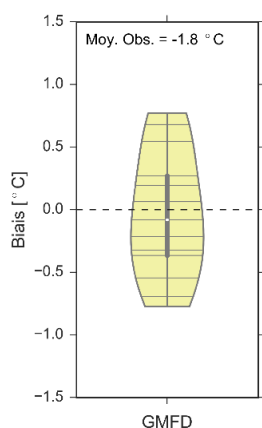
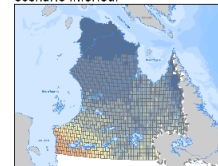
Médiane



Scénario supérieur

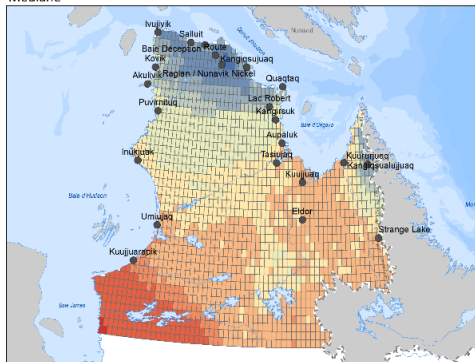


Scénario inférieur

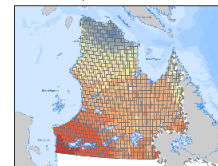


Horizon 2040-2064 : RCP 8.5

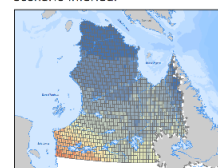
Médiane



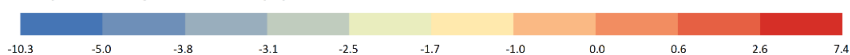
Scénario supérieur



Scénario inférieur



Température moyenne annuelle (°C)



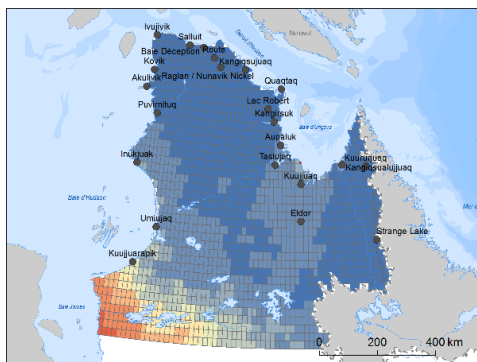
OURANOS **INRS**
UNIVERSITÉ DE RECHERCHE

Figure 2-7

Cartes de la température moyenne annuelle pour le climat de référence (en haut à gauche) et pour l'horizon 2040-2064 selon le scénario RCP 4.5 (carte centrale en haut) et le scénario RCP 8.5 (carte centrale en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux scénarios supérieur et inférieur pour chacun des scénarios RCP. Le diagramme en violon présente les biais entre les valeurs aux stations et aux points de grille du climat de référence (voir la figure 2.6 pour une description détaillée des diagrammes en violon).

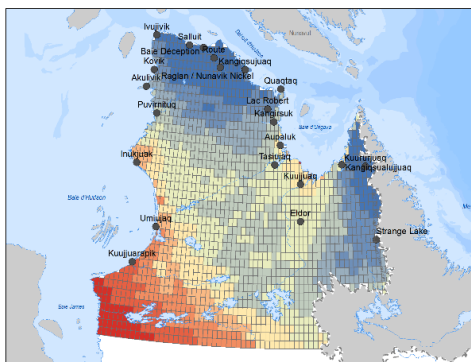
Référence 1980-2004

Ensemble MRC

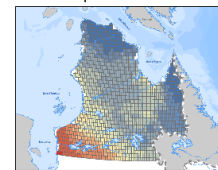


Horizon 2040-2064 : RCP 4.5

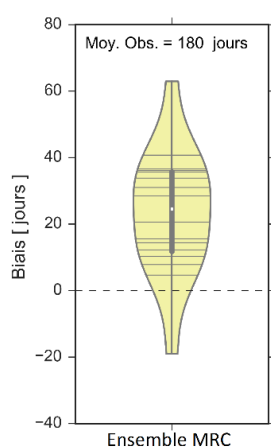
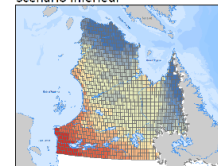
Médiane



Scénario supérieur

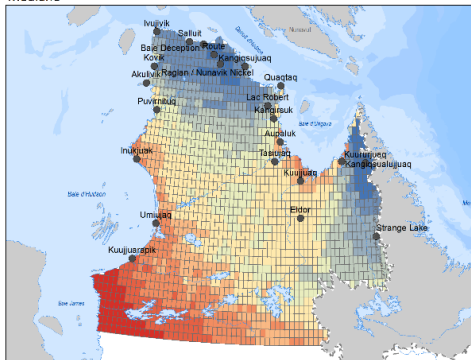


Scénario inférieur

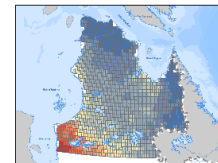


Horizon 2040-2064 : RCP 8.5

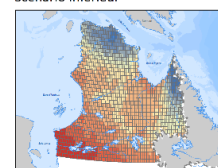
Médiane



Scénario supérieur



Scénario inférieur



Durée du couvert de neige (jours)

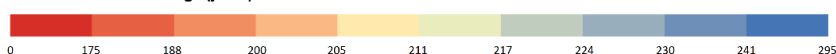


Figure 2-8

Cartes de la durée du couvert de neige pour le climat de référence (en haut à gauche) et pour l'horizon 2040-2064 selon le scénario RCP 4.5 (carte centrale en haut) et le scénario RCP 8.5 (carte centrale en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux scénarios supérieur et inférieur pour chacun des scénarios RCP. Le diagramme en violon présente les biais entre les valeurs aux stations et aux points de grille du climat de référence (voir la figure 2.6 pour une description détaillée des diagrammes en violon).

Afin d'avoir une idée de la dispersion des moyennes climatiques estimées à partir des différentes simulations, deux cartes intitulées 'Scénario supérieur' et 'Scénario inférieur' ont été disposées à droite de la carte des moyennes climatiques en période future. La carte 'Scénario supérieur' présente les moyennes climatiques de la simulation pour laquelle la variation de l'indicateur entre période future et de référence moyennée sur l'ensemble du territoire est la plus élevée alors que la carte 'Scénario inférieur' présente les moyennes climatiques de la simulation pour laquelle la variation de l'indicateur moyennée sur l'ensemble du territoire est la plus faible. Tout comme pour la carte des moyennes climatiques en climat futur, ces cartes sont construites en ajoutant au climat de référence les écarts simulés par la simulation retenue aux valeurs du climat de référence.

2.7.3 Graphiques de l'évolution temporelle des indicateurs à certains sites

Afin de présenter une information plus locale en climat futur et qui couvre toute la période 1950-2100, 22 sites ont été identifiés. La sélection de ces sites a été réalisée par les collaborateurs du projet en fonction de problématiques pour des études d'impacts et adaptation aux changements climatiques. La carte localisant ces sites est présentée à la figure 2.9 et le tableau 2.5 dresse la liste des sites avec certaines de leurs caractéristiques. La majorité de ces sites correspondent à des villages, les autres correspondants à des sites miniers, des routes, des parcs et sites de chasse et pêche.

Quatre indicateurs climatiques, parmi les plus pertinentes ont été retenus pour la production de cette information locale : 1) la température moyenne annuelle; 2) les précipitations totales annuelles; 3) la durée du couvert de neige; 4) la durée de la saison de croissance (voir tableaux 2.1 à 2.3 pour une description de ces indicateurs). Il est important de rappeler que l'ensemble utilisé pour décrire le climat de référence pour la température moyenne annuelle, les précipitations totales annuelles et la durée de la saison de croissance est GMFD alors que pour la durée du couvert de neige le climat de référence a été défini à partir de la médiane d'ensemble des MRC.

2.7.4 Tableaux des résultats aux sites sélectionnés

Des tableaux des valeurs des indicateurs pour le climat de référence (1980-2004) et pour les périodes futures (2040-2064 et 2076-2100) selon les scénarios RCP4.5 et 8.5 ont été produits en utilisant une procédure similaire à celle utilisée pour produire les graphiques de l'évolution temporelle de chacun

de ces indicateurs, c'est-à-dire en ajoutant la moyenne du climat de référence aux anomalies annuelles de chacune des simulations. Telle que mentionnée précédemment, cette procédure fait en sorte que la moyenne climatique des simulations sur la période 1980-2004 est égale à la moyenne climatique du climat de référence sur la même période.

Un graphique de l'évolution temporelle de chacun de ces indicateurs pour la période 1950-2100 a été produit pour chacun des sites. Les figures 2.10 et 2.11 présentent des exemples de ces graphiques pour le couvert de neige et la durée de la saison de croissance au site Akulivik respectivement. Ces deux exemples sont présentés puisque le climat de référence pour chacun d'eux est différent.

Les séries présentées sur ces graphiques ont été construites selon la procédure suivante. Tout d'abord la moyenne climatique l'indicateur pour la période 1980-2004 a été estimé pour chacune des simulations et pour le climat de référence. Les séries des anomalies (différence entre les valeurs annuelles de l'indicateur et la valeur moyenne simulée sur la période 1980-2004) ont été construites pour chacune des simulations. La moyenne climatique du climat de référence est ensuite ajoutée aux anomalies annuelles de chacune des simulations. Cette procédure fait en sorte que la moyenne climatique des simulations sur la période 1980-2004 est égale à la moyenne climatique du climat de référence sur la même période.

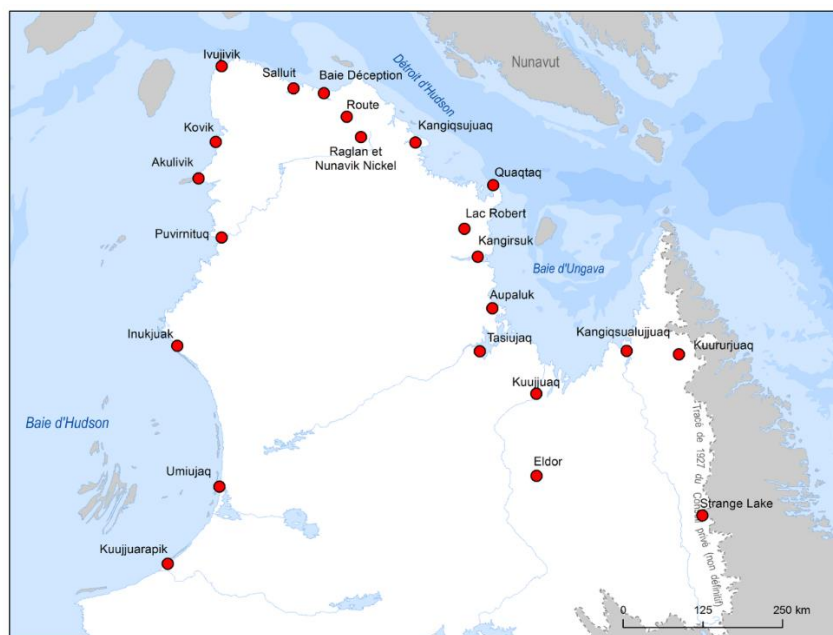


Figure 2-9 Carte des sites retenus (voir tableau 2.1).

Tableau 2-5 Liste des sites sélectionnés

Type	Nom	Longitude	Latitude
Village	Akulivik	-78.14	60.82
Village	Aupaluk	-69.61	59.31
Baie	Baie Déception	-74.76	62.2
Mine	Eldor	-68.4	56.95
Village	Inukjuak	-78.1	58.45
Village	Ivujivik	-77.9	62.42
Village	Kangiqsualujuaq	-65.95	58.69
Village	Kangiqsujuaq	-71.95	61.6
Village	Kangirsuk	-70.04	60.03
Site de villégiature/ pêche/chasse	Kovik	-77.78	61.36
Village	Kuujjuaq	-68.4	58.11
Village	Kuujjuarapik	-77.61	55.38
Parc national	Kuururjuaq	-64.54	58.61
Site de villégiature/ pêche/chasse	Lac Robert	-70.44	60.42
Village	Puvirnituq	-77.27	60.04
Village	Quaqtaq	-69.64	61.04
Mine	Raglan / Nunavik Nickel	-73.56	61.63
Route entre Baie Déception Raglan	Route	-74.02	61.9
Village	Salluit	-75.68	62.23
Mine	Strange Lake	64.17	56.32
Village	Tasiujaq	-69.93	58.7
Village	Umiujaq	-76.55	56.55

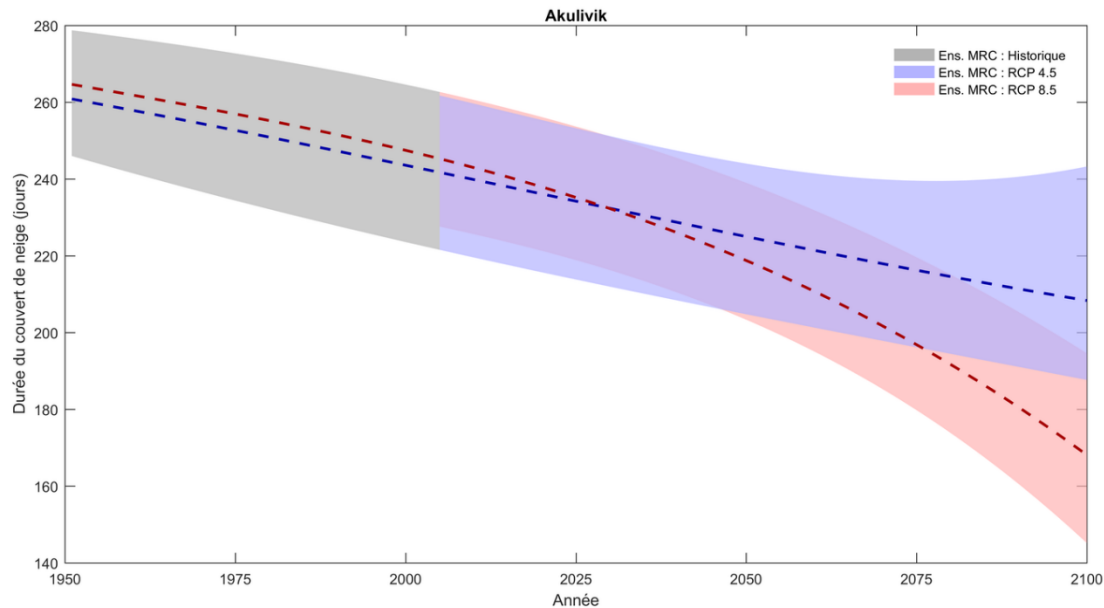


Figure 2-10 Évolution de la durée du couvert de neige au site Akulivik. Les lignes en tirets correspondent aux projections climatiques selon les scénarios RCP 4.5 (bleu) et RCP 8.5 (rouge) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs violet (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations sur la période 1950-2005.

Les courbes en tirets des figures 2.20 et 2.11 correspondent aux tendances climatiques de chacun des indices sur la période 1950-2100 selon le scénario RCP 4.5 (en bleu) et RCP 8.5 (en rouge). Ces courbes ont été construites en considérant, pour chaque année, la médiane des moyennes climatiques des simulations au site considéré pour toute la période 1950-2100. Un polynôme de degré 4 ou moins a ensuite été ajusté à cette série. Les paramètres et l'ordre du polynôme sont obtenus par minimisation de la somme des écarts entre les valeurs de la fonction et les médianes au carré.

Les enveloppes autour de chacune des lignes en tiret donnent une idée de la dispersion des séries simulées par les modèles climatiques. Elles ont été estimées en considérant, pour chaque année de la période 1950-2100, les moyennes climatiques maximales et minimales simulées. Un polynôme a ensuite été ajusté à ces séries (séries des moyennes climatiques maximales et minimales) selon une procédure similaire à celle décrite au paragraphe précédent pour la tendance médiane. L'enveloppe en bleu réfère au scénario RCP 4.5 et celle en rose au scénario RCP 8.5 pour la période 2006-2100 alors que l'enveloppe grise correspond à la période historique 1950-2005. Un

décalage peut apparaître entre les enveloppes roses et bleues (p. ex. à la figure 2.10) attribuable au fait que le nombre de simulations pour le scénario RCP 4.5 est différent du nombre de simulations pour le scénario RCP 8.5.

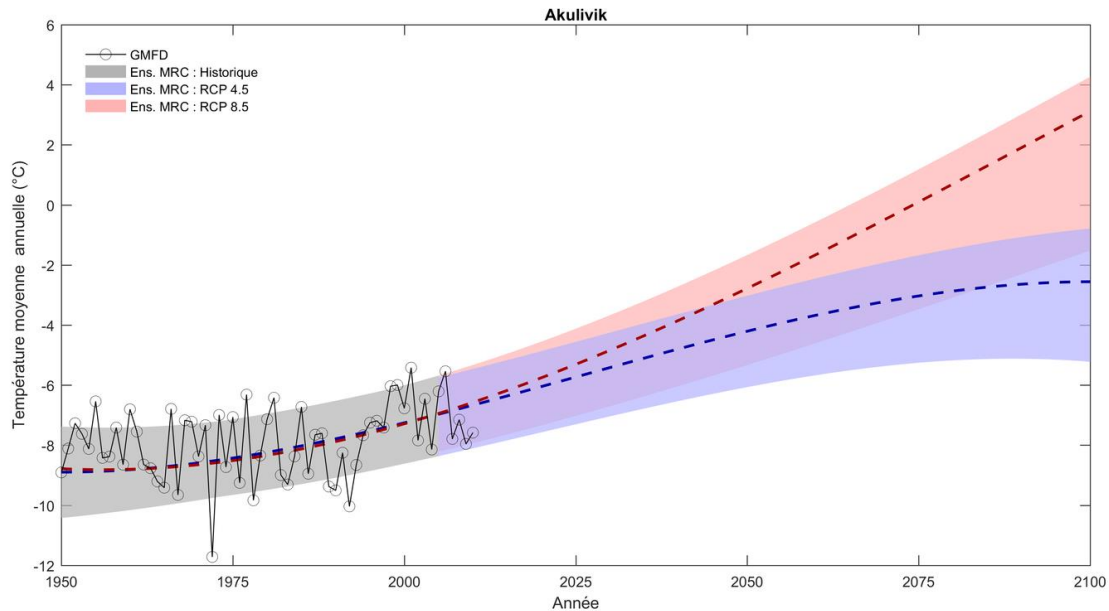


Figure 2-11 Évolution de la température moyenne annuelle au site Akulivik. Les lignes en tirets correspondent aux projections climatiques selon les scénarios RCP 4.5 (bleu) et RCP 8.5 (rouge) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs violet (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l’enveloppe de l’ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en gris correspond aux valeurs annuelles de GMFD utilisée pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l’enveloppe de l’ensemble des simulations sur la période 1950-2005.

Les valeurs apparaissant pour la période 1950-2010 dépendent du climat de référence retenu. Lorsqu’il s’agit de GMFD, les moyennes annuelles sont indiquées puisqu’elles sont représentatives des valeurs annuelles qui auraient été observées en ce site (cercles de la figure 2.9). Dans le cas où le climat de référence correspond à la médiane d’ensemble des MRC, seule l’enveloppe délimitant l’ensemble des simulations est présentée (tel qu’à la figure 2.10).

2.8 Synthèse

Les tableaux 2.6, 2.7 et 2.8 présentent les médianes des moyennes spatiales des changements simulés (période future – période référence) pour les indicateurs entre les deux périodes futures (2040-2064 et 2076-2100) et la période de référence (1980-2010). Ces valeurs donnent donc un aperçu des changements moyens anticipés pour chacun des indicateurs sur l'ensemble du territoire. Sur la base de ces résultats, les projections développées dans le cadre de ce projet ont permis de montrer que, de façon globale (les valeurs indiquées ci-dessous correspondent aux **moyennes régionales entre les périodes 2076-2100 et 1980-2004 pour le scénario RCP 8.5**; voir les tableaux 2.6, 2.7 et 2.8) :

- les températures moyennes annuelles augmenteront de façon dramatique par rapport à la période de référence sur l'ensemble du territoire; les variations moyennes régionales varient de 5.1 à 9.1°C (médiane à 8.3°C);
- les augmentations de température seront nettement plus marquées durant les mois d'hiver et ce peu importe la simulation considérée; ainsi les augmentations moyennes régionales pourront atteindre 13 à 14°C au mois de février alors qu'elles seront de l'ordre de 6°C à 7°C pour les mois de juin, juillet et août (figure 2.12 et tableau 2.6);
- ce réchauffement global aura des répercussions sur l'ensemble des indicateurs associés aux températures. Ainsi, de façon globale sur l'ensemble du territoire :
 - le début de la saison sans gel sera plus hâtif (31 jours) et sa fin plus tardive (35 jours) et la durée de la saison sans gel augmentera de 66 jours (la moyenne régionale en climat de référence est de 111 jours);
 - le nombre annuel de jours avec gel-dégel diminuera de 6 jours (la moyenne régionale en climat de référence est de 63 jours);
 - le nombre annuel de degrés-jours de dégel augmentera de 1160 DJ (la moyenne régionale en climat de référence est de 1098 DJ) et le nombre de degrés-jour de gel diminuera de 1873 DJ (la moyenne régionale en climat de référence est de 3201 DJ);
 - le début de la saison de croissance sera plus hâtif (29 jours) et la fin plus tardive (30 jours) résultant en une augmentation de la durée de la saison de croissance de 60 jours (la moyenne régionale en climat de référence est de 117 jours);

- les degrés-jours de croissance augmenteront de 843 DJ (la moyenne régionale en climat de référence est de 488 DJ);
- les degrés-jours de chauffage diminueront de 2856 DJ (la moyenne régionale en climat de référence est de 6808 DJ);
- le nombre de jours chauds et de nuits chaudes augmentera de 60 et 63 respectivement (les moyennes régionales en climat de référence sont de 42 jours chauds et 9 nuits chaudes);
- le nombre de jours de gel et englacés diminuera de 68 et 58 jours respectivement (les moyennes régionales en climat de référence sont de 251 et 188 jours respectivement);
- les températures nocturnes minimales, diurnes minimales, nocturnes maximales et diurnes maximales augmenteront; les températures nocturnes et diurnes minimales seront les plus affectées avec des variations moyennes de +15.6°C et 16.9°C alors que les températures nocturnes et diurnes maximales connaîtront des augmentations de l'ordre de 5.6°C à 5°C.
- les précipitations annuelles moyennes augmenteront de façon très appréciable sur l'ensemble du territoire, la médiane des variations des moyennes régionales à l'horizon 2076-2100 par rapport à la période de référence étant de 259 mm pour le scénario RCP 8.5 (la moyenne pour le climat de référence est 616 mm; tableau 2.7);
- les précipitations mensuelles augmenteront pour tous les mois avec des augmentations plus importantes durant la période d'octobre à janvier (figure 2.13);
- les fractions de précipitations sous forme solide augmenteront durant la période de décembre à février alors qu'elles diminueront de façon très importante au mois d'octobre et dans une moindre mesure au mois de septembre et novembre; la diminution en automne est attribuable à une augmentation des températures et donc à une augmentation de la fraction de précipitations liquides durant ces mois alors que l'augmentation en hiver s'explique par l'augmentation des précipitations durant ces mois qui malgré les augmentations de température durant ces mois, resteront majoritairement sous forme solide;
- les précipitations maximales annuelles sur 1 jour et 5 jours augmenteront de 9.9 et 15 mm/jour alors que les valeurs en climat de référence sont respectivement de 33.3 et 53.3 mm/jour;

- les 95^e et 99^e percentiles des précipitations journalières augmenteront de 2.8 et 5.5 mm/jour alors que les valeurs en climat de référence sont respectivement de 8.7 et 18.6 mm/jour;
- le nombre annuel de jours de précipitations très intenses et extrêmes augmenteront de 6 et 2 jours respectivement (les valeurs correspondantes en climat de référence sont de 5.5 et 1.1);
- pour les indicateurs associés au couvert de neige :
 - la date de début du couvert continu de neige est retardée de 32 jours alors que la date de fin du couvert continu de neige surviendra 29 jours plus tôt;
 - la durée du couvert de neige diminuera de 62 jours alors qu'elle est de 244 jours dans le climat de référence;
 - la hauteur de neige maximale diminuera de 10.2 cm alors que cette valeur est de 70.5 cm dans le climat de référence.

Il est important de noter que, de façon générale, les variations des différents indicateurs à l'horizon 2040-2064 par rapport à la période de référence 1980-2004 diffèrent peu selon que l'on considère le RCP 4.5 ou 8.5. La différence entre les deux RCP est toutefois très marquée à l'horizon 2076-2100 avec des variations nettement plus importantes pour le RCP 8.5.

Finalement il convient de noter que la distribution spatiale des indicateurs RX1day et RX5day produits par GMFD pour le climat de référence (voir Tome 2) demeure irréaliste et que conséquemment les projections de ces indicateurs en climat futur présentent également une distribution spatiale irréaliste. Il est donc non recommandé d'utiliser ces valeurs. Des analyses subséquentes devront être entreprises afin de corriger ces champs.

Tableau 2-6 Médiane des moyennes spatiales des changements projetés pour les indicateurs associés aux températures pour les deux périodes futures et les deux scénarios RCP. Les moyennes spatiales des changements minimaux et maximaux sont indiquées entre parenthèses. Les moyennes spatiales des indicateurs pour le climat de référence (GMFD) sont également présentées. Toutes les valeurs portent sur l'ensemble du territoire.

Indicateur (unité)	Médiane des moyennes spatiales des changements simulés (période future – période référence)				Moyenne spatiale climat de référence (1980-2004)
	H50 (2040-2064)		H85 (2076-2100)		
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
Température moyenne annuelle (°C)	3.3 (2.0:4.2)	4.5 (2.2:5.1)	4.4 (2.6:5.4)	8.3 (5.1:9.1)	-5.8
Température moyenne janvier (°C)	6.9 (3.9:8.7)	8.1 (4.4:9.4)	8.8 (4.6:10.2)	12.4 (7.9:16.0)	-24.2
Température moyenne février (°C)	5.2 (2.5:9.5)	7.4 (3.0:10.0)	6.9 (4.3:11.9)	13.5 (7.8:17.0)	-23.9
Température moyenne mars (°C)	4.9 (1.0:7.2)	5.5 (1.7:7.3)	6.5 (1.8:8.6)	10.9 (5.1:13.9)	-17.4
Température moyenne avril (°C)	2.5 (1.0:4.1)	3.3 (1.0:4.3)	3.9 (1.5:5.0)	7.5 (3.2:9.3)	-9.4
Température moyenne, mai (°C)	2.0 (1.5:2.7)	2.7 (1.4:3.4)	2.9 (1.4:3.8)	6.5 (4.2:8.2)	-0.5
Température moyenne juin (°C)	1.8 (1.0:4.0)	3.6 (1.2:6.1)	2.7 (1.0:6.1)	7.0 (2.9:10.6)	6.3
Température moyenne juillet (°C)	2.4 (1.1:3.1)	3.5 (1.4:4.8)	3.0 (1.8:4.1)	6.1 (3.2:7.7)	11.0
Température moyenne août (°C)	1.9 (1.2:2.8)	2.9 (2.0:3.5)	2.4 (1.7:3.3)	6.1 (3.3:6.9)	10.1
Température moyenne septembre (°C)	1.9 (1.1:2.5)	2.9 (1.5:3.5)	2.6 (1.5:3.5)	5.5 (3.4:6.2)	5.4
Température moyenne octobre (°C)	2.2 (1.2:2.7)	3.0 (2.1:3.8)	2.9 (1.7:3.7)	5.6 (3.5:6.8)	-0.8
Température moyenne novembre (°C)	3.2 (2.3:3.6)	4.3 (2.7:4.6)	3.8 (3.0:5.0)	6.6 (5.4:7.9)	-8.5
Température moyenne décembre (°C)	4.7 (3.2:5.6)	5.7 (3.9:7.0)	5.4 (4.6:6.3)	8.6 (7.7:11.2)	-18.0
Début de la saison sans gel (jours juliens)	-10 (-14:-5)	-13 (-19:-6)	-13 (-20:-6)	-31 (-36:-17)	158
Fin de la saison sans gel (jours juliens)	12 (9:16)	19 (12:20)	18 (11:22)	35 (26:38)	269
Durée de la saison sans gel (jours)	22 (15:29)	32 (18:38)	31 (17:41)	66 (46:73)	111
Gel-dégel (jours)	-2 (-5:0)	-5 (-7:2)	-4 (-7:-1)	-6 (-10:-3)	63
Degrés-jours de dégel annuel (DJ)	335 (185:434)	540 (229:640)	455 (241:604)	1160 (622:1299)	1098
Degrés-jours de gel annuel (DJ)	-872 (-1151:-503)	-1066 (-1223:-575)	-1145 (-1375:-682)	-1873 (-2051:-1241)	3201
Début de la saison de croissance (jour julien)	-10 (-14:-4)	-14 (-19:-6)	-13 (-19:-6)	-29 (-34:-19)	166
Fin de la saison de croissance (jour julien)	11 (7:13)	16 (11:18)	15 (9:18)	30 (22:33)	283
Durée de la saison de croissance (jours)	21 (11:27)	30 (17:35)	26 (19:37)	60 (41:65)	117
Degrés-jours de croissance (DJ)	241 (111:312)	390 (135:469)	327 (142:419)	843 (379:970)	488
Degrés-jours de chauffage (DJ)	-1169 (-1541:-706)	-1599 (-1811:-804)	-1575 (-1931:-917)	-2856 (-3147:-1850)	6808
Jours chauds (jours)	18 (6:24)	30 (9:33)	23 (8:31)	60 (23:63)	42
Nuits chaudes (jours)	15 (5:21)	27 (8:35)	21 (8:27)	63 (22:71)	9
Jours de gel (jours)	-25 (-30:-17)	-35 (-40:-22)	-33 (-41:-22)	-68 (-74:-52)	251
Jours englacés (jours)	-21 (-27:-16)	-28 (-35:-18)	-27 (-39:-19)	-58 (-67:-49)	188
Température nocturne minimale (°C)	5.7 (3.0:8.4)	7.8 (4.3:9.8)	7.8 (4.5:11.3)	15.6 (9.4:19.2)	-40.4
Température diurne minimale (°C)	6.6 (3.4:9.4)	9.6 (4.7:11.0)	8.8 (5.2:12.2)	16.9 (9.1:19.8)	-30.0
Température nocturne maximale (°C)	1.9 (1.2:2.9)	3.0 (1.6:3.7)	2.7 (1.8:3.2)	5.6 (3.4:6.9)	12.6
Température diurne maximale (°C)	1.8 (0.8:3.5)	3.5 (1.1:4.5)	2.5 (0.9:4.0)	5.0 (1.7:8.0)	22.4

Tableau 2-7 Médiane des moyennes spatiales des changements projetés pour les indicateurs associés aux précipitations pour les deux périodes futures et les deux scénarios RCP. Les moyennes spatiales des changements minimaux et maximaux sont indiquées entre parenthèses. Les moyennes spatiales des indicateurs pour le climat de référence (GMFD) sont également présentées. Toutes les valeurs portent sur l'ensemble du territoire.

Indicateur (unité)	Médiane des moyennes spatiales des changements simulés (période future – période référence)				Moyenne spatiale climat de référence (1980-2004)
	H50 (2040-2064)		H85 (2076-2100)		
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
Précipitation totale annuelle (mm)	120 (74:132)	140 (115:169)	145 (88:182)	259 (230:282)	616
Précipitation totale janvier (mm)	12 (7:15)	18 (12:22)	17 (10:22)	27 (23:33)	31
Précipitation totale février (mm)	6 (2:13)	11 (3:13)	11 (3:18)	21 (16:26)	25
Précipitation totale mars (mm)	8 (3:10)	10 (6:13)	11 (7:18)	20 (16:23)	33
Précipitation totale avril (mm)	11 (2:15)	10 (3:12)	8 (4:9)	16 (11:23)	33
Précipitation totale, mai (mm)	9 (6:14)	9 (6:17)	12 (9:18)	21 (15:26)	37
Précipitation totale juin (mm)	11 (4:18)	11 (4:15)	10 (-2:14)	24 (15:30)	59
Précipitation totale juillet (mm)	12 (-2:17)	9 (8:20)	12 (1:23)	18 (5:32)	76
Précipitation totale août (mm)	7 (2:16)	10 (-4:19)	11 (-5:16)	9 (7:24)	83
Précipitation totale septembre (mm)	7 (-2:11)	9 (6:19)	10 (1:16)	18 (14:24)	86
Précipitation totale octobre (mm)	10 (-1:14)	15 (10:22)	11 (6:20)	32 (27:43)	63
Précipitation totale novembre (mm)	11 (8:24)	17 (10:27)	16 (9:34)	25 (17:36)	52
Précipitation totale décembre (mm)	12 (5:15)	14 (10:16)	14 (11:16)	23 (20:27)	38
Précipitation maximale annuelle 1 jour (mm/jour)	3.7 (2.4:6.8)	5.6 (3.8:8.9)	4.7 (2.7:7.9)	9.9 (7.1:17.0)	33.3
Précipitation maximale annuelle 5 jours (mm/jour)	6.1 (2.4:8.8)	9.2 (6.4:12.1)	8.1 (2.9:10.6)	15.0 (11.3:21.4)	53.3
95e percentile des précipitations journalières (mm/jour)	1.2 (0.7:1.3)	1.6 (1.2:1.7)	1.6 (0.8:1.8)	2.8 (2.4:3.1)	8.7
99e percentile des précipitations journalières (mm/jour)	2.2 (1.3:2.6)	3.3 (2.2:4.1)	3.1 (1.1:3.7)	5.5 (4.5:6.4)	18.6
Jours de précipitations très intenses (jours)	2.3 (1.5:2.8)	3.4 (2.6:3.6)	3.1 (1.4:4.0)	6.3 (5.0:6.7)	5.5
Jours de précipitations extrêmes (jours)	0.7 (0.4:0.8)	1.1 (0.8:1.4)	1.0 (0.4:1.1)	2.0 (1.7:2.5)	1.1

Tableau 2-8 Médiane des moyennes spatiales des changements projetés pour les indicateurs associés aux précipitations sous forme solide et couvert de neige pour les deux périodes futures et les deux scénarios RCP. Les moyennes spatiales des changements minimaux et maximaux sont indiquées entre parenthèses. Les moyennes spatiales des indicateurs pour le climat de référence (médiane de l'ensemble des MRC) sont également présentées. Toutes les valeurs portent sur l'ensemble du territoire.

Indicateur (unité)	Médiane des moyennes spatiales des changements simulés (période future – période référence)				Moyenne spatiale climat de référence (1980-2004)
	H50 (2040-2064)		H85 (2076-2100)		
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
Précipitation solide annuelle (mm)	1 (-8:11)	-5 (-11:27)	2 (-7:10)	-31 (-43:6)	350
Précipitation solide mensuelle (janvier) (mm)	11 (6:13)	15 (11:19)	13 (8:17)	21 (16:25)	34
Précipitation solide mensuelle (février) (mm)	5 (2:11)	9 (3:12)	9 (3:14)	17 (13:21)	29
Précipitation solide mensuelle (mars) (mm)	4 (-0:7)	8 (1:10)	6 (4:12)	12 (2:17)	32
Précipitation solide mensuelle (avril) (mm)	1 (-2:8)	1 (-3:2)	-1 (-3:4)	-2 (-9:4)	35
Précipitation solide mensuelle (mai) (mm)	-5 (-8:3)	-6 (-10:2)	-6 (-12:1)	-15 (-21:-6)	28
Précipitation solide mensuelle (juin) (mm)	-2 (-9:-1)	-5 (-12:-1)	-3 (-11:-1)	-9 (-16:-1)	10
Précipitation solide mensuelle (juillet) (mm)	-1 (-2:-0)	-0 (-2:-0)	-1 (-2:-0)	-0 (-2:-0)	0.6
Précipitation solide mensuelle (août) (mm)	-0 (-2:-0)	-0 (-3:-0)	-0 (-3:-0)	-0 (-4:-0)	0.5
Précipitation solide mensuelle (septembre) (mm)	-4 (-13:-1)	-7 (-13:-1)	-5 (-13:-1)	-9 (-20:-1)	9.5
Précipitation solide mensuelle (octobre) (mm)	-12 (-19:-4)	-13 (-25:-6)	-16 (-25:-4)	-33 (-42:-8)	48
Précipitation solide mensuelle (novembre) (mm)	-2 (-13:7)	-4 (-15:9)	-2 (-17:5)	-20 (-30:1)	54
Précipitation solide mensuelle (décembre) (mm)	5 (2:13)	8 (1:11)	9 (2:11)	11 (-7:18)	46
Fraction des précipitations annuelles solides (%)	-4.3 (-6.7:-2.3)	-6.0 (-9.0:-3.3)	-5.8 (-8.9:-3.7)	-13.4 (-15.5:-7.2)	44
Fraction des précipitations solides (janvier) (%)	-0.9 (-3.2:0.2)	-1.8 (-4.9:-0.4)	-3.1 (-5.5:-0.8)	-7.8 (-21.9:-1.2)	98
Fraction des précipitations solides (février) (%)	-1.6 (-3.5:0.2)	-1.7 (-4.4:0.2)	-2.7 (-7.3:0.5)	-5.7 (-18.3:-4.0)	98
Fraction des précipitations solides (mars) (%)	-6.6 (-10.5:-0.8)	-5.6 (-9.8:-1.8)	-7.4 (-12.7:-1.9)	-9.8 (-22.3:-5.2)	95
Fraction des précipitations solides (avril) (%)	-7.4 (-13.8:-4.7)	-10.3 (-17.9:-6.9)	-10.3 (-15.3:-6.4)	-21.6 (-35.3:-12.6)	80
Fraction des précipitations solides (mai) (%)	-13.3 (-17.7:-6.0)	-15.5 (-20.2:-8.4)	-15.3 (-25.3:-8.2)	-33.6 (-40.5:-17.3)	56
Fraction des précipitations solides (juin) (%)	-5.5 (-15.0:-1.6)	-6.7 (-18.9:-1.6)	-5.5 (-16.7:-1.7)	-10.3 (-24.8:-2.0)	12
Fraction des précipitations solides (juillet) (%)	-0.7 (-2.0:-0.1)	-0.5 (-2.0:-0.1)	-0.7 (-2.0:-0.2)	-0.5 (-2.0:-0.2)	0.7
Fraction des précipitations solides (août) (%)	-0.3 (-1.9:-0.1)	-0.3 (-2.4:-0.1)	-0.3 (-2.4:-0.1)	-0.4 (-2.8:-0.1)	0.4
Fraction des précipitations solides (septembre) (%)	-4.8 (-11.8:-0.6)	-7.6 (-11.6:-0.7)	-5.5 (-11.1:-0.7)	-8.3 (-17.5:-1.0)	8.4
Fraction des précipitations solides (octobre) (%)	-18.3 (-21.1:-6.0)	-23.7 (-28.8:-8.3)	-21.9 (-29.4:-6.5)	-42.3 (-48.8:-10.5)	47
Fraction des précipitations solides (novembre) (%)	-16.4 (-27.4:-6.2)	-21.2 (-32.0:-6.0)	-22.9 (-35.9:-6.7)	-45.8 (-52.1:-25.2)	85
Fraction des précipitations solides (décembre) (%)	-7.5 (-13.3:-0.7)	-5.4 (-17.6:-0.9)	-8.1 (-15.4:-0.3)	-14.4 (-40.4:-6.6)	97
Début du couvert continu de neige (jours à partir du 1er août)	12 (8:13)	17 (8:18)	14 (10:21)	32 (25:36)	84
Fin du couvert continu de neige (jours à partir du 1er août)	-10 (-14:-4)	-15 (-19:-4)	-14 (-20:-4)	-29 (-36:-14)	320
Durée du couvert de neige (jours)	-21 (-26:-15)	-31 (-37:-13)	-29 (-40:-15)	-62 (-71:-42)	244
Hauteur de neige maximale (cm)	0.2 (-2.6:1.2)	-0.4 (-3.1:1.1)	-0.8 (-2.2:1.0)	-10.2 (-13.0:-0.3)	70.5

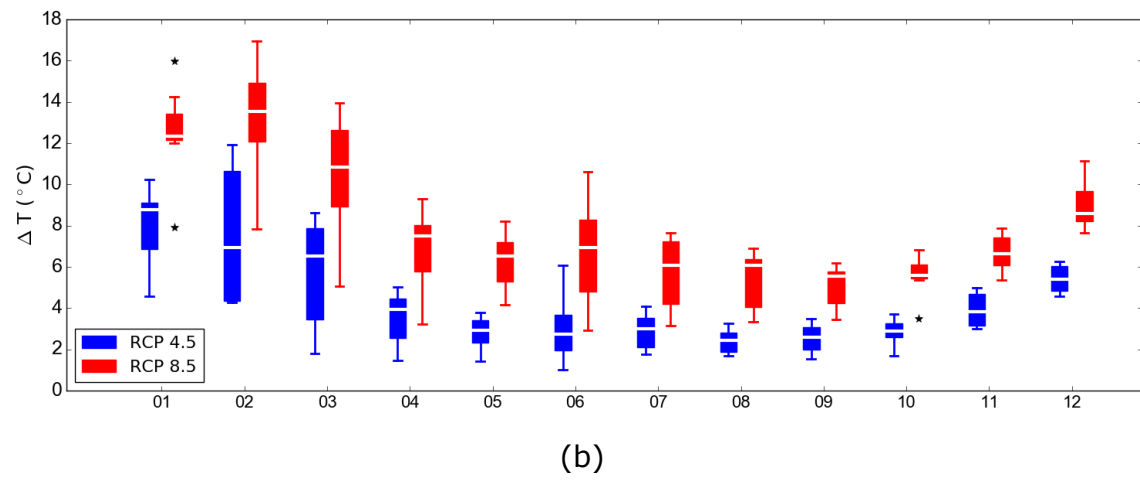
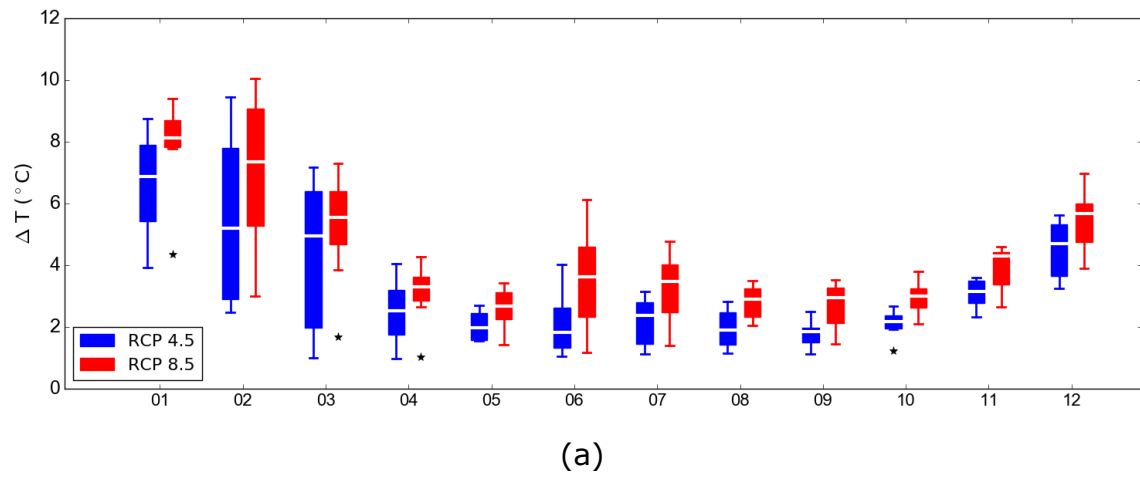
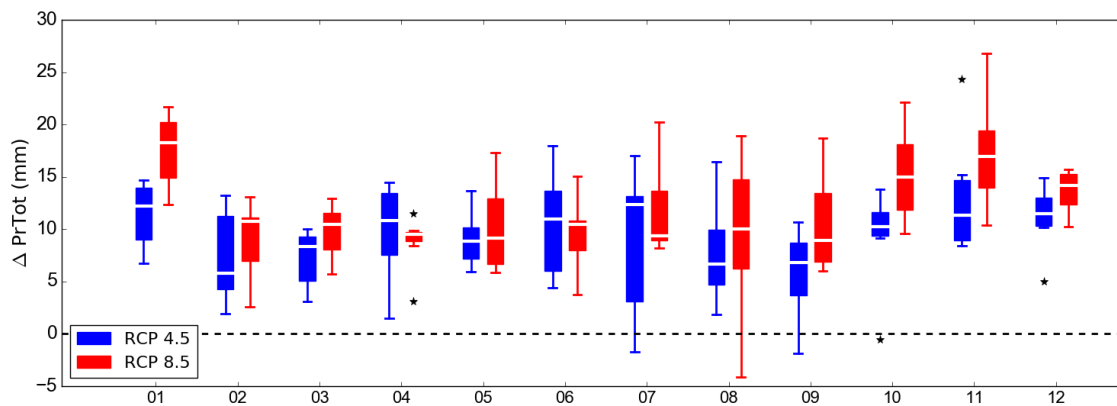
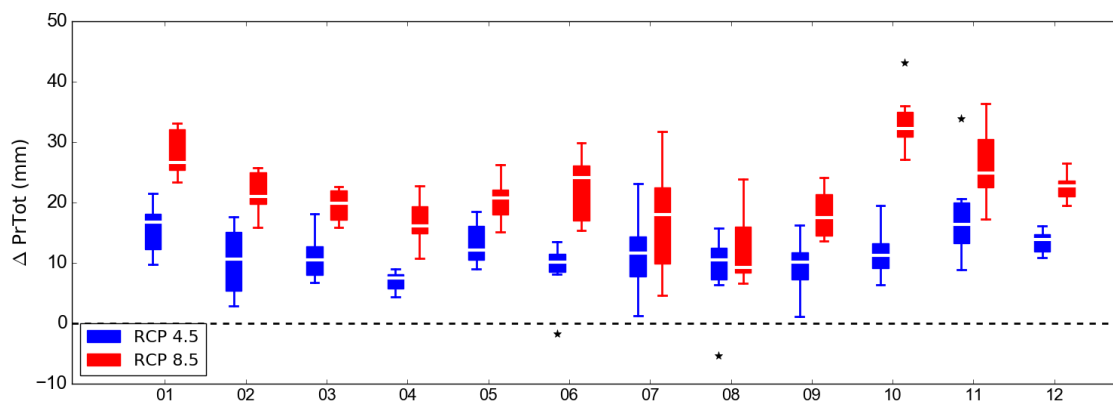


Figure 2-12 Boîtes à moustaches (box plot) des variations moyennes régionales des températures moyennes mensuelles pour la période : a) 2040-2064 et b) 2076-2100.

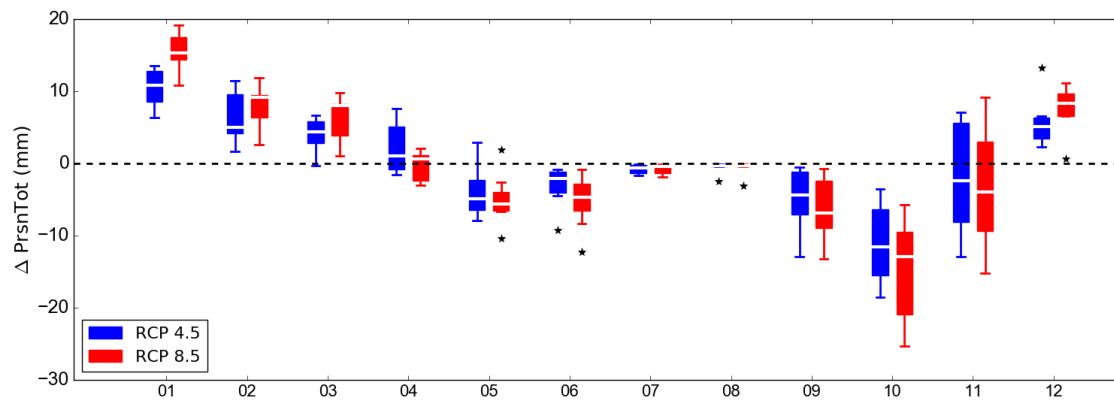


(a)

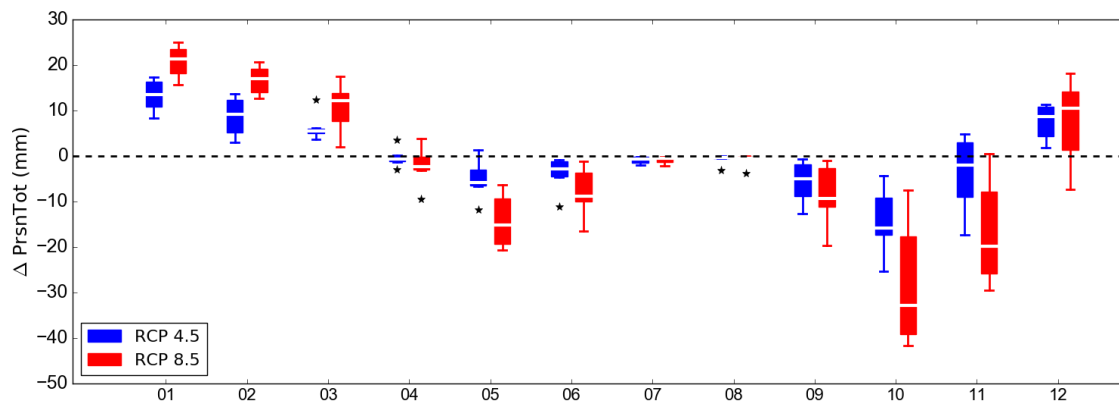


(b)

Figure 2-13 Boîtes à moustaches (box plot) des variations moyennes régionales des précipitations totales mensuelles pour la période : a) 2040-2064 et b) 2076-2100.



(a)



(b)

Figure 2-14 Boîtes à moustaches (box plot) des variations moyennes régionales des fractions mensuelles de précipitations sous forme de solide pour la période : a) 2040-2064 et b) 2076-2100.

2.9 Références

- Diaconescu E.P., Mailhot A., Brown R., Chaumont D. 2017. Evaluation of CORDEX-Arctic daily precipitation and temperature-based climate indices over Canadian Arctic land areas. Soumis à *Climate Dynamics*.
- IPCC. 2000. Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Nakicenovic N, Swart R (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds B, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Jenne R, Joseph D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, pp. 437-470.
- Kistler R., Kalnay E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., van den Dool, H., Jenne, R., Fiorino, M. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation, *Bulletin of the American Meteorological Society* 82(2), pp. 247-267.
- Laprise R. 2008. Regional climate modelling, *Journal of Computational Physics* 227(7), pp. 3641-3666.
- Sheffield J., Goteti G., Wood EF. 2006 Development of a 50-yr high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of Climate*, 19(13), pp. 3088-3111.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Rose, S. K. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1-2), pp. 5–31.

Chapitre 3 Les scénarios hydrologiques

Auteur: Catherine Guay, IREQ
Collaboratrice: Élyse Fournier, Ouranos



3.1 Mise en contexte

3.1.1 Mandat

Dans le cadre du projet *Élaboration du portrait climatique régional en climat futur en soutien à l'analyse des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques au Nunavik*, il a été convenu que l'IREQ, conjointement avec Ouranos, fournisse des données descriptives de l'hydrologie au nord du 55^e parallèle, et des impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique de cette région, plus particulièrement sur les débits moyens et les débits de crue.

Les résultats présentés proviennent de l'activité continue cQ2 réunissant Hydro-Québec (IREQ), la Direction de l'expertise hydrique (DEH, MDDELCC), Rio Tinto et Ouranos. La collaboration cQ2 a pour objectif de produire un message concerté sur l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie québécoise et de définir les bonnes pratiques en matière de modélisation hydroclimatique. Deux cycles de production de scénarios hydroclimatiques ont été complétés en 2012 et 2014 afin de suivre les mises à jour des données climatiques de la communauté internationale. Les résultats présentés ici sont tirés de l'édition 2014.

3.1.2 Objectif

L'objectif du présent chapitre est de décrire la démarche de modélisation utilisée pour la production de scénarios hydrologiques futurs dans le projet cQ2 et de présenter les principaux résultats.

En premier lieu, les données observées de météo et d'hydrométrie sont décrites pour les bassins versants de la région à l'étude. Par la suite, le modèle hydrologique HSAMI utilisé pour produire les scénarios hydrologiques est présenté, ainsi que son étalonnage. Les scénarios climatiques de l'ensemble et leur post-traitement sont également décrits.

Finalement, l'hydrologie de référence ainsi que les changements de débit moyen et de période de crue sont présentés.

3.2 Méthodologie

La modélisation hydroclimatique implique plusieurs étapes telle qu'illustrée à la figure 3-1. Chaque étape repose sur des hypothèses et possède ses limitations. Le niveau de confiance dans les scénarios hydrologiques obtenus dépend donc de plusieurs facteurs et des sources d'incertitude accumulées au fil de la chaîne de modélisation. Pour l'utilisateur des scénarios issus de cette démarche, il est essentiel de connaître les hypothèses et limitations sous-jacentes afin d'assurer une utilisation adéquate des données.

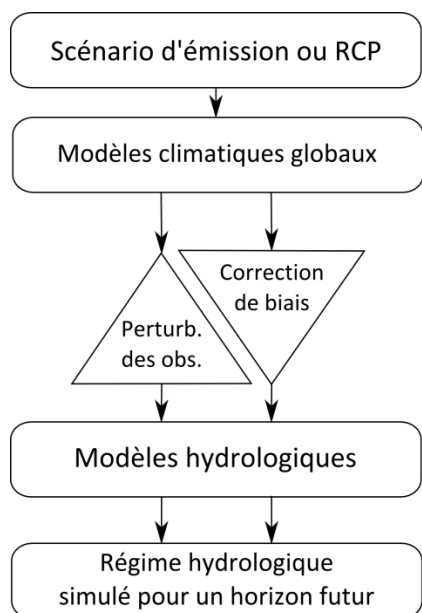


Figure 3-1 Chaîne de modélisation hydroclimatique

3.2.1 Bassins versants à l'étude

La base de données cQ2 comprend douze bassins versants situés au-delà du 55^e parallèle. Les contours de ces bassins sont présentés à la figure 3-2. Il s'agit exclusivement de rivières naturelles, *i.e.* dont l'écoulement n'est pas régulé par des infrastructures. Le tableau 3-2 liste le numéro d'identification de chacune des stations hydrométriques définissant l'exutoire des bassins et la superficie drainée à cette station. L'exutoire d'un bassin versant est défini comme étant l'issue par laquelle toute l'eau précipitant au-dessus d'un territoire s'écoule. Les superficies varient de 2 000 à 48 000 km².



Figure 3-2 Contours des bassins versants au nord du 55^e parallèle

Tableau 3-1 Superficie des bassins versants

ID station hydrométrique	Nom du cours d'eau	Superficie drainée (km ²)
093801	Grande Rivière de la Baleine	34 057
094206	Petite Rivière de la Baleine	7 631
095002	Nastapoca	14 177
096101	Innuksuac	11 179
102001	Arnaud	26 647
102004	Hamelin	4 156
102701	Aux Feuilles	41 739
103603	Aux Mélèzes	6 762
103702	Caniapiscou	48 132
103801	False	2 175
104001	À la Baleine	29 723
104803	George	23 926

3.2.2 Météorologie

Les données météo permettent l'étalonnage du modèle hydrologique, ainsi que la correction du biais des modèles climatiques. Plusieurs grilles de météo observée interpolée sont disponibles pour le Québec. Elles se distinguent par les stations météo utilisées, la méthode d'interpolation, les couvertures spatiale et temporelle et la résolution de la grille. Dans le cadre du projet cQ2, la grille produite par Ressources Naturelles Canada (Hutchinson et al. 2009) a été retenue puisqu'elle couvrait tout le Québec et reposait sur des données de stations météo validées par Environnement et Changement climatique Canada. Les variables journalières de températures minimales et maximales ainsi que les précipitations totales sont disponibles de 1961 à 2010, sur une grille d'une résolution de 10 km. Les données sont obtenues par interpolation à l'aide de la technique des splines trivariées de type plaques minces (Hutchinson 1995).

Il est important de noter que les stations météorologiques sont très dispersées et peu nombreuses dans la région à l'étude, comme en témoigne la figure 3-3 tirée de Hutchinson et al. (2009), et que cela peut avoir un impact sur la cohérence entre les variables météorologiques caractérisant un bassin versant et le débit observé pour ce même bassin. De plus, les stations se trouvent surtout sur les côtes où la dynamique météorologique peut être très différente de celle existant à l'intérieur des terres.

3.2.3 Hydrométrie

Chacun des bassins versants présentés au tableau 3-2 est défini en son exutoire par une station hydrométrique effectuant la mesure quotidienne du débit. Les données quotidiennes sont récupérées des archives de la DEH (MDDELCC). Le tableau 3-2 présente les caractéristiques des historiques de débit pour chaque bassin versant.

Les stations hydrométriques ont toutes été installées dans les années 60 et 70, et la longueur des historiques varie entre 8 et 49 ans. Le pourcentage de données manquantes est aussi indiqué puisqu'il existe fréquemment des périodes sans donnée dans des régions aussi éloignées. Le pourcentage de données manquantes varie de 0 à 35 %.



Figure 3-3 Stations météorologiques utilisées pour la mise en place de la grille météo de Ressources Naturelles Canada. Figure tirée de Hutchinson et al. (2009)

Tableau 3-2 Historique de débits observés des bassins versants

ID station hydrométrique	Nom du cours d'eau	Début de l'historique	Fin de l'historique	Nb d'années	% de données manquantes
093801	Grande Rivière de la Baleine	1962	2010	49	17
094206	Petite Rivière de la Baleine	1964	2002	39	6
095002	Nastapoca	1975	1992	18	3
096101	Innuksuac	1976	1983	8	3
102001	Arnaud	1963	1982	20	0
102004	Hamelin	1963	1979	17	1
102701	Aux Feuilles	1963	1987	25	2
103603	Aux Mélèzes	1963	1992	30	6
103702	Caniapiscou	1963	2010	48	23
103801	False	1973	1992	20	4
104001	À la Baleine	1963	2010	48	23
104803	George	1976	2010	35	35

La figure 3-4 montre la série de débit observé du bassin affichant le plus haut taux de données manquantes, celui de la rivière Georges. On y remarque que malgré la période manquante au début des années 2000, il existe dans la série un bon nombre d'années aux caractéristiques hydrologiques variées permettant une calibration adéquate du modèle hydrologique.

Le débit aux stations hydrométriques est obtenu indirectement par la mesure du niveau de l'eau (mesuré par des limnimètres) et une courbe de tarage ajustée au site. La courbe de tarage repose sur des jaugeages manuels effectués au site et le niveau mesuré correspondant. Pour ces raisons, la qualité de la donnée de débit dépend de la qualité de la courbe de tarage et de la fiabilité de la mesure du niveau de l'eau. Concernant ce dernier aspect, l'entretien régulier des limnimètres ainsi que le choix du site sont importants. L'entretien permet d'éviter une dérive de la mesure, et le site choisi doit présenter une bathymétrie régulière et connaître le moins possible d'effet de refoulement dû à la glace.

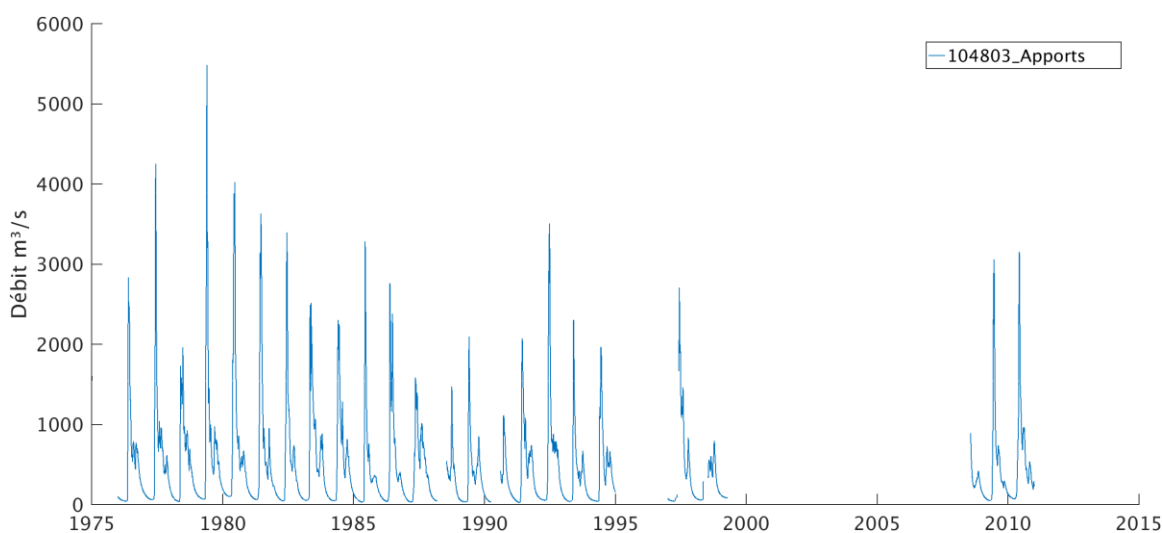


Figure 3-4 Exemple de série de débits avec un fort pourcentage de données manquantes

Afin d'identifier les sources possibles d'incertitude sur les débits, les séries de données de la DEH sont accompagnées de métadonnées renseignant sur la nature de la donnée. Les codes utilisés sont les suivants :

- E : La donnée est estimée.
- J : Un jaugeage a été exécuté à cette date.
- MC : La donnée représente un débit moyen converti.

- MJ : La donnée est une moyenne journalière.
- P : La donnée est provisoire.
- PL : La donnée correspond à la première lecture de niveau d'eau de la journée.
- R : Le débit est corrigé pour tenir compte de l'effet de refoulement.
- S : La donnée est saisie manuellement.

La figure 3-5 montre pour chacun des bassins de la région d'étude le pourcentage de données associé à chacun de ces codes. Il n'existe pas de métadonnées pour le bassin de la rivière Arnaud (102001) puisque les débits pour ce bassin proviennent d'une base de données d'Ouranos, et non des archives de la DEH.

Il apparaît d'abord qu'une proportion plutôt faible, comprise entre 2 et 12 % des données, est estimée. Ensuite, entre 30 et 72 % des séries sont formées de débits moyens convertis, et entre 14 et 57 % de débits corrigés pour le refoulement, ce qui est inévitable à ces latitudes. Finalement, une faible proportion (entre 7 et 14 %) des séries de cinq bassins correspond à une moyenne journalière.

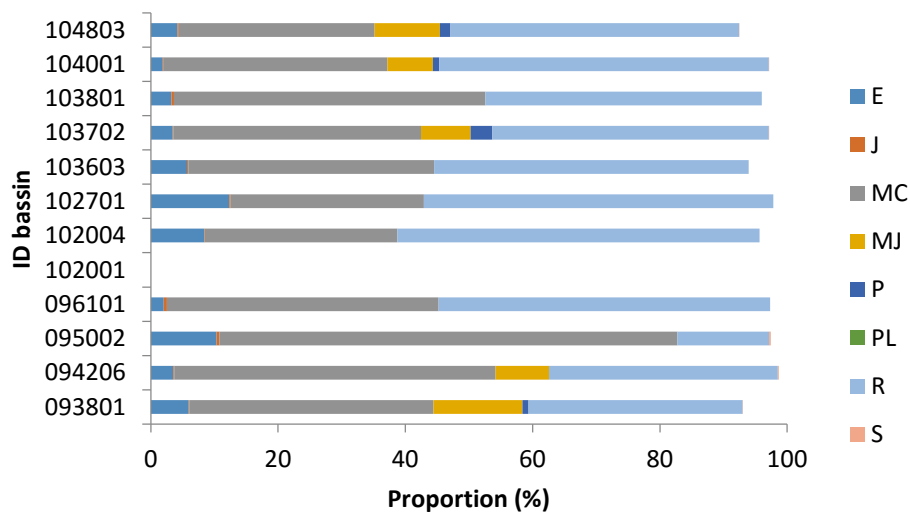


Figure 3-5 Proportion des codes par bassin

3.2.4 Modèle hydrologique pour la production de scénarios

3.2.4.1 HSAMI

Le modèle hydrologique HSAMI (Fortin 2000) est utilisé depuis plus de 30 ans à Hydro-Québec pour la prévision quotidienne des apports naturels aux barrages. Il s'agit d'un modèle global et conceptuel considérant l'évapotranspiration, l'accumulation et la fonte de la neige, le ruissellement de surface et hypodermique, l'écoulement vertical de l'eau dans les zones non-saturée et saturée du sol et l'acheminement de l'eau vers l'exutoire. Le caractère global du modèle signifie qu'il est appliqué à l'ensemble du bassin versant et n'est donc pas distribué spatialement. Les formulations mathématiques représentant les différents processus hydrologiques sont donc de nature plus conceptuelle que physique.

3.2.4.2 Étalonnage

Les modèles conceptuels comportent des paramètres qui doivent être étalonnés pour chaque bassin versant. La performance du modèle à reproduire les débits observés dépend évidemment de sa structure, mais aussi largement de ces paramètres. L'étalonnage vise à reproduire les débits observés à partir de la météo observée, et sa qualité dépend donc de ces deux sources de données et surtout de leur cohérence.

La méthode de calibration employée dans le projet cQ2 est décrite en détail dans Minville et al. (2014). Elle a pour but de reproduire adéquatement le débit observé, mais également le cycle annuel moyen de l'évapotranspiration (ÉT) tel que modélisé par le modèle régional canadien du climat (MRCC). Cette démarche vise à pallier le problème bien connu de la surestimation de l'ÉT en climat futur avec les formulations d'ÉT basées sur la température seulement (Lofgren et al. 2011), comme c'est le cas dans HSAMI.

En hydrologie, la performance d'une calibration est souvent mesurée par le coefficient de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe 1970) qui évalue l'erreur quadratique moyenne du modèle par rapport à un modèle de référence; la moyenne. Ce coefficient varie de $-\infty$ à 1. Plus la valeur s'approche de 1, meilleure est la capacité du modèle à reproduire le débit. Une valeur de 0 signifie que le modèle performe aussi bien que la moyenne.

La figure 3-6 montre les coefficients obtenus lors de l'exercice de calibration de cQ2 pour les bassins de la région à l'étude. Les valeurs sont présentées pour la période de calibration (les années paires), et la période de validation (années

impaires) pour lesquelles les données n'ont pas été utilisées pour entraîner le modèle. La figure montre des valeurs supérieures à 0.6 pour la plupart des bassins, témoignant d'une bonne capacité du modèle HSAMI à reproduire les débits observés. En effet, un coefficient de Nash-Sutcliffe supérieur à 0.5 est jugé comme étant satisfaisant (Moriasi et al. 2007). Le bassin Caniapiscaw présente les performances les moins satisfaisantes. À l'examen des débits simulés, il apparaît que le modèle tend à surestimer les débits pour ce bassin versant. Cela est à garder en tête lors de l'interprétation des résultats en contexte de changements climatiques.

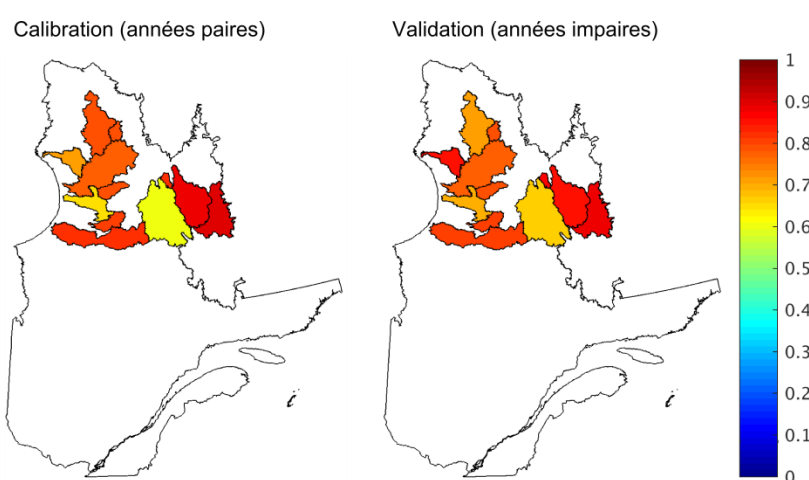


Figure 3-6 Coefficients de Nash-Sutcliffe obtenus lors de la calibration d'HSAMI

3.2.4.3 Indicateurs hydrologiques

Les indicateurs hydrologiques sont des valeurs permettant de caractériser le régime hydrologique d'une rivière. Dans ce rapport, trois indicateurs sont utilisés, soit (1) le débit annuel moyen (2), le débit de crue moyen et (3) le jour de début de la période de crue.

Le débit annuel moyen est l'indicateur le plus courant pour caractériser l'écoulement d'une rivière. Il s'agit de la moyenne de tous les débits journaliers d'une année. Il indique le volume d'eau moyen s'écoulant dans la rivière chaque année.

Le débit de crue moyen correspond à la moyenne des débits pendant la période de crue printanière, caractérisée par une remontée importante du débit dû au ruissellement de l'eau de fonte de la neige. C'est une indication importante des débits les plus élevés de l'année.

Le premier jour de la période de crue correspond au commencement de la remontée des eaux due à la fonte de la neige. Cette journée est déterminée objectivement à l'aide d'un algorithme qui détecte les changements de pente dans un hydrogramme. Cet indicateur renseigne sur le moment de transition entre l'hiver et le printemps hydrologique.

3.2.5 Scénarios climatiques

Les scénarios climatiques qui ont servi comme intrants pour la modélisation hydroclimatique proviennent de l'ensemble CMIP5 (Taylor et al. 2011). L'ensemble utilisé compte 29 modèles climatiques globaux provenant de différentes agences. Différents membres (conditions initiales du modèle) sont disponibles pour chaque modèle, et jusqu'à quatre scénarios de gaz à effet de serre (RCP) sont utilisés en entrée des modèles. Au total, l'ensemble compte 175 simulations. Deux horizons temporels sont disponibles, soit l'horizon 2050 et l'horizon 2080.

3.2.5.1 Post-traitement

Les simulations avec les modèles climatiques sont toutes des réalisations possibles du climat, et sont souvent biaisées lorsqu'on les compare aux observations sur la période de référence. Pour cette raison, il est d'usage d'effectuer un post-traitement des séries pour en réduire le biais.

Dans le projet cQ2, deux méthodes de post-traitement ont été utilisées, soit la perturbation des observations et la correction de biais par quantiles (Mpelasoka & Chiew 2009; Willems & Vrac 2011). Ce sont ces scénarios post-traités qui servent d'intrant au modèle hydrologique pour produire l'hydrologie future. Puisqu'il existe deux méthodes de post-traitement, le nombre de scénarios disponibles passe de 175 à 350. Dans le cadre de la présente étude, seuls les scénarios provenant des RCP 4.5 (100 scénarios) et 8.5 (92 scénarios) sont présentés.

3.3 Résultats

3.3.1 Description des résultats

Les résultats présentés dans cette section proviennent de la chaîne de modélisation présentée à la figure 3-6. L'hydrologie reconstituée est présentée sur la période de référence (1970-2000). Elle est simulée par le modèle HSAMI avec la grille météo observée comme intrant. La moyenne et l'écart-type des débits moyens annuels sur la période sont présentés.

La production de l'hydrologie future du Nunavik nécessite quelques étapes de calcul. Premièrement, des simulations hydrologiques sont produites par le modèle hydrologique HSAMI avec les simulations climatiques provenant de l'ensemble CMIP5. Tel que mentionné à la section 3.2.6.1, 175 simulations climatiques sont utilisées pour chaque scénario de gaz à effet de serre; elles produisent 175 simulations hydrologiques. Ces simulations hydrologiques sont produites sur la période de référence ainsi que sur les horizons 2050 et 2080. Les valeurs de changements sont calculées entre les horizons futurs et la période de référence pour chacune des simulations. Une fois les 175 valeurs de changements obtenues pour chaque horizon, il est possible de calculer les percentiles pour présenter l'étendue des changements possibles. Les 25^e, 50^e (médiane) et 75^e percentiles de l'ensemble de changements sont présentés dans les tableaux, et ce, pour deux scénarios RCPs (4.5 et 8.5) et pour les deux horizons temporels 2050 (H50) et 2080 (H80).

3.3.1.1 Cartes

Les résultats sont également présentés sous forme de cartes aux figures 3-7 à 3-12. Les cartes présentent des résultats très similaires aux tableaux décrits à la section 3.3.1.1. Les valeurs de changements futurs ont été ajoutées à la moyenne des valeurs de référence pour produire une valeur future absolue, et ce pour les 25^e, 50^e (médiane) et 75^e percentiles. Les résultats ont également été divisés par la superficie des bassins dans le cas du débit annuel moyen et du débit de crue moyen (voir tableau 3-1). Ceci permet les comparaisons interbassins.

3.3.2 Débit annuel moyen

Le débit annuel moyen est typiquement dépendant de la superficie d'un bassin versant. En général, plus la superficie d'un bassin versant est grande, plus son débit annuel moyen est grand. Les débits annuels moyens des bassins versants du Nunavik varient grandement, en partie parce que la superficie des bassins

versants est très variable. Le plus petit débit annuel moyen est observé à la rivière False, il est de 26.4 m³/s, alors que le plus grand est observé à la rivière Aux Feuilles, il est de 530 m³/s. Ces deux bassins versants sont respectivement le plus petit et le plus grand des bassins versants à l'étude. Les cartes présentées aux figures 3-7 et 3-8 présentent le débit annuel moyen spécifique, c'est-à-dire rapporté au kilomètre carré pour permettre les comparaisons interbassins. Ce dernier varie de 0.0104 m³s⁻¹/km² à 0.0191 m³s⁻¹/km².

Les résultats suggèrent que le débit annuel moyen augmentera pour tous les bassins versants, et ce en considérant les 25^e, 50^e (médiane) et 75^e percentiles de l'ensemble pour les deux scénarios de gaz à effet de serre et pour les deux horizons futurs. Les augmentations sont plus importantes pour le RCP8.5 que pour le RCP4.5. Les augmentations sont également plus importantes à l'horizon 2080 qu'à l'horizon 2050. Indépendamment des percentiles, des RCPs et des horizons temporels, les augmentations varient de +0.0005 m³s⁻¹/km² à +0.0056 m³s⁻¹/km² (ou 3 % à 47 % par rapport aux débits de la période de référence). Ces augmentations découlent de l'augmentation générale des précipitations sur le territoire, supérieure à l'augmentation des processus d'évaporation.

3.3.3 Débit moyen de crue

Tout comme le débit annuel moyen, le débit de crue moyen est typiquement dépendant de la superficie d'un bassin versant. En général, plus la superficie d'un bassin versant est grande, plus son débit de crue moyen est grand. Le plus petit débit de crue moyen est observé à la rivière False, il est de 125.3 m³/s alors que le plus grand débit de crue moyen est observé à la rivière À la Baleine où il atteint 2267.4 m³/s. Les cartes présentées aux figures 3-9 et 3-10 présentent le débit de crue moyen spécifique. Ce dernier varie de 0.0204 m³s⁻¹/km² à 0.0790 m³s⁻¹/km².

Pour le débit moyen de crue, les résultats montrent également des augmentations pour les 25^e, 50^e (médiane) et 75^e percentiles de l'ensemble, pour les deux scénarios de gaz à effet de serre et pour les deux horizons futurs. Comme pour les débits annuels moyens, les augmentations sont plus importantes pour le scénario de gaz à effet de serre le plus élevé et pour l'horizon temporel le plus éloigné. Les augmentations varient de 0.0010 m³s⁻¹/km² à 0.0224 m³s⁻¹/km² (2 % à 52 %) indépendamment des percentiles, des RCPs et des horizons temporels.

3.3.4 Jour de début de la période de crue

La crue la plus hâtive sur le territoire du Nunavik est observée à la Grande rivière à la Baleine, elle débute au 129^e jour de l'année. La crue la plus tardive est observée à la rivière Hamelin, elle débute au 159^e jour de l'année.

La crue débutera de façon plus hâtive selon tous les résultats calculés à l'exception du 75^e percentile à l'horizon 2050 pour les deux RCPs et à l'horizon 2080 pour le RCP 4.5 pour le bassin versant de la Grande Rivière à la Baleine. En général, le devancement sera plus important pour le RCP 8.5 et pour l'horizon 2080. Le devancement pourrait aller jusqu'à 28 jours dans le cas de la rivière Innuksuac.

Tableau 3-3 Moyenne et écart-type des débits annuels moyens reconstitués pour la période de référence (1970-2000) et changements du débit annuel moyen projetés pour les 25^e, 50^e et 75^e percentiles de l'ensemble pour les RCP4.5 et RCP8.5 selon les horizons H50 et H80.

ID	Nom	Débit reconstitué (1970-2000)		Changement de débit annuel moyen (H50)						Changement de débit annuel moyen (H80)					
		Moyenne	Écart-type	RCP4.5 (m³/s)			RCP8.5 (m³/s)			RCP4.5 (m³/s)			RCP8.5 (m³/s)		
		m³/s	m³/s	25e	50e	75e	25e	50e	75e	25e	50e	75e	25e	50e	75e
093801	Grande Rivière de la Baleine	526.5	336.5	41.6	56.4	80.2	56.8	79.6	116.5	46.3	73.0	97.0	79.0	102.0	150.3
094206	Petite Rivière de la Baleine	108.2	63.0	9.5	12.0	15.7	12.8	15.2	22.6	9.7	15.6	21.5	16.1	21.0	33.5
095002	Nastapoca	201.0	118.8	21.7	28.0	39.4	27.4	34.1	47.5	23.9	35.4	45.0	42.2	49.8	73.0
096101	Innuksuac	116.5	66.2	13.2	17.7	22.6	17.2	23.3	32.0	14.6	23.0	30.0	26.3	34.9	49.9
102001	Arnaud	304.2	344.1	39.4	52.4	65.8	58.4	71.1	91.2	51.9	71.5	81.0	86.4	110.5	148.4
102004	Hamelin	45.7	67.4	5.1	7.0	8.6	7.1	8.8	12.3	6.5	9.0	11.3	10.0	13.5	18.5
102701	Aux Feuilles	529.9	628.9	53.8	85.9	107.1	78.4	110.7	129.1	70.7	108.0	126.3	120.3	151.2	199.2
103603	Aux Mélèzes	86.2	131.0	6.9	10.7	13.7	8.6	15.6	19.1	7.0	13.2	18.9	16.0	21.5	31.1
103801	False	26.4	39.4	1.5	3.5	4.2	2.9	4.4	6.6	2.6	3.5	6.2	4.8	6.9	9.0
104001	À la Baleine	466.2	701.4	13.7	46.5	60.0	32.1	63.8	90.3	27.0	45.4	83.9	57.0	92.6	124.4
104803	George	456.0	603.1	18.1	50.0	60.7	25.5	52.1	82.0	27.9	51.6	79.4	47.3	80.8	120.5

Tableau 3-4 Moyenne et écart-type des débits moyens de crue reconstitués pour la période de référence (1970-2000) et changements du débit de crue moyen projetés pour les 25^e, 50^e et 75^e percentiles de l'ensemble pour les RCP4.5 et RCP8.5 selon les horizons H50 et H80.

ID	Nom	Débit moyen de crue reconstitué (1970-2000)		Changement de débit de crue moyen (H50)						Changement de débit de crue moyen (H80)					
		Moyenne	Écart-type	RCP4.5 (m³/s)			RCP8.5 (m³/s)			RCP4.5 (m³/s)			RCP8.5 (m³/s)		
		m³/s	m³/s	25e	50e	75e	25e	50e	75e	25e	50e	75e	25e	50e	75e
093801	Grande Rivière de la Baleine	830.5	156.6	181.2	226.9	292.2	211.7	247.6	332.7	152.7	254.4	341.0	219.4	340.6	378.2
094206	Petite Rivière de la Baleine	182.7	34.6	27.2	38.9	54.6	30.9	45.6	57.7	28.2	47.6	58.8	35.3	54.4	72.5
095002	Nastapoca	311.6	40.9	13.8	37.9	48.2	31.2	46.2	64.9	18.5	50.2	76.1	61.9	80.7	101.9
096101	Innuksuac	228.3	55.4	19.7	30.6	38.0	26.7	36.7	51.5	26.7	38.8	56.8	33.7	66.6	74.5
102001	Arnaud	1051.7	229.7	41.4	108.9	170.1	57.1	134.5	214.8	70.7	151.7	233.7	80.8	217.3	300.3
102004	Hamelin	200.4	40.9	6.4	13.3	26.8	8.3	19.9	34.9	7.7	21.9	36.3	12.2	24.9	44.4
102701	Aux Feuilles	2117.0	562.6	143.0	225.8	348.0	162.7	329.4	454.6	187.6	232.3	522.5	288.5	429.2	532.7
103603	Aux Mélézes	406.4	105.9	26.2	40.4	58.6	48.0	63.9	86.5	29.3	50.6	91.9	68.4	89.1	114.9
103801	False	125.3	25.3	6.1	12.5	17.6	10.7	14.8	21.4	7.7	16.4	22.2	10.6	19.0	23.7
104001	À la Baleine	2267.4	500.1	61.8	177.1	260.2	145.2	268.2	324.7	92.4	250.2	400.7	238.3	335.5	464.7
104803	George	1889.4	507.6	34.5	190.3	390.1	114.1	209.3	415.3	50.4	230.9	423.0	113.2	369.4	536.3

Tableau 3-5 Moyenne et écart-type du jour de début de la crue reconstitué pour la période de référence (1970-2000) et changements du jour de début de la crue projeté pour les 25^e, 50^e et 75^e percentiles de l'ensemble pour les RCP4.5 et RCP8.5 selon les horizons H50 et H80.

ID	Nom	Jour de début de crue reconstitué (1970-2000)		Changement du jour de début de crue (H50)						Changement du jour de début de crue (H80)					
		Moyenne	Écart-type	RCP4.5 (jours)			RCP8.5 (jours)			RCP4.5 (jours)			RCP8.5 (jours)		
				25e	50e	75e	25e	50e	75e	25e	50e	75e	25e	50e	75e
093801	Grande Rivière de la Baleine	129	9.3	-5.4	-0.3	2.5	-9.1	-2.6	0.3	-8.4	-3.1	1.1	-15.5	-10.7	-5.2
094206	Petite Rivière de la Baleine	143	9.0	-6.9	-3.9	-0.5	-9.4	-6.5	-1.6	-10.1	-6.2	-1.2	-18.7	-12.5	-8.3
095002	Nastapoca	144	10.0	-9.8	-7.6	-6.1	-11.5	-8.9	-6.9	-11.4	-9.7	-5.6	-19.7	-16.3	-9.6
096101	Innuksuac	153	10.1	-13.5	-8.1	-5.7	-14.1	-12.3	-8.5	-19.6	-10.6	-6.5	-28.0	-20.1	-15.0
102001	Arnaud	156	10.4	-17.9	-9.5	-7.1	-15.3	-13.3	-8.8	-16.8	-11.5	-7.2	-25.9	-23.4	-16.1
102004	Hamelin	159	10.3	-13.4	-9.1	-5.8	-14.9	-12.9	-8.6	-15.7	-11.3	-7.4	-26.2	-22.6	-15.7
102701	Aux Feuilles	146	10.3	-13.1	-7.4	-5.5	-14.0	-12.1	-8.3	-17.8	-10.0	-6.5	-26.6	-18.8	-14.3
103603	Aux Mélézes	138	10.3	-12.7	-7.9	-4.9	-12.4	-9.9	-7.2	-15.8	-9.5	-6.2	-24.2	-16.9	-12.6
103801	False	133	10.7	-11.6	-6.6	-3.9	-13.5	-8.9	-6.6	-14.1	-8.2	-5.1	-24.0	-16.5	-12.6
104001	À la Baleine	140	11.5	-11.9	-7.7	-4.0	-13.8	-9.3	-7.4	-13.9	-8.4	-5.5	-23.7	-16.3	-12.6
104803	George	140	12.3	-10.5	-8.1	-6.1	-15.1	-9.8	-7.7	-14.1	-9.8	-7.6	-25.2	-17.6	-13.5

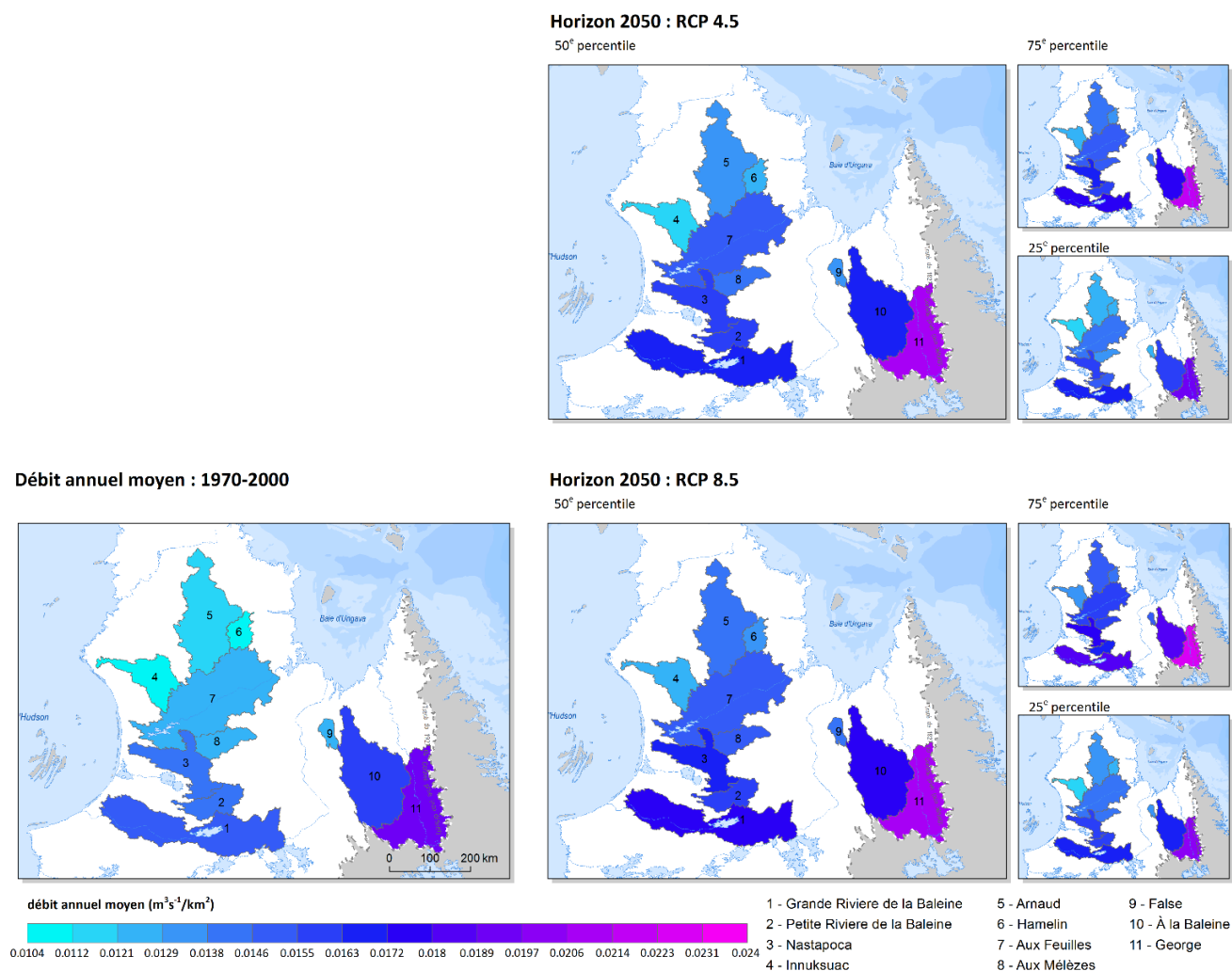


Figure 3-7 Cartes du débit annuel moyen spécifique de référence (en bas à gauche) et pour l'horizon 2050 selon le scénario RCP 4.5 (milieu et droite en haut) et le scénario RCP 8.5 (milieu et droite en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux 75^e et 25^e percentiles de l'ensemble pour chacun des scénarios RCP.

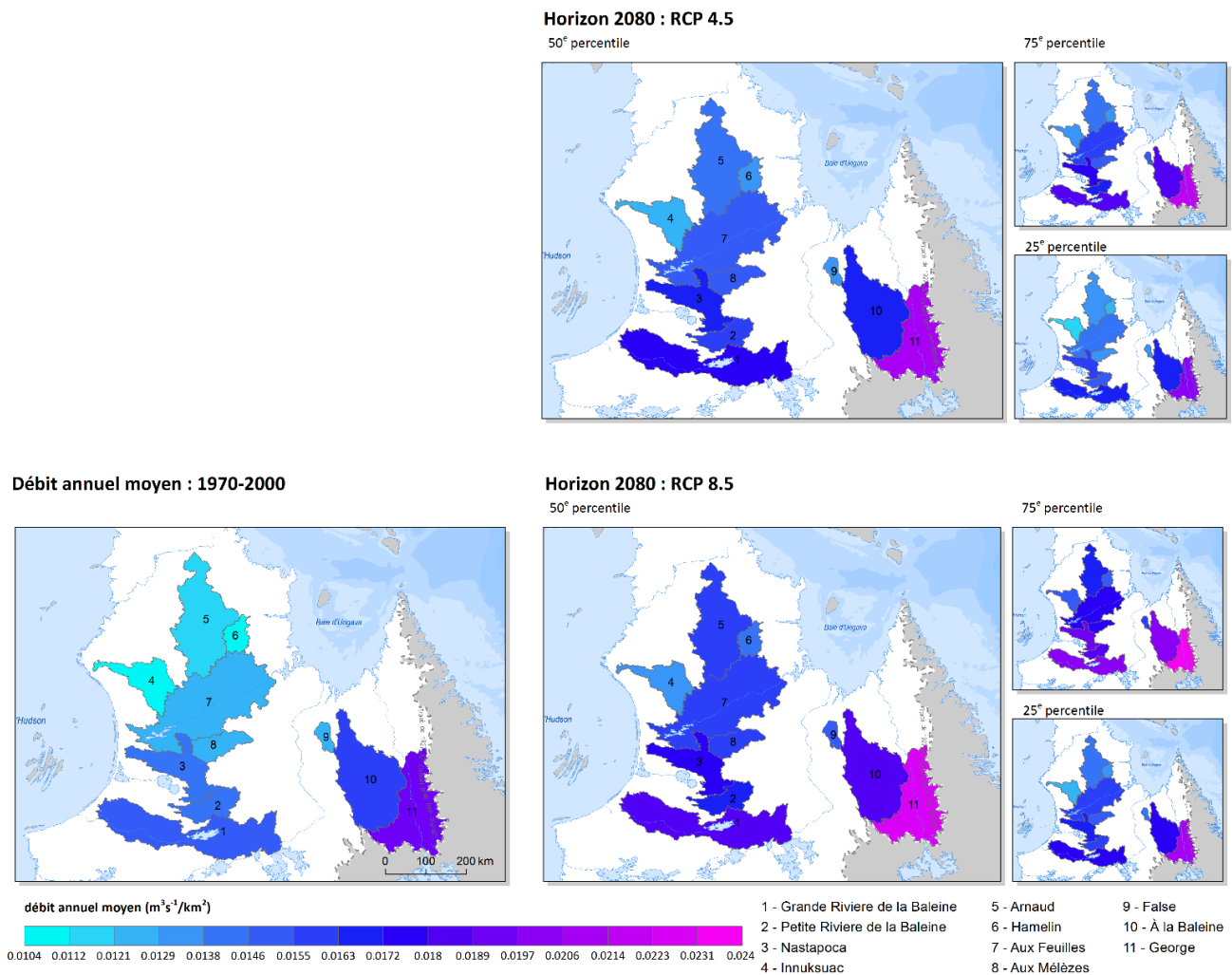


Figure 3-8 Cartes du débit annuel moyen spécifique de référence (en bas à gauche) et pour l'horizon 2080 selon le scénario RCP 4.5 (milieu et droite en haut) et le scénario RCP 8.5 (milieu et droite en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux 75^e et 25^e percentiles de l'ensemble pour chacun des scénarios RCP.

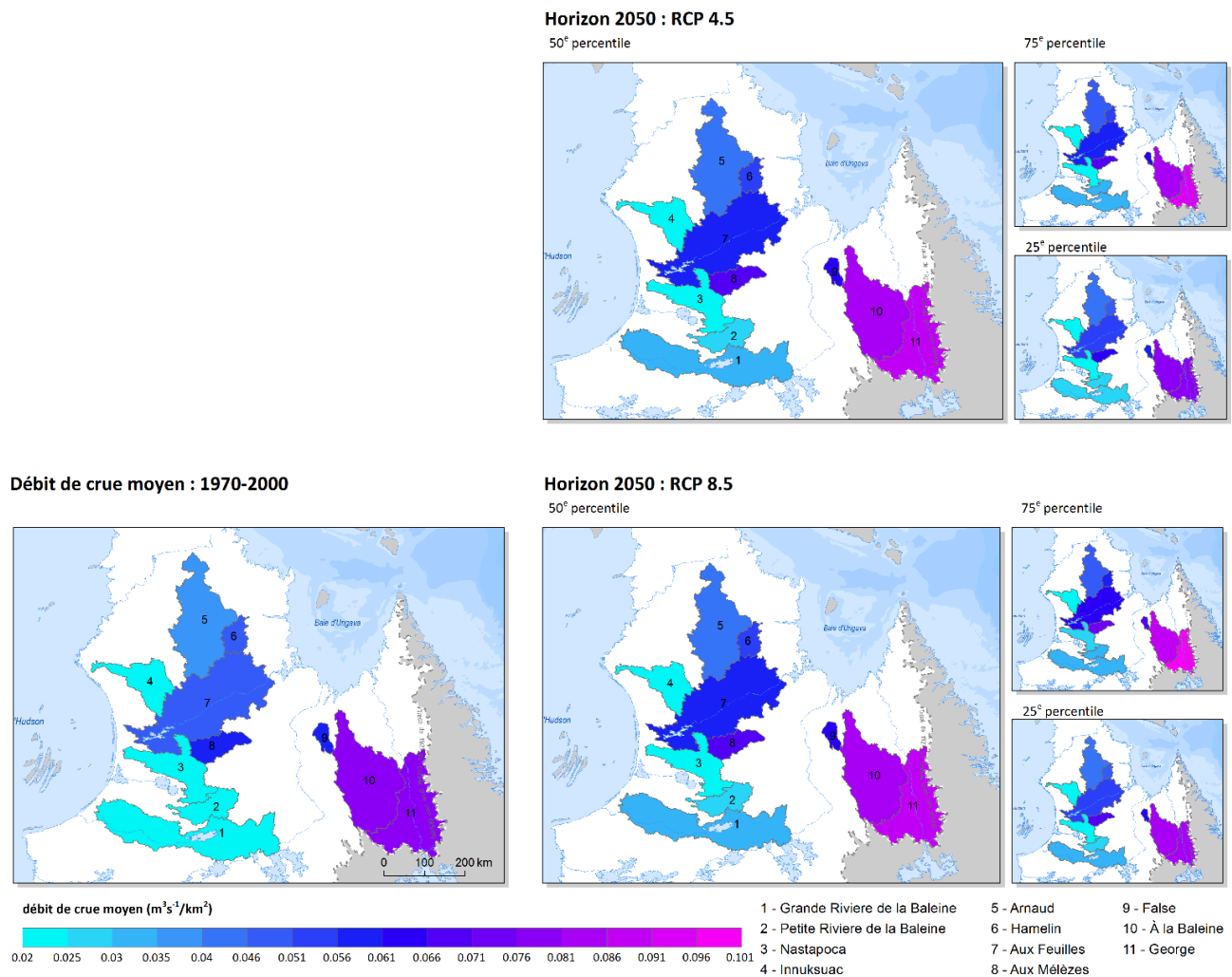


Figure 3-9 Cartes du débit de crue moyen spécifique de référence (en bas à gauche) et pour l'horizon 2050 selon le scénario RCP 4.5 (milieu et droite en haut) et le scénario RCP 8.5 (milieu et droite en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux 75^e et 25^e percentiles de l'ensemble pour chacun des scénarios RCP.

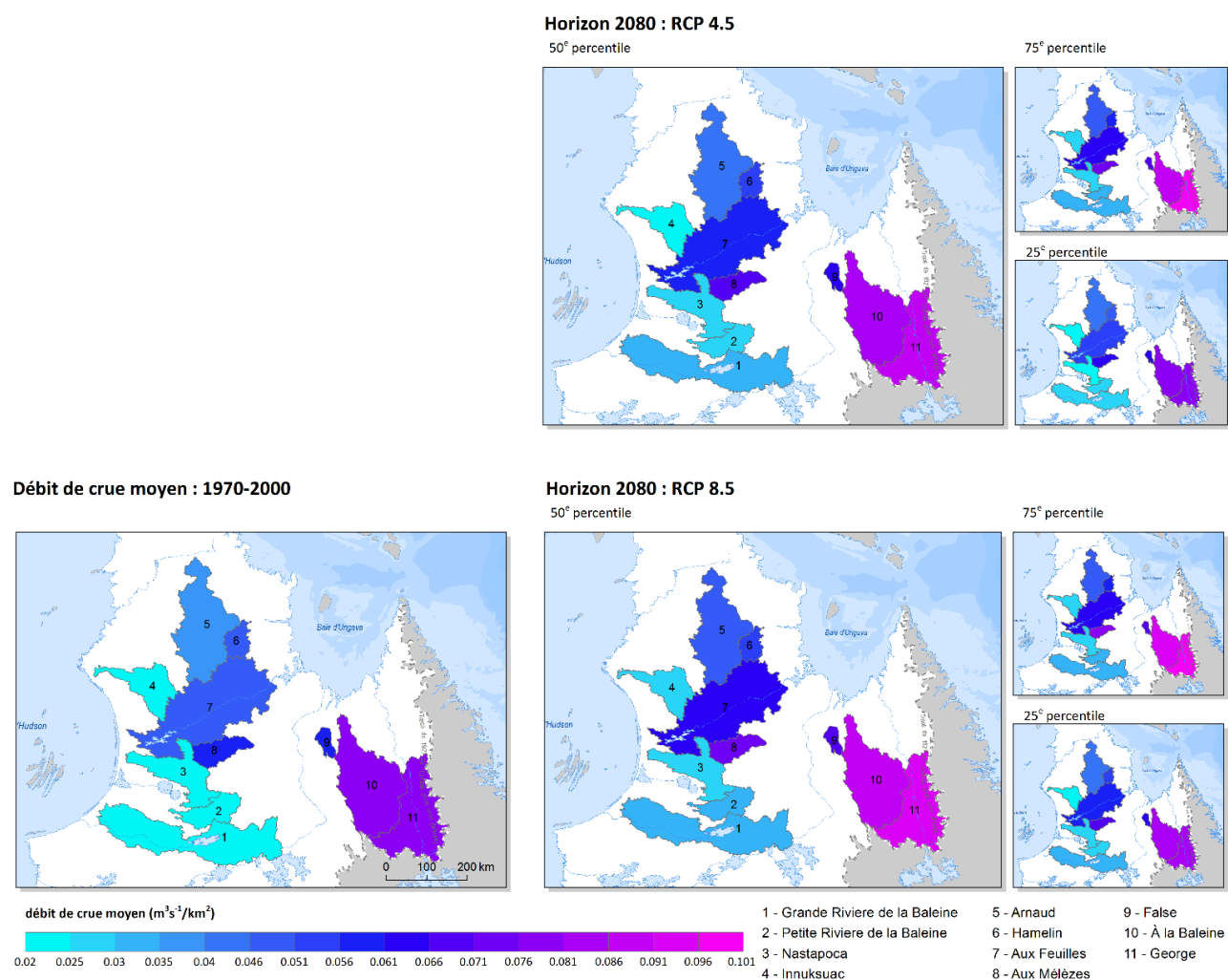


Figure 3-10 Cartes du débit de crue moyen spécifique de référence (en bas à gauche) et pour l'horizon 2080 selon le scénario RCP 4.5 (milieu et droite en haut) et le scénario RCP 8.5 (milieu et droite en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux 75^e et 25^e percentiles de l'ensemble pour chacun des scénarios RCP.

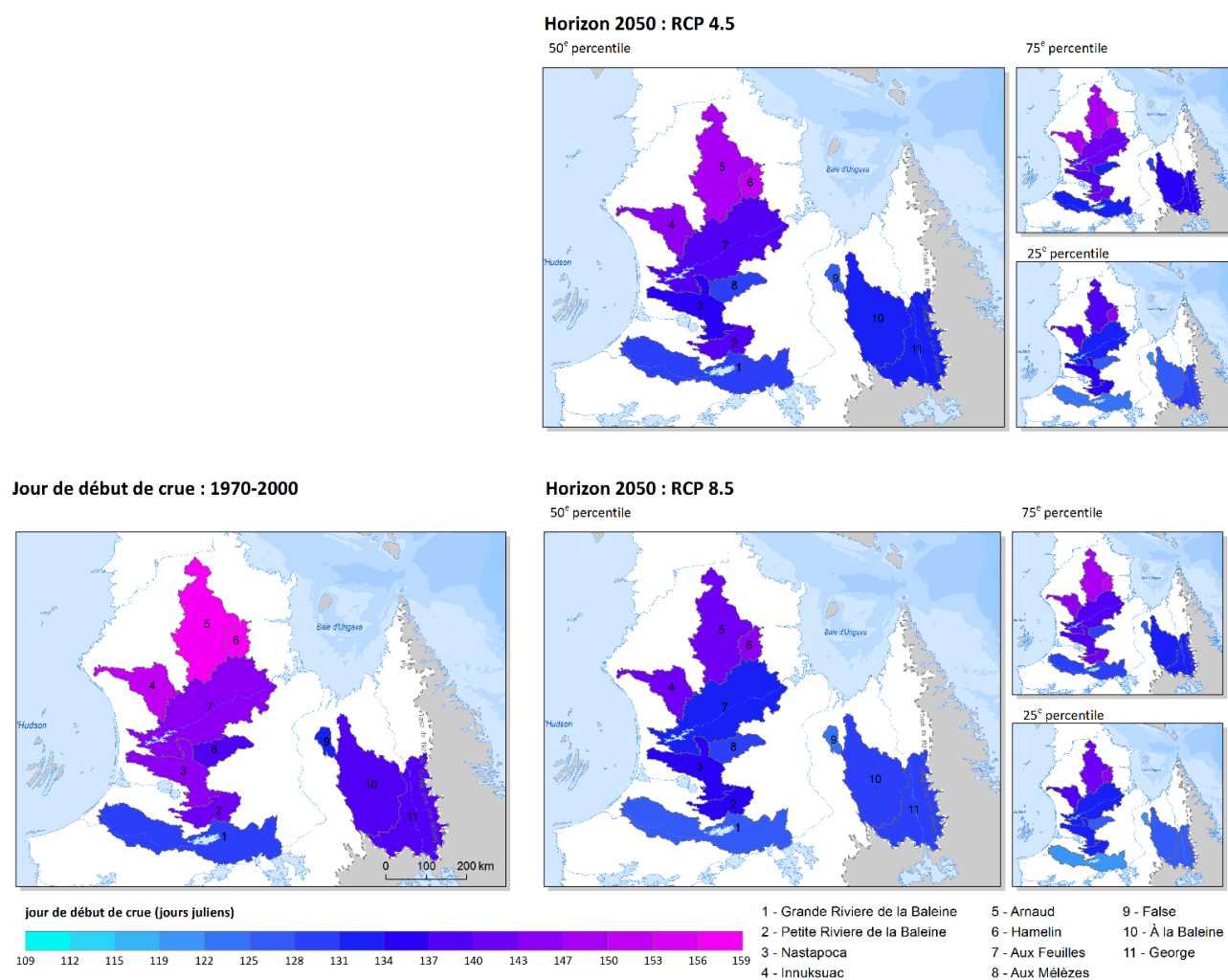


Figure 3-11 Cartes du jour de début de crue de référence (en bas à gauche) et pour l'horizon 2050 selon le scénario RCP 4.5 (milieu et droite en haut) et le scénario RCP 8.5 (milieu et droite en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux 75^e et 25^e percentiles de l'ensemble pour chacun des scénarios RCP.

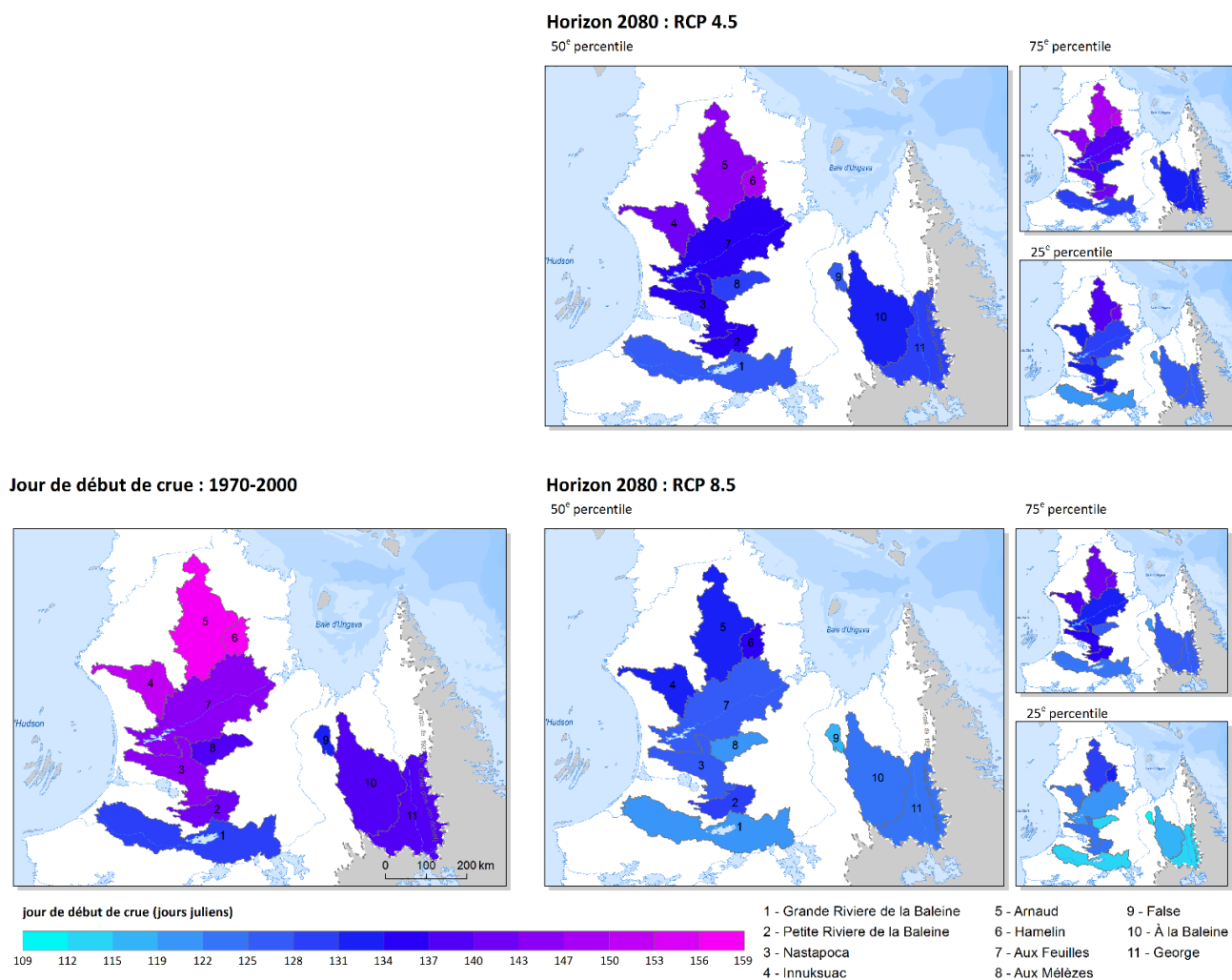


Figure 3-12 Cartes du jour de début de crue de référence (en bas à gauche) et pour l’horizon 2080 selon le scénario RCP 4.5 (milieu et droite en haut) et le scénario RCP 8.5 (milieu et droite en bas). Les deux cartes secondaires à droite des deux cartes centrales correspondent aux 75^e et 25^e percentiles de l’ensemble pour chacun des scénarios RCP.

3.4 Synthèse

Ce chapitre décrit brièvement la démarche menant à la production de scénarios hydrologiques futurs pour la région du Nunavik et présente les principaux résultats.

Les données disponibles à cet effet proviennent de l'activité continue cQ2 réunissant Hydro-Québec (IREQ), la Direction de l'expertise hydrique (DEH, MDDELCC), Rio Tinto et Ouranos. La méthodologie utilisée pour produire les résultats est basée sur la simulation hydrologique avec le modèle HSAMI étalonné spécifiquement pour la production de projections hydroclimatiques. Les scénarios climatiques alimentant HSAMI proviennent de l'ensemble CMIP5. Deux méthodes de post-traitement sont appliquées aux sorties des modèles climatiques afin de réduire les différences entre ces dernières et la météorologie observée sur la période de référence. Deux scénarios RCP (RCP4.5 et RCP8.5) sont représentés dans l'ensemble, et deux horizons futurs sont couverts (2050 et 2080).

Les projections hydroclimatiques permettent le calcul d'un signal d'un changement entre l'hydrologie de la période de référence et l'hydrologie future. Il est d'usage d'appliquer ce changement à l'hydrologie observée sur la période de référence afin de projeter une hydrologie future. Dans le cas du Nunavik, les chroniques de débits observés comportent des données manquantes et couvrent rarement toute la période de référence. Pour pallier ce problème, une hydrologie reconstituée sur la période de référence est simulée avec pour intrant des observations météorologiques. C'est à cette hydrologie reconstituée qu'est appliqué le signal de changement pour produire une projection hydrologique.

Les simulations hydroclimatiques produisent, pour chaque bassin versant, une quantité importante de projections hydrologiques qui sont considérées équiprobables. Afin de simplifier la présentation des résultats, les percentiles 25, 50 et 75 % des valeurs de changements sont présentés dans la section des résultats.

Le débit annuel moyen et le débit de crue moyen varient grandement entre les bassins versants du Nunavik puisque la superficie des bassins versants est hautement variable. Les débits spécifiques (rapportés au kilomètre carré) permettent la comparaison interbassins : le débit annuel moyen spécifique varie de $0.0104 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/\text{km}^2$ à $0.0191 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/\text{km}^2$ et le débit de crue moyen spécifique varie de $0.0204 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/\text{km}^2$ à $0.0790 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/\text{km}^2$. L'hydrologie

reconstituée démontre également que la crue débute entre le 129^e et le 159^e jour de l'année.

Les résultats des simulations hydroclimatiques indiquent qu'il est très probable que le débit annuel moyen et le débit moyen de crue augmenteront dans le futur, et ce, pour tous les bassins versants à l'étude. Les augmentations projetées et les espaces interquartiles varient cependant d'un bassin à l'autre. L'augmentation projetée du débit annuel moyen varie de 3 % à la rivière à la Baleine (25^e percentile, horizon 2050, RCP4.5), à 47 % à la rivière Arnaud (75^e percentile, horizon 2080, RCP8.5). Pour les débits de crue, les augmentations vont de 2 % à la rivière George (25^e percentile, horizon 2050, RCP4.5) à 52 % à la Grande Rivière de la Baleine (75^e percentile, horizon 2080, RCP8.5). Pour tous les bassins, les changements de débits annuels moyens et de débits de crue moyens sont plus prononcés à l'horizon 2080 et avec le RCP8.5.

En ce qui concerne le début de la crue, tous les bassins sauf celui de la Grande Rivière de la Baleine présentent un devancement très probable de la crue. Les devancements varient de 0.5 jour à la Petite Rivière de la Baleine (75^e percentile, horizon 2050, RCP4.5) à 28 jours à la rivière Innuksuac (25^e percentile, horizon 2080, RCP8.5). À la Grande Rivière de la Baleine, le devancement est probable, bien que certains scénarios projettent un faible retard. Pour tous les bassins, les devancements les plus prononcés sont projetés à l'horizon 2080 et avec le RCP8.5.

3.5 Références

- Fortin, V. (2000). Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application. Rapport de recherche, Institut de recherche d'Hydro-Québec. Varenne, Québec.
- Hutchinson, M. F. (1995). Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(4), 385–403.
- Hutchinson, M. F., McKenney, D. W., Lawrence, K., Pedlar, J. H., Hopkinson, R. F., Milewska, E., & Papadopol, P. (2009). Development and Testing of Canada-Wide Interpolated Spatial Models of Daily Minimum–Maximum Temperature and Precipitation for 1961–2003. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(4), 725–741.
- Lofgren, B. M., Hunter, T. S., & Wilbarger, J. (2011). Effects of using air temperature as a proxy for potential evapotranspiration in climate change scenarios of Great Lakes basin hydrology. *Journal of Great Lakes Research*, 37(4), 744–752. <http://doi.org/10.1016/j.jglr.2011.09.006>
- Minville, M., Cartier, D., Guay, C., Leclaire, L.-A., Audet, C., Le Digabel, S., & Merleau, J. (2014). Improving process representation in conceptual hydrological model calibration using climate simulations. *Water Resources Research*, 5044–5073.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), pp.885-900.
- Mpelasoka, F. S., & Chiew, F. H. S. (2009). Influence of Rainfall Scenario Construction Methods on Runoff Projections. *Journal of Hydrometeorology*, 10(5), 1168–1183.
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2011). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498.

Willems, P., & Vrac, M. (2011). Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. *Journal of Hydrology*, 402(3-4), 193-205.

Chapitre 4 Les bioclimats et leur évolution possible

Auteurs:

Élyse Fournier, Ouranos
Travis Logan, Ouranos

Collaborateurs:

Diane Chaumont, Ouranos
Isabelle Charron, Ouranos



4.1 Mise en contexte

Depuis 2001, la cartographie des bioclimats est un outil particulièrement utile pour la planification du territoire au Québec (Charron 2015). Cet outil est intimement lié aux principaux indicateurs climatiques influençant la biologie d'une région donnée. Avec les changements climatiques, le climat des différentes régions du globe est appelé à changer. Alors que le globe se réchauffe, certaines régions s'assècheront et d'autres s'humidifieront. Ces changements modifieront les bioclimats, notamment ceux au nord du 55^e parallèle. Dans ce contexte, il est primordial pour les gestionnaires du territoire de s'appuyer sur une cartographie des bioclimats. Cette dernière doit représenter le climat du passé récent. Il est également intéressant pour les gestionnaires du territoire de projeter l'évolution des bioclimats dans le futur. En plus de permettre d'anticiper les différents changements bioclimatiques à venir, la projection permettra aux gestionnaires de développer des mesures d'adaptation adéquates.

Le premier objectif de cette section est mettre à jour la cartographie des bioclimats du passé récent selon les dernières avancées dans le domaine scientifique. Le deuxième objectif est de tracer le portrait de l'évolution des bioclimats dans le futur au nord du 55^e parallèle au Québec.

Pour ce faire, les sections 4.2.1 et 4.2.2 présentent respectivement la méthodologie utilisée pour effectuer la mise à jour de la carte des bioclimats du passé récent et pour effectuer le portrait de l'évolution des bioclimats dans le futur. La section 4.2.3 explique quant à elle comment les résultats des sections 4.2.1 et 4.2.2 sont utilisés pour produire les résultats finaux. La section 4.3 présente et discute des résultats et finalement, la section 4.4 effectue la synthèse du chapitre 4.

4.2 Méthodologie

4.2.1 Mise à jour des bioclimats du passé récent

La première cartographie des bioclimats du Québec a été effectuée en 2001 (Gerardin & McKenney 2001). Elle caractérise le bioclimat d'une région en utilisant la méthodologie de Litynski (1988). Litynski définit le bioclimat selon trois indicateurs climatiques distincts : la température annuelle moyenne, la précipitation annuelle moyenne et la durée de la saison de croissance. Ces indicateurs climatiques ont été calculés avec l'interpolation spatiale de données climatiques des stations météorologiques du MDDELCC pour la période 1966-1996 dans l'exercice de Gerardin et McKenney (2001).

Charron (2015) a mis à jour la cartographie des bioclimats au nord du 55^e parallèle en utilisant des données de réanalyses permettant ainsi de pallier à la rareté des données météorologiques disponibles à l'intérieur du territoire et de couvrir la période la période climatique récente (1981-2010). La mise à jour de la cartographie a été effectuée en utilisant la classification des bioclimats de Litynski (1988). Charron (2015) a considéré quatre réanalyses (CFSR, ERA-Interim, JRA55 et MERRA) pour le climat de référence sur la période 1981-2010. La cartographie résultante, présentée à la figure 4-1, offre un portrait plus fin et jugé plus robuste des bioclimats que celui présenté par Gerardin et McKenney (2001) qui était basé sur l'interpolation des rares données aux stations dans le nord du Québec. La nouvelle classification compte maintenant sept catégories bioclimatiques au nord du 55^e parallèle, plutôt que quatre tel que présenté par Gerardin et McKenney (2001).

De nouvelles avancées scientifiques, présentées au chapitre 2 du présent document, permettent de statuer que le produit climatique GMFD reproduit plus justement le climat au nord du 55^e parallèle par rapport aux quatre réanalyses utilisées par Charron (2015). Les détails techniques du produit GMFD sont présentés au chapitre 2. Notamment, il s'agit d'un produit sur grille d'une résolution de 0.25° (~30km).

Dans ce contexte, la carte des bioclimats est de nouveau mise à jour. Le produit GMFD est utilisé pour calculer les trois indicateurs climatiques sur lesquelles reposent la classification de Litynski (1988) (voir tableau 4-1). Il est à noter que la classe de saison de croissance « très longue » a dû être ajoutée pour accommoder le portrait de l'évolution des bioclimats dans le futur. Plus d'informations à ce propos sont présentées à la section 4.2.2. Tel que mentionné au chapitre 2, la période de référence sélectionnée s'étend de 1980-2004.

Tableau 4-1 Caractéristiques sommaires de la classification de Litynski (modifiée de Gerardin et McKenney 2001).

Température (°C)		Précipitations (mm)		Saison de croissance (jours)	
Polaire	-9.4 à -6.0	Semi-aride	251 à 469	Très courte	90 à 120
Subpolaire froide	-6.0 à -1.5	Modérée	470 à 800	Courte	120 à 150
Subpolaire	-1.5 à 1.9	Subhumide	800 à 1360	Moyenne	150 à 180
Subpolaire douce	1.9 à 4.5	Humide	>1360	Longue	180 à 210
Modérée	4.5 à 6.6			Très longue*	>210

4.2.2 Portrait de l'évolution des bioclimats dans le futur

Le portrait de l'évolution des bioclimats dans le futur est effectué en ajoutant les valeurs des scénarios climatiques au bioclimat de référence. Pour ce faire, les scénarios de changements climatiques présentés au chapitre 2 sont utilisés. Ainsi, les scénarios de gaz à effet de serre modéré (RCP 4.5) et élevé (RCP 8.5) sont considérés. Pour chaque scénario de gaz à effet de serre, plusieurs simulations climatiques de l'ensemble CORDEX sont utilisées afin de bien prendre en compte les incertitudes reliées à la modélisation du climat. Les indicateurs climatiques de Litynski (1988) présentés au tableau 4-1 sont calculés pour chaque simulation climatique. L'écart entre la période future et la

période de référence est calculé pour chacune des simulations climatiques. Les écarts sont calculés pour deux horizons temporels: 2040-2064 et 2076-2100.

Il est à noter que la saison de croissance « très longue » a dû être ajoutée pour accommoder le portrait de l'évolution des bioclimats dans le futur. En effet, le climat se réchauffe et la période de croissance selon certains scénarios climatiques dépasse 210 jours. La classification de Litynski (1988) décrite par Gerardin et McKenney (2001) n'inclut pas de saison de croissance supérieure à 210 jours, elle a donc été ajoutée.

4.2.3 L'agencement des bioclimats du passé récent et leurs évolutions dans le futur

La combinaison des deux scénarios de gaz à effet de serre avec les deux horizons temporels produit quatre agencements de cartes tels que présentés à la figure 4-2. La carte A présente les bioclimats de référence tels que calculés à la section 4.2.1. La production de la carte B demande quelques étapes de calcul. Dans un premier temps, les écarts obtenus à la section 4.2.2 sont ajoutés aux valeurs GMFD (obtenues à la section 4.2.1) pour produire la valeur de chaque indicateur dans le futur. Cet exercice est effectué pour toutes les simulations et pour tous les indicateurs climatiques. Une fois cette étape effectuée, les valeurs d'indicateur dans le futur sont moyennées et classées selon le tableau 4-1 pour produire la carte B. La production des cartes C et D est effectuée de manière similaire et demande également quelques étapes de calculs. Pour le scénario inférieur par exemple, les écarts calculés à la section 4.2.2 sont utilisés pour trouver l'écart minimal global parmi toutes les simulations pour chaque indicateur climatique. Cet écart minimal global est une valeur artificielle, il correspond à l'écart minimal pour la température, la saison de croissance et les précipitations. Les valeurs qui le constituent peuvent provenir de simulations différentes. Une fois l'écart minimal global trouvé, la distance euclidienne standardisée entre ce dernier et les écarts de chaque simulation est calculée. La simulation obtenant le plus petit écart est sélectionnée.

L'utilisation des deux méthodologies pour produire les cartes B et C-D découle de la méthodologie utilisée au chapitre 2 pour produire les scénarios climatiques. Chaque méthodologie comporte ces avantages et ses inconvénients. Notamment, la carte produite en B ne conserve pas la corrélation spatiale d'une simulation. Cependant, il a été démontré que la moyenne des ensembles de simulations climatiques fournit habituellement un

portait plus robuste lorsque comparé au climat de référence (Reichler & Kim 2008; Gleckler et al. 2008). Les cartes C et D, quant à elles, conservent la corrélation spatiale des simulations climatiques, mais ne tirent pas avantage de la robustesse accrue de l'utilisation de plusieurs simulations climatiques pour le calcul d'un indicateur climatique.

A. Carte des bioclimats de référence	B. Carte des bioclimats futurs moyens	C. Carte des bioclimats : scénario supérieur
		D. Carte des bioclimats : scénario inférieur

Figure 4-2 Agencement des cartes de bioclimat du passé récent (A) et de leur évolution dans le futur (B,C et D). La carte B présente le portrait futur moyen alors que les cartes C et D présentent les scénarios supérieurs et inférieurs respectivement. Quatre agencements de ce genre sont créés pour présenter les deux scénarios de gaz à effet de serre avec les deux horizons temporels.

4.3 Résultats

Les quatre agencements des cartes bioclimatiques sont présentés aux figures 4-3 à 4-6 de ce document. Les cartes bioclimatiques présentent l'information différemment des travaux de Gerardin et McKenney (2001) et de Charron (2015). En effet, la pratique était de représenter chaque combinaison des trois indicateurs climatiques par une couleur différente. Dans cette version des cartes bioclimatiques, chaque combinaison des températures annuelles moyennes et de la saison de croissance est présentée par une nouvelle couleur alors que les précipitations sont illustrées par un motif. Ceci est effectué parce que le nombre de combinaisons des trois indicateurs est élevé, et que le discernement des couleurs sur les cartes devenait difficile en utilisant la manière de faire de Gerardin et McKenney (2001) et de Charron (2015).

4.3.1 Mise à jour des bioclimats du passé récent

La nouvelle carte des bioclimats du passé récent trace un portrait semblable de celle produite par Charron (2015). En tout, sept bioclimats sont présents sur la carte. Les bioclimats sont moins « lisses » que dans la version précédente. Ce résultat est tout à fait normal puisque l'utilisation d'une moyenne de quatre produits climatiques comme effectuée par Charron (2015) a un effet lissant par rapport à l'utilisation d'un seul produit climatique.

Dans la nouvelle version, la classe de précipitations de type semi-aride fait son apparition dans l'extrême nord du Québec. Cette classe de précipitation avait été observée par Gerardin et McKenney (2001), mais était absente de la version de Charron (2015). Ensuite, la classe de précipitations subhumide est relayée à l'extrême sud-est de la carte alors qu'elle occupait une place prépondérante au sud de la carte de Charron (2015). La classe de précipitations subhumide était absente de la carte des bioclimats proposée par Gerardin et McKenney (2001) au nord du 55^e parallèle.

La classe de température polaire occupe une place aussi importante dans la nouvelle version que dans la version de Charron (2015). Elle est présente à l'extrême nord du Québec ainsi que dans le secteur des monts Torngat à la limite entre le Labrador et le Québec. À la différence de la version précédente, la classe de température polaire se prolonge à l'ouest pour border une partie du croissant de lune de la Baie d'Hudson. La classe de température subpolaire froide occupe le reste de la carte tel qu'observé dans la version précédente.

La classe de saison de croissance très courte est observée à l'extrême nord du Québec et dans la région des monts Torngat. Bien que plus hétérogène que dans la version de Charron (2015), la distribution spatiale de la classe de saison de croissance très courte est similaire. La classe de saison de croissance modérée est présente à l'extrême sud-ouest de la carte tel que dans la version précédente. Le reste du territoire est couvert par la classe de saison de croissance courte.

4.3.2 Portrait de l'évolution des bioclimats dans le futur

Les 12 scénarios pour le futur présentent en tout 24 bioclimats. Ceux-ci diffèrent au niveau des deux scénarios RCP et des deux horizons temporels étudiés, mais également au niveau du scénario étudié : moyen, supérieur ou inférieur. Cependant, certains résultats ressortent : les bioclimats se réchaufferont et s'humidifieront. Les bioclimats futurs présentés à l'agencement RCP 4.5 horizon 2040-2064 sont les plus froids des quatre agencements, mais ils sont tout de même plus chauds, avec les saisons de croissance plus longues, que les bioclimats du passé récent. Les bioclimats futurs des agencements RCP 4.5 horizon 2076-2100 et RCP 8.5 horizon 2040-2064 sont similaires du point de vue de la température. Les bioclimats futurs de l'agencement RCP 8.5 horizon 2076-2100 sont de loin les plus chauds. Du point de vue des précipitations, les bioclimats des agencements RCP 4.5 horizons 2040-2064 et 2076-2100 ainsi que de l'agencement RCP 8.5 horizon 2040-2064 sont similaires. Ils sont plus humides que le bioclimat du passé récent, mais plus secs que les bioclimats futurs de l'agencement RCP 8.5 horizon 2076-2100. Ces résultats sont conséquents avec les observations habituellement effectuées pour le Québec : plus nous augmentons la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, plus notre climat se réchauffera et s'humidifiera dans les années à venir (Ouranos 2015).

La classe de précipitations semi-aride disparaît pour tous les scénarios futurs, autant le moyen, le supérieur et l'inférieur. Ensuite, la classe de précipitations modérée se déplace vers le nord-ouest pour tous les scénarios. Ce déplacement est le plus marqué pour l'agencement RCP8.5 horizon 2076-2100. La classe de précipitation subhumide subit le même type de déplacement que la classe modérée dans dix des douze scénarios.

La classe de température polaire disparaît dans huit des douze scénarios bioclimatiques futurs. La classe de température subpolaire fait son apparition dans tous les scénarios présentés. À titre indicatif, cette classe de température

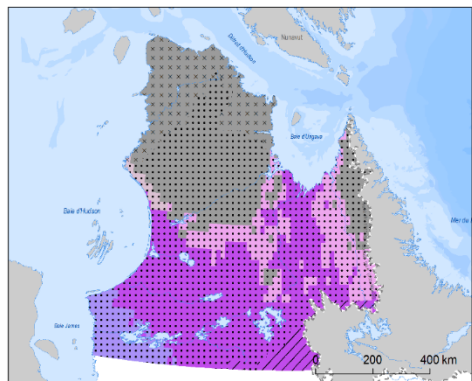
était présente sur la partie sud-est de la Côte-Nord, en Gaspésie, au Lac-Saint-Jean, sur la région nord de la Mauricie et en Abitibi-Témiscamingue dans la cartographie des bioclimats de Gerardin et McKenney (2001). La classe de température subpolaire douce fait son apparition dans neuf des douze scénarios, celle-ci était présente dans le sud de l'Abitibi-Témiscamingue, dans le nord de l'Outaouais, des Laurentides et de Lanaudière et dans le sud de la Mauricie dans la cartographie de Gerardin et McKenney (2001). Finalement, la classe de température modérée, présente en Montérégie, en Estrie et sur la Rive-Nord du fleuve Saint-Laurent et de la rivière des Outaouais selon Gerardin et McKenney (2001), fait son apparition dans deux des douze scénarios. Ainsi, de manière générale, les classes de température se déplacent vers le nord et les classes de température plus chaudes apparaissent à l'extrême sud-ouest de l'agencement RCP 8.5 et horizon 2076-2100.

La classe de saison de croissance très courte est toujours présente dans les scénarios sauf pour les scénarios moyen et supérieur de l'agencement RCP8.5 et horizon 2076-2100. Les classes de saison de croissance courte et moyenne occupent la majorité de la superficie pour les douze scénarios, avec la classe courte plus au nord que la classe moyenne. Les classes de saison de croissance longue et très longue font leur apparition dans les bioclimats futurs. La classe longue est présente dans tous les scénarios alors que la classe très longue est présente dans quatre des douze scénarios. La classe de saison de croissance très longue fait son apparition à différents endroits selon les scénarios. Pour l'agencement RCP8.5 horizon 2076-2100, la classe de saison de croissance très longue est présente à l'extrême sud-ouest.

La classe longue est présente dans tous les scénarios alors que la classe très longue est présente au sud-ouest sur les cartes de l'agencement RCP8.5 horizon 2076-2100. Originellement, la classe de saison de croissance longue était présente dans la partie sud du Québec, majoritairement en deçà du 47^e parallèle. La classe de saison de croissance très longue n'était pas présente au Québec dans la classification de Gerardin et McKenney (2001).

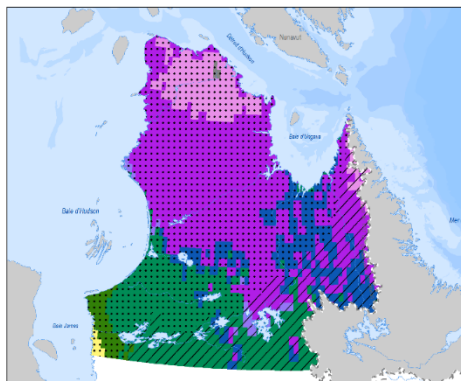
Classification des bioclimats 1980-2004

GMFD

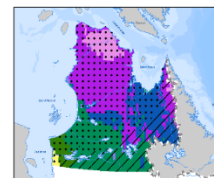


Horizon 2040-2064 : RCP 4.5

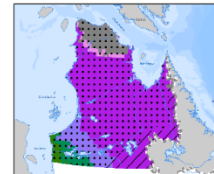
Moyenne



Scénario supérieur



Scénario inférieur



T, Sc

P, TC
P, C
SpF, TC
SpF, C
SpF, M
SpF, TL
Sp, C
Sp, M
Sp, L
Sp, TL
SpD, M
SpD, L
M, L
M, TL

Préc

SA
SH
H

Température (°C)	Précipitations (mm)	Saison de croissance (jours)
P : polaire -9.4 à -6.0	SA : semi-aride 250 à 469	TC : très courte 90 à 120
SpF : subpolaire froide -6.0 à -1.5	M : modérée 470 à 800	C : courte 120 à 150
Sp : subpolaire -1.5 à 1.9	SH : subhumide 800 à 1360	M : moyenne 150 à 180
SpD : subpolaire douce 1.9 à 4.5	H : humide >1360	L : longue 180 à 210
M : Modérée 4.5 à 6.6		TL : très longue* >210

* ajoutée car la classification de Litynski décrite dans Gerardin et McKenney (2001) n'inclut pas de saison de croissance supérieure à 210 jours

Sources

Donnée : Fond cartographique : MERN
Données climatiques : Ouranos
Organisme : MERN
Année : 2015, 2017

Réalisation : Ouranos

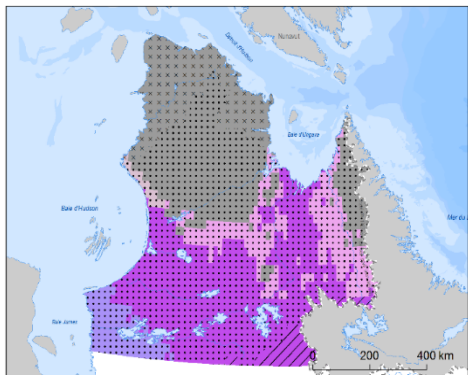
Note : Le présent document n'a aucune portée légale.
© Ouranos, 2017

Figure 4-3

Carte des bioclimats du passé récent (carte de gauche) et leurs évolutions futures (cartes du milieu et de droite) pour le scénario de gaz à effet de serre RCP4.5 à l'horizon 2040-2064. Toutes les cartes sont obtenues en utilisant la classification de Litynski (1988) telle que décrite dans Gerardin et McKenney (2001). La carte des bioclimats du passé récent se base sur le produit climatique GMFD. Les cartes d'évolution future se basent sur une combinaison du produit climatique GMFD et des projections climatiques de l'ensemble CORDEX. La carte du milieu présente le scénario futur moyen alors que les cartes de droite présentent les scénarios futurs supérieur et inférieur.

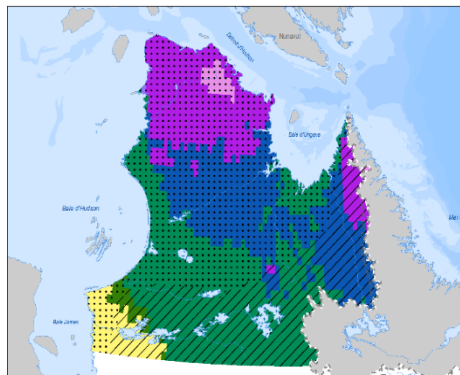
Classification des bioclimats 1980-2004

GMFD

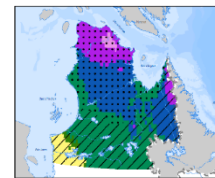


Horizon 2076-2100 : RCP 4.5

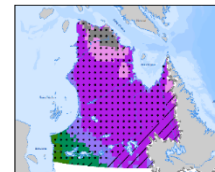
Moyenne



Scénario supérieur



Scénario inférieur



T, Sc

P, TC
P, C
SpF, TC
SpF, C
SpF, M
SpF, TL
Sp, C
Sp, M
Sp, L
Sp, TL
SpD, M
SpD, L
SpD, TL
M, L
M, TL

Préc

SA
M
SH
H

Température (°C)	Précipitations (mm)	Saison de croissance (jours)
P : polaire	-9.4 à -6.0 SA : semi-aride	250 à 469 TC : très courte
SpF : subpolaire froide	-6.0 à -1.5 M : modérée	470 à 800 C : courte
Sp : subpolaire	-1.5 à 1.9 SH : subhumide	800 à 1360 M : moyenne
SpD : subpolaire douce	1.9 à 4.5 H : humide	>1360 L : longue
M : Modérée	4.5 à 6.6	TL : très longue*

* ajoutée car la classification de Litynski décrite dans Gerardin et McKenney (2001) n'inclut pas de saison de croissance supérieure à 210 jours

Sources

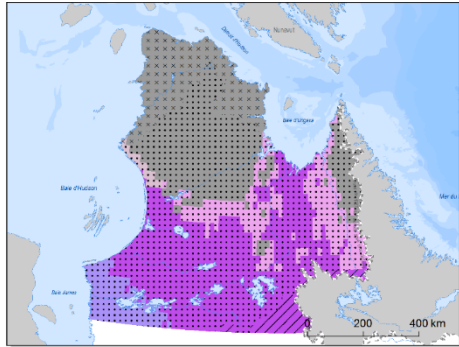
Données : Fond cartographique : MERN 2015
Données climatiques : Ouranos 2015, 2017
Réalisation : Ouranos
Note : Le présent document n'a aucune portée légale.
© Ouranos, 2017

Figure 4-4

Carte des bioclimats du passé récent (carte de gauche) et leurs évolutions futures (cartes du milieu et de droite) pour le scénario de gaz à effet de serre RCP4.5 à l'horizon 2076-2100. Toutes les cartes sont obtenues en utilisant la classification de Litynski (1988) telle que décrite dans Gerardin et McKenney (2001). La carte des bioclimats du passé récent se base sur le produit climatique GMFD. Les cartes d'évolution future se basent sur une combinaison du produit climatique GMFD et des projections climatiques de l'ensemble CORDEX. La carte du milieu présente le scénario futur moyen alors que les cartes de droite présentent les scénarios futurs supérieur et inférieur.

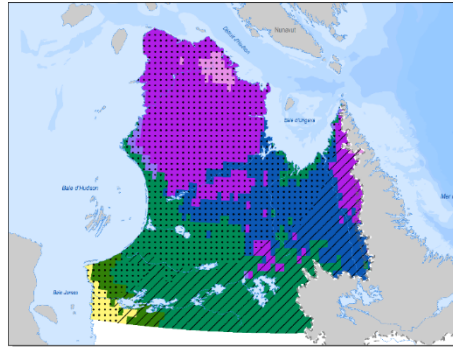
Classification des bioclimats 1980-2004

GMFD

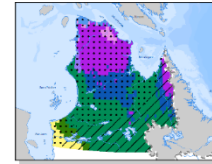


Horizon 2040-2064 : RCP 8.5

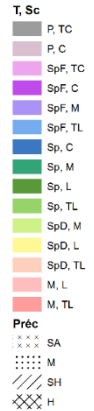
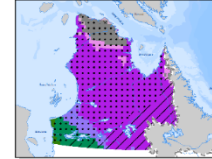
Moyenne



Scénario supérieur



Scénario inférieur



Température (°C)	Précipitations (mm)	Saison de croissance (jours)
P : polaire	-9.4 à -6.0 SA : semi-aride	250 à 489 TC : très courte
SpF : subpolaire froide	-6.0 à -1.5 M : modérée	470 à 800 C : courte
Sp : subpolaire	-1.5 à 1.9 SH : subhumide	800 à 1360 M : moyenne
SpD : subpolaire douce	1.9 à 4.5 H : humide	>1360 L : longue
M : Modérée	4.5 à 6.6	TL : très longue*

* ajoutée car la classification de Litynski décrite dans Gerardin et McKenney (2001) n'inclut pas de saison de croissance supérieure à 210 jours

Sources

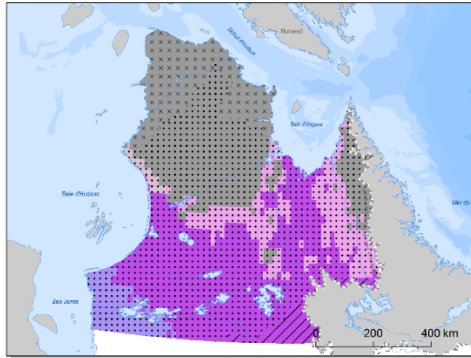
Données : Fond cartographique : Ouranos
Données climatiques : MERRA-2, 2015, 2017
Réalisation : Ouranos
Note : Le présent document n'a aucune portée légale.
© Ouranos, 2017

Figure 4-5

Carte des bioclimats du passé récent (carte de gauche) et leurs évolutions futures (cartes du milieu et de gauche) pour le scénario de gaz à effet de serre RCP8.5 à l'horizon 2040-2064. Toutes les cartes sont obtenues en utilisant la classification de Litynski (1988) telle que décrite dans Gerardin et McKenney (2001). La carte des bioclimats du passé récent se base sur le produit climatique GMFD. Les cartes d'évolution future se basent sur une combinaison du produit climatique GMFD et des projections climatiques de l'ensemble CORDEX. La carte du milieu présente le scénario futur moyen alors que les cartes de droite présentent les scénarios futurs supérieur et inférieur.

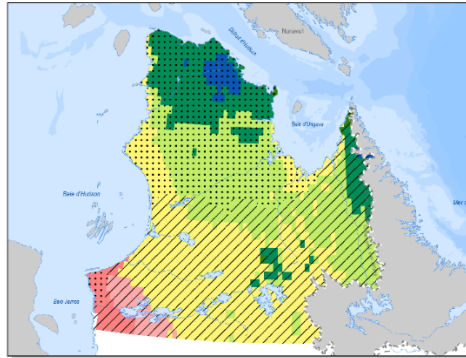
Classification des bioclimats 1980-2004

GMFD

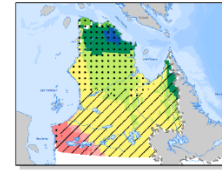


Horizon 2076-2100 : RCP 8.5

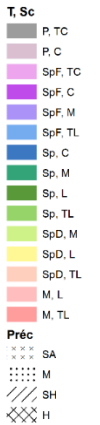
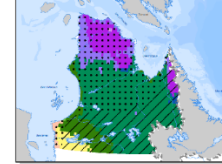
Moyenne



Scénario supérieur



Scénario inférieur



Température (°C)	Précipitations (mm)	Saison de croissance (jours)
P : polaire	-9.4 à -6.0	SA : semi-aride
SpF : subpolaire froide	-6.0 à -1.5	M : modérée
Sp : subpolaire	-1.5 à 1.9	SH : subhumide
SpD : subpolaire douce	1.9 à 4.5	H : humide
M : Modérée	4.5 à 6.6	

* ajoutée car la classification de Litynski décrite dans Gerardin et McKenney (2001) n'inclut pas de saison de croissance supérieure à 210 jours

Sources

Données : Fond cartographique : MERN, 2015
Données climatiques : Ouranos, 2015, 2017

Réalisation : Ouranos

Note : Le présent document n'a aucune portée légale.
© Ouranos, 2017

Figure 4-6

Carte des bioclimats du passé récent (carte de gauche) et leurs évolutions futures (cartes du milieu et de gauche) pour le scénario de gaz à effet de serre RCP8.5 à l'horizon 2076-2100. Toutes les cartes sont obtenues en utilisant la classification de Litynski (1988) telle que décrite dans Gerardin et McKenney (2001). La carte des bioclimats du passé récent se base sur le produit climatique GMFD. Les cartes d'évolution future se basent sur une combinaison du produit climatique GMFD et des projections climatiques de l'ensemble CORDEX. La carte du milieu présente le scénario futur moyen alors que les cartes de droite présentent les scénarios futurs supérieur et inférieur.

4.4 Synthèse

Dans ce chapitre, la carte des bioclimats du passé récent a été mise à jour et l'évolution des bioclimats dans le futur a été projetée.

Le produit climatique GMFD a été utilisé pour la mise à jour de la carte des bioclimats. L'ensemble climatique CORDEX est combiné au produit GMFD pour projeter l'évolution des bioclimats dans le futur. La projection des bioclimats est effectuée pour les scénarios de gaz à effet de serre RCP4.5 et RCP8.5 et pour deux horizons temporels, 2040-2064 et 2076-2100.

La carte des bioclimats actuels du Nunavik basée sur GMFD contient sept bioclimats distincts. Les classes de température polaire et subpolaire froide sont présentes sur le territoire, la classe polaire étant située plus au nord et dans la région des monts Torngats. La classe de saison de croissance courte couvre la majorité du territoire. La classe de saison de croissance très courte est observée à l'extrême nord et dans la région des monts Torngat alors que la classe de saison de croissance moyenne est observée au sud-ouest de la région du Nunavik. La classe de précipitation modérée couvre la majorité du territoire. La classe de précipitation semi-aride est présente à l'extrême nord alors que la classe subhumide est présente dans l'extrême sud-est.

Le portrait des bioclimats futurs couvre 24 bioclimats distincts. Ceux-ci varient selon le scénario RCP, selon l'horizon temporel et selon le scénario étudié : moyen, supérieur ou inférieur. Néanmoins, quelques tendances claires ressortent et l'augmentation des températures et des précipitations du Nunavik entraîne une modification de la répartition des classes bioclimatiques. Notamment, il est probable que la classe de température polaire disparaisse. Il est extrêmement probable que la classe de température subpolaire fasse son apparition et il est probable que la classe de température subpolaire douce émerge aussi. Il est peu probable que la classe de température modérée apparaisse. Il est extrêmement probable que la classe de saison de croissance longue fasse son apparition alors qu'il est peu probable que la classe très longue émerge. Finalement, il est extrêmement probable que la classe de précipitation semi-aride disparaisse.

4.5 Références

- Charron, 2015. Élaboration du portrait climatique régional en soutien à l'analyse des vulnérabilités et au développement du Nunavik, Montréal.
- Gerardin, V. & McKenney, K., 2001. Une classification climatique du Québec à partir de modèles de distribution spatiale de données climatiques mensuelles : vers une définition des bioclimats du Québec, Québec. Available at:
<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/classification/>.
- Gleckler, P.J., Taylor, K.E. & Doutriaux, C., 2008. Performance metrics for climate models. *Journal of Geophysical Research*, 113(D6), p.D06104.
- Litynski, J., 1988. Climat du Québec d'après la classification numérique.
- Ouranos, 2015. Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec, Montréal.
- Reichler, T. & Kim, J., 2008. How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(3), pp.303–311.

Chapitre 5 La végétation dans un climat changeant : portrait et perspectives d'évolution

Auteur:

Benoît Tremblay, botaniste consultant

Note:

Toutes les photographies figurant dans ce chapitre ont été prises par l'auteur.



5.1 Mise en contexte

Dans une situation où les conditions climatiques d'un biome donné sont appelées à changer de façon importante, les conséquences sur le couvert végétal ne sont pas immédiates. L'évolution de la végétation est un processus complexe et relativement lent à l'échelle humaine du temps, même si on observe parfois des changements locaux rapides et spectaculaires. Cependant, bien que les écosystèmes du Haut-Boréal et de l'Arctique québécois aient déjà subi des périodes de réchauffement climatique par le passé, ils n'ont probablement jamais fait face au cours du Quaternaire à des changements d'une telle ampleur se produisant dans un laps de temps aussi court. Des bouleversements majeurs sont donc à prévoir, mais il existe un haut niveau d'incertitude concernant la nature, l'ampleur et les modalités de la réponse du couvert végétal face à de tels chamboulements climatiques. La température est certes un paramètre fort important, mais il est loin d'être le seul impliqué. Un grand nombre d'autres paramètres doivent être considérés. Certains sont d'ordre climatique (précipitation totale, vent, degré jour de croissance, etc.), d'autres d'ordre édaphique (présence ou non de sol, épaisseur, type), écologique (compétition interspécifique, herbivore, pollinisateurs, etc.) ou bien encore biologique (maturation des graines, contraintes génétiques, etc.). Par ailleurs, on s'attend à ce que les changements dans le couvert végétal soient davantage marqués dans les zones de transition entre les domaines bioclimatiques, où tous les acteurs sont en place pour entraîner une évolution dans un sens ou dans l'autre selon les variations des différents facteurs impliqués.

Il existe deux grands types de travaux qui se sont penchés, dans un contexte de changements climatiques, sur la dynamique du couvert végétal dans le Haut-Boréal et l'Arctique. Le premier regroupe les études qui ont cherché à détecter et quantifier les modifications qui ont déjà eu lieu dans ces biomes, principalement au niveau des couverts arbustifs et arborescents et surtout à l'aide de séquences temporelles d'imageries diverses (photographies aériennes, images satellites, etc.). Le second type, expérimental, comprend les études qui ont tenté d'évaluer, de prédire comment la végétation risquait de changer dans l'avenir; soit par modélisation, soit *in natura* en contrôlant certains paramètres du milieu comme, par exemple, la température ou l'épaisseur du couvert nival.

Ce chapitre débute en dressant un portrait de la végétation actuelle du Nunavik par le biais des domaines bioclimatiques. Ensuite, il vise à fournir des pistes d'évolution spatio-temporelle de la végétation dans un contexte où celle-ci serait confrontée à des scénarios climatiques tels que ceux présentés au chapitre 2 pour la période 2020-2100. Plus spécifiquement, ces pistes d'évolution sont abordées sous divers angles : la dynamique forestière et celle des limites altitudinale et latitudinale des arbres, la toundra arctique et le rôle des arbustes érigés ainsi que l'influence de la topographie, des sols et des grands herbivores sur la réponse du couvert végétal. Enfin, les impacts possibles sur la biodiversité et sur les écosystèmes exceptionnels sont explorés.

5.2 La végétation et les domaines bioclimatiques actuels du Nunavik

Le Québec est un territoire immense qui englobe 1 667 000 km². Il s'étend sur près de 2 000 km échelonnés sur 17,5 degrés de latitude du sud au nord et sur environ 1 600 km et 22,5 degrés de longitude d'est en ouest. On comprendra donc que la végétation qui le couvre est loin d'être partout la même. Sa structure et sa composition changent graduellement au fur et à mesure qu'on remonte vers le nord, reflétant un climat qui se refroidit jusqu'à interdire éventuellement la croissance arborescente dans les portions les plus nordiques de la province. De la zone tempérée nordique au sud on passe à la zone boréale puis à la zone arctique dont la limite des arbres marque la frontière. Des gradients longitudinaux chez certains facteurs climatiques tels que les précipitations viennent aussi influencer en profondeur le couvert végétal qui nappe le territoire. Cette végétation est aussi nuancée et modelée régionalement par une multitude de facteurs abiotiques tels que l'épaisseur et la nature des dépôts de surface, la topographie, la géologie, la présence de grandes masses d'eau, et particulièrement dans la zone boréale, par la fréquence et l'étendue des feux. Au sein des zones tempérées, boréale et arctique, la végétation climacique qui occupe les stations aux conditions écologiques moyennes forme ce qui est appelé un domaine bioclimatique. Du sud au nord de la province, ces domaines se succèdent en bandes plus ou moins parallèles en fonction du régime thermique de moins en moins favorable. Le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec est à l'origine de la cartographie et de la description des zones et sous-zones de végétation du Québec et des domaines bioclimatiques qui les composent (Gouvernement du Québec 2003-2016).

Le Nunavik, qui englobe les terres situées au nord du 55^e parallèle, est également un vaste territoire de près de 444 000 km² (26,6 % de la superficie du Québec) s'étendant sur plus de 800 km du sud au nord et sur près de 1 000 km d'est en ouest. On y observe de ce fait un gradient climatique latitudinal marqué. Il recèle par ailleurs des enclaves géologiques et topographiques majeures : au nord l'Orogène de l'Ungava (fosse de l'Ungava) et à l'est l'Orogène du Nouveau-Québec (fosse du Labrador) et les monts Torngat où la cordillère arctique achève sa course vers le sud. Ces massifs exercent une influence profonde sur la végétation et reproduisent plus ou moins fidèlement de façon altitudinale les gradients de végétation latitudinaux qu'on observe à plus large échelle au Nunavik. Les grandes masses d'eau qui

ceinturent le Nunavik au nord et à l'ouest (baie d'Ungava, détroit et baie d'Hudson), où la glace persiste parfois tard en saison et qui sont responsables de brumes côtières fréquentes durant l'été, exercent un effet réfrigérant qui n'est pas sans conséquence sur la végétation. Elles repoussent, à leur approche, les limites du Boréal vers le sud et vers l'intérieur des terres.

Plusieurs exercices de classification de la végétation à l'échelle panarctique ont été menés; exercices qui englobent nécessairement le Québec nordique. Walker (2000) propose une classification de la toundra en quatre sous-zones, basée sur le type de végétation climacique en conditions écologiques moyennes et sur la réponse de la végétation au gradient climatique latitudinal. Le Québec comprend les sous-zones les plus méridionales, soit celles appelées « à arbustes bas » et « à arbustes nains érigés ». Cette classification n'est pas sans intérêt, mais demeure grossière et la description faite des sous-zones de même que la cartographie présentée pour le Québec cadrent mal avec la réalité. Plus récemment, l'équipe internationale de cartographie de la végétation arctique a produit une carte de la végétation arctique circumpolaire (CAVM Team 2003). Cette cartographie plus fine comprend 15 classes dont 8 se trouvent au Québec. La circonscription de ces classes et leur composition spécifique semblent mieux adaptées à la réalité, mais l'application et la cartographie qui en sont faites pour le Québec sont inexactes. Plus récemment encore, le MFFP a entamé en 2010 une cartographie à très fine échelle (8 ha étant la superficie minimale des polygones) de la végétation du Québec située au nord du 53^e parallèle. Cette cartographie, axée sur la physionomie de la végétation (formes de croissances et proportions de chaque type dans le couvert) est en voie d'être complétée et une version finale devrait être disponible prochainement.

Le Nunavik comprend deux zones de végétation et quatre domaines bioclimatiques qui sont, du sud vers le nord : la pessière à lichens et la toundra forestière dans la zone boréale, la toundra arctique à arbustes érigés et la toundra arctique à arbustes rampants² dans la zone arctique (Fig. 5-1).

² Les termes « toundra arctique à arbustes érigés » et « toundra arctique à arbustes rampants » ne sont pas officiels, mais ce sont ceux dont nous préconisons l'usage à l'avenir pour les deux domaines bioclimatiques les plus nordiques du Québec. Ils correspondent respectivement à la toundra arctique arbustive et à la toundra arctique herbacée de la classification du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (Gouvernement du Québec 2003-2016). L'appellation « toundra arctique herbacée » est inexacte et devrait être abandonnée. La toundra du Québec arctique qui couvre les

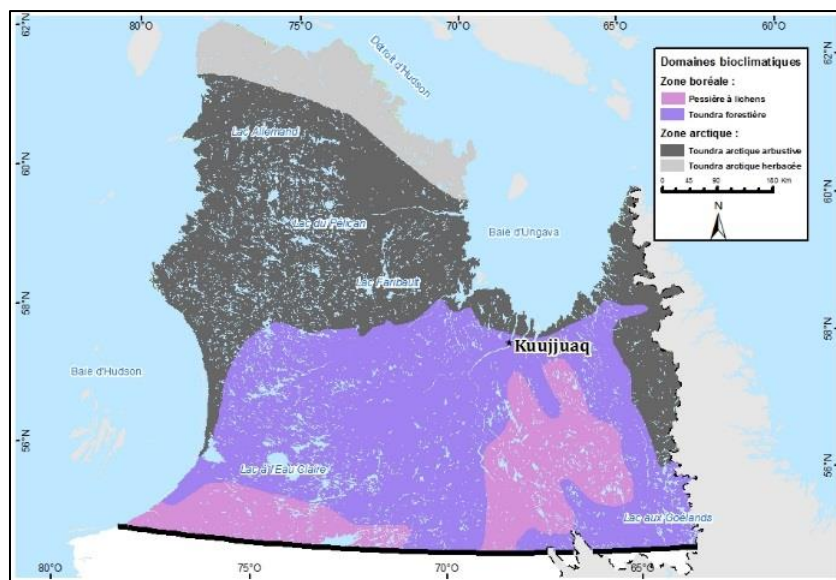


Figure 5-1 Les domaines bioclimatiques du Nunavik selon le découpage de 2003 du Gouvernement du Québec. La toundra arctique arbustive correspond à la toundra arctique à arbustes érigés décrite dans ce chapitre alors que la toundra arctique herbacée correspond à la toundra arctique à arbustes rampants. Un raffinement des limites des domaines est en cours. Certaines pourraient changer de façon importante, notamment celle qui sépare les deux domaines bioclimatiques de la zone arctique.

5.2.1 Zone boréale

La zone boréale est, de loin, celle qui couvre la plus grande proportion du Québec. Intercalée entre la zone tempérée nordique au sud et la zone arctique au nord, elle s'étend entre les latitudes 47°N et 58°N. C'est une zone surtout forestière, caractérisée par un couvert arborescent de densité variable et diminuant du sud au nord. Ce couvert est dominé par des conifères, principalement l'épinette noire (*Picea mariana* (Miller) Britton, Sterns & Poggenberg). La dynamique écologique de la zone boréale repose principalement sur les incendies forestiers et, dans une moindre mesure, sur les épidémies d'insectes défoliateurs (principalement dans le domaine le plus méridional, la sapinière à bouleau blanc). La zone comprend quatre domaines bioclimatiques, dont deux sont présents au Nunavik : la pessière à lichens et la toundra forestière. Si on préconise une subdivision du Boréal comme celle qui

surfaces aux conditions écologiques moyennes est arbustive; à cette différence qu'elle est dominée au sud par des arbustes érigés bas ou nains (>40 cm) et au nord par des arbustes nains hémiprostrés ou rampants (<15 cm). Les plantes herbacées sont présentes, mais n'occupent qu'une proportion secondaire du couvert. La toundra herbacée à proprement parler est restreinte aux dépressions humides du paysage et aux versants à ruissellement nival.

est utilisée pour l'Arctique (soit en deux sous-zones, le Bas-Arctique et le Haut-Arctique), alors la pessière à lichens forme la portion méridionale du Haut-Boréal tandis que la toundra forestière en forme la portion septentrionale. Dans un tel contexte, la pessière à mousses et la sapinière à bouleau blanc forment quant à eux les portions septentrionales et méridionales du Bas-Boréal.

5.2.1.1 Domaine de la pessière à lichens

La pessière à lichens (Fig. 5-2) forme la sous-zone de la taïga de la zone boréale, intercalée entre la toundra forestière au nord et la pessière à mousses au sud. Elle traverse le Québec d'est en ouest sur une bande large d'environ 400 km entre les latitudes 51°N et 56°N. Seules les portions septentrionales de ce domaine se trouvent au Nunavik. Au nord-est on en remarque une importante prolongation azonale vers le nord (Fig. 5-1), qui concorde *grosso modo* avec la fosse du Labrador (portion au sud de l'axe rivières Koksoak-aux Mélézes) et avec la dépression du bassin de la rivière à la Baleine. Le relief contrasté et les roches basiques de la fosse du Labrador ainsi que les basses terres à dépôts épais du bassin de la rivière à la Baleine ne sont certainement pas étrangers à cette extension nordique majeure de la pessière à lichens. Les roches sédimentaires et volcaniques qui composent une grande part de la fosse du Labrador fournissent des bases échangeables qui font défaut ailleurs dans les sites sur assise rocheuse acide et qui compensent certainement en partie le déficit en nutriments lié au lent recyclage des éléments nutritifs en climat froid. Aussi, les roches sédimentaires sont plus sensibles à la météorisation et offrent un minimum de substrat meuble là où l'inlandsis a laissé peu ou pas de dépôts. Enfin, la Fosse du Labrador est une chaîne de montagnes dont certains sommets au nord-ouest de Schefferville dépassent 850 m. Le relief contrasté offre des vallées profondes et des versants bien exposés et protégés à meilleur régime thermique.



Figure 5-2 **Haut, gauche** : pessière noire à lichens occupant une terrasse glaciomarine sablonneuse éolisée à la latitude 56°40'N. Les méandres de la rivière Châteauguay sont visibles à l'arrière-plan et celle-ci rejoint la rivière Caniapiscou en haut à gauche de la photo. **Haut, droite** : pessières noires à lichens établies sur les buttes de moraines de Rogen dans la fosse du Labrador aux environs du lac Chakonipau. Les dépressions entre les buttes morainiques sont occupées par des fens ou des lacs peu profonds. **Centre, gauche** : feu récent de faible intensité ayant brûlé des pessières à lichens. Les dépressions plus humides ont été relativement épargnées. Le retrait du couvert végétal permet de bien discerner un esker qui traverse obliquement le centre de la photo. Des moraines de Rogen sont visibles au haut de l'image. **Centre, droite** : pessières blanches montagnardes établies sur le massif de gabbro à olivine et de basalte coussiné au sud-ouest du lac Romanet dans la fosse du Labrador. Des arbustaies érigées formées de bouleau glanduleux et de divers saules occupent les ouvertures alors que le parterre arbore un tapis continu de mousses hypnacées. **Bas, gauche** : tourbière minérotrophe structurée formée d'une succession de lanières végétalisées et de flarks à végétation éparse; l'ensemble étant perpendiculaire

au sens de l'écoulement. Elle est bordée d'une mélèzaie ouverte et d'une pessière noire à mélèze et bryophytes. **Bas, droite** : hauts sommets de la fosse du Labrador dans les montagnes ferrugineuses au nord-ouest de Schefferville. Les crêtes accueillent une toundra alpine muscinale à *Racomitrium lanuginosum* alors qu'une toundra rase à arbustes rampants, bryophytes et lichens nappe les zones un peu moins exposées.

L'épinette noire est de loin l'espèce maîtresse de ce domaine bioclimatique, formant la majorité du couvert forestier sur des étendues immenses. Elle y forme des forêts ouvertes dont le parterre est nappé de façon plus ou moins continue par des lichens du genre *Cladonia* spp.; *C. stellaris* (Opiz) Pouzar & Vězda, *C. mitis* Sandst. et *C. rangiferina* (L.) F. H. Wigg. étant les plus abondants. La pessière noire à lichens (ou pessière noire à cladonies) est en réalité une association végétale, mais qui est à ce point étendue et importante dans le paysage qu'elle se confond avec le domaine bioclimatique auquel elle a donné son nom. Elle forme la matrice de fond au sein de laquelle s'insère une gamme variée d'habitats et d'associations végétales qui la percent sporadiquement. Il en existe plusieurs variantes, certaines où les lichens partagent le parterre avec des bryophytes en proportion variables selon les conditions d'humidité. Certaines comprennent un sous-étage arbustif plus ou moins important, principalement composé de bouleau glanduleux (*Betula glandulosa* Michx.). Les feux, dont certains atteignent des proportions gigantesques (> 100 000 ha; Payette & al. 1989), représentent le facteur de perturbation naturelle prépondérant dans ce domaine bioclimatique (Fig. 5-2).

Le mélèze laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch) est la seconde espèce arborescente en importance dans ce domaine bioclimatique. Il partage très souvent le couvert avec l'épinette noire et le domine parfois, particulièrement dans les concavités plus humides du relief et en périphérie des fens où il forme des mélèzaies de densité variable, sur tourbe (tourbière minérotrophe boisée), parfois en populations pures. Il est particulièrement abondant à l'est du 74^e méridien, mais l'est de moins en moins vers l'ouest de cette longitude (Payette 2013a). Dans la portion du domaine bioclimatique qui se trouve au Nunavik, le pin gris (*Pinus banksiana* Lambert) et le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Miller) sont très rares. On trouve quelques populations isolées du premier à l'approche de la Grande rivière de la Baleine à la limite sud du Nunavik alors que le second compte des populations sporadiques dans la fosse du Labrador, où l'on trouve encore des individus de belle taille sur des îles alluviales de la rivière Caniapiscau non loin en amont du lac Cambrien. La fosse du Labrador comprend aussi de magnifiques pessières blanches montagnardes sur mousses

hypnacées, qui couvrent des superficies considérables dans les montagnes ferrugineuses au nord-ouest de Schefferville entre les rivières Goodwood et Swampy Bay ainsi que dans les montagnes basaltiques situées à l'ouest du lac Romanet (Fig. 5-2). Les enclaves feuillues sont sporadiques et de petites superficies. Ce sont les bétulaies blanches qui sont apparemment les plus fréquentes. Elles affectionnent les versants secs plus ou moins rocheux d'exposition sud ou ouest. Le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) se trouve souvent en bosquets ou en individus isolés au sein de bétulaies blanches, mais on trouve aussi des tremblaies pures çà et là. Les peupleraies baumières se réfugient quant à elles dans les basses terres humides et protégées en périphérie de certains lacs et cours d'eau.

Certains sites mésiques ou subhumides sont occupés par des pessière noires à mousses hypnacées (surtout *Pleurozium schreberi* (Michx.) Trevis et *Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp.) alors que les dépressions sont couvertes de pessières noires à sphaignes habituellement en association avec le mélèze laricin. Ces pessières sont fréquemment établies sur une mince couche de matière organique reposant sur des champs de blocs (till délavé) ou bien en périphérie des fens structurés, formant alors des tourbières ombrotrophes (ou minérotrophes pauvres) boisées. Dans la portion de la pessière à lichens se trouvant au Nunavik, la tourbière minérotrophe est le type ordinaire (Payette & Rochefort 2001) et ces tourbières sont très abondantes, occupant le fond de toutes les dépressions du relief et même certains versants à seepage. On trouve certes des fens riverains en bordure des lacs et des cours d'eau lenticques, mais le type au faciès le plus remarquable et occupant le plus d'espace est la tourbière structurée (Fig. 5-2). Ces tourbières sont formées d'une succession de levées végétalisées alternant avec des flarks (dépressions humides, allongées et boueuses) où le couvert végétal est nul ou de densité variable. La végétation de ces fens structurés est un mélange d'arbustes bas ou nains (*Andromeda polifolia* L. s. lat., *Betula pumila* L. s. lat., *Kalmia polifolia* Wangenh., *Lonicera villosa* (Michx.) Schult., *Myrica gale* L., *Salix pedicellaris* Pursh, *Vaccinium uliginosum* L., etc.) et d'herbacées diverses où les cypéracées dominant (*Carex aquatilis* Wahlenb. s. lat., *C. chordorrhiza* L. f., *C. exilis* Dewey, *C. limosa* L., *C. livida* (Wahlenb.) Willd., *C. oligosperma* Michx., *C. rariflora* (Wahlenb.) Sm., *Eriophorum viridicarinarum* (Engelm.) Fern., *Trichophorum cespitosum* (L.) Hartm.). L'ensemble repose sur un tapis plus ou moins important de bryophytes qui comporte parfois aussi des lichens terricoles sur certaines levées où la nappe est profonde.

Enfin, les hauts sommets de la fosse du Labrador, au nord-ouest de Schefferville et dans les environs du lac Romanet, représentent des enclaves phytosociologiques et floristiques. Au fur et à mesure qu'on s'élève, les pessières blanches montagnardes à parterre de bouleaux glanduleux et tapis de bryophytes s'ouvrent de plus en plus et cèdent éventuellement la place à la toundra alpine à arbustes érigés formée en majorité de bouleaux glanduleux, puis à la toundra alpine à arbustes rampants constituée d'éricacées diverses, de saule raisin-d'ours (*Salix uva-ursi* Pursh) et de coussins ras de bouleau glanduleux sur fond de lichens et de bryophytes. Les sites les plus exposés et les plus hauts sommets ne supportent plus qu'une toundra cryptogamique formée de bryophytes (surtout *Racomitrium lanuginosum* (Hedw.) Brid.) et de lichens saxicoles et terricoles variés; où les arbustes rampants et les herbacées sont rares et dispersés (Fig. 5-2).

5.2.1.2 Domaine de la toundra forestière

Le domaine de la toundra forestière est intercalé entre la pessière à lichens au sud et la toundra arctique à arbustes érigés au nord. Il couvre les terres les plus septentrionales du Boréal et sa limite nord, formées par la limite des arbres, en marque la fin et signale la venue de l'Arctique. Il s'étend *grosso modo* entre les latitudes 55°N et 58°N, mais comporte des extensions locales jusqu'en deçà du 54°N et au-delà du 59°N. Bien que le nom de ce domaine soit en lui-même contradictoire (la toundra étant, par définition, une « terre sans arbre »), il a l'avantage d'illustrer clairement de quoi il est formé : une mosaïque complexe de forêts conifériennes plus ou moins ouvertes dans les zones basses du relief (bas de versants et fonds de vallées) et de toundra dans les zones plus élevées (hauts de versants et sommets) (Fig. 5-3). Ainsi, alors que la limite nord de ce domaine concorde avec la limite latitudinale des arbres, on trouve au sud de cette limite une infinité de limites altitudinales subarctiques des arbres; à chaque fois qu'une levée topographique entraîne le passage de la forêt au krummholz puis à la toundra sommitale. Dans bien des secteurs cependant, la limite altitudinale des arbres n'est pas une limite climatique, mais plutôt une limite édaphique, due à l'absence de dépôts meubles dans le haut des versants et sur le sommet des buttes et des collines rocheuses.

La toundra forestière est en réalité un écotone, celui entre la grande forêt boréale et la toundra arctique. Mais c'est un écotone si vaste et si important d'un point de vue écologique qu'il justifie une reconnaissance en tant qu'entité bioclimatique distincte. C'est à Payette (1976) qu'on doit une description et

une délimitation claire de ce domaine bioclimatique au Québec et sa subdivision en domaines écoclimatiques en fonction de la dominance des espèces arborescentes. De façon générale, la végétation qui le compose est une combinaison, dans les sites forestiers, de celle décrite pour la pessière à lichens (section 5.2.1.1) et, dans les sites élevés non forestiers, de celle décrite pour la toundra arctique (cf. sections 5.2.2.1 et 5.2.2.2). Les feux représentent ici aussi un facteur prépondérant dans la dynamique et la configuration du couvert végétal. La distribution actuelle et l'étendue des îlots forestiers de même que la limite des arbres subarctique qui leur est associée sont la conséquence directe des patrons de feux, couplés à un échec répété des processus de régénération de la forêt après feu alors que les parcelles brûlées sont converties en toundra (Payette et al. 2001).

Dans les forêts subarctiques de la toundra forestière, la proportion occupée par le mélèze laricin par rapport à l'épinette noire augmente à l'est de la longitude 74°O. Le mélèze domine alors souvent le couvert et c'est l'espèce qui forme, de façon générale, la limite des arbres à l'est de ce méridien (Payette et Gagnon 1979). Bien que l'épinette noire et le mélèze laricin soient les principales espèces arborescentes de ce domaine bioclimatique, on trouve dans les régions côtières de la baie d'Hudson et de la baie d'Ungava des pessières blanches maritimes. L'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) est l'espèce formant la limite des arbres de ces secteurs, mais l'épinette noire s'étend au-delà de celle-ci sous forme de krummholz.



Figure 5-3 **Haut, gauche :** toundra forestière dans la fosse du Labrador aux environs de 57°N. Les pessières noires à lichens, les pessières à mélèzes et les mélèzaies sur mousses sont confinées aux dépressions du relief. Le haut des versants et le sommet des buttes de moraine de Rogen sont nappés de toundra à arbustes érigés alors que les portions les plus exposées, où le substrat minéral affleure, sont couvertes de toundra à arbustes rampants. La rivière Caniapiscaw est visible en haut à gauche de la photo. **Haut, droite :** toundra forestière au haut du versant est de la vallée de la rivière Koroc (autour de 58°30'N). Les pessières noires épousent les dépressions les mieux protégées du relief. En remontant les versants, une zone de transition vers la toundra à arbustes érigés, formée essentiellement de bouleau glanduleux, est visible sous forme de mélèzes sporadiques et de krummholz d'épinettes noires de densité décroissante. Les sommets recèlent une toundra rocheuse éparsée à lichens et arbustes rampants. Dans certaines portions du paysage, l'absence d'arbre est davantage due à l'absence de dépôts qu'à l'altitude ou l'exposition. **Centre, gauche :** toundra forestière en bordure du ruisseau Naksaluk, environ 7 km à l'est (en amont) de la rivière Koroc qui est visible au loin au centre de la photo. Alors que le terrain s'élève, les formations serrées d'épinettes noires de part et d'autre du cours

d'eau s'ouvrent et laissent la place à une toundra dense à bouleau glanduleux parsemée de krummholz d'épinette noire. Plus haut encore, ces derniers disparaissent complètement. **Centre, droite :** zone de transition entre la toundra forestière et la toundra arctique à arbustes érigés dans la fosse du Labrador, entre la rivière Koksoak et la baie aux Feuilles (environs du lac Enish, 58°N). C'est ici le mélèze qui forme la limite des arbres. Une mélèzaie à krummholz d'épinettes noire est visible au bas à gauche de la photo. Les surfaces environnantes sont couvertes de denses bétulaies glanduleuses au sein desquelles percent çà et là des krummholz d'épinette noire. Les collines rocheuses au loin sont formées de gabbro, roche massive et résistante à l'érosion où l'inlandsis n'a pas laissé de dépôts. La toundra, éparse, se réfugie dans les légères dépressions du relief où l'on trouve un meilleur enneigement et un peu de substrat, issu d'altération ou amené par le vent. **Bas, gauche :** tourbière à paises dans la toundra forestière de la fosse du Labrador. Les paises, bien visibles en raison de leur couleur brune conférée par la tourbe dénudée, sont à régime ombrotrophique alors que le plancher de la tourbière est minérotrophique. **Bas, droite :** un des derniers massifs forestiers vers le nord, trouvant refuge au pourtour d'un lac sans toponyme dans la vallée glaciaire de la rivière Abrat (59°03'N – 065°07'W) tout près de la limite des arbres la plus nordique dans l'est de l'Amérique du Nord. Cette forêt, localement assez dense, est surtout formée d'épinettes noires, sur lichens ou bryophytes.

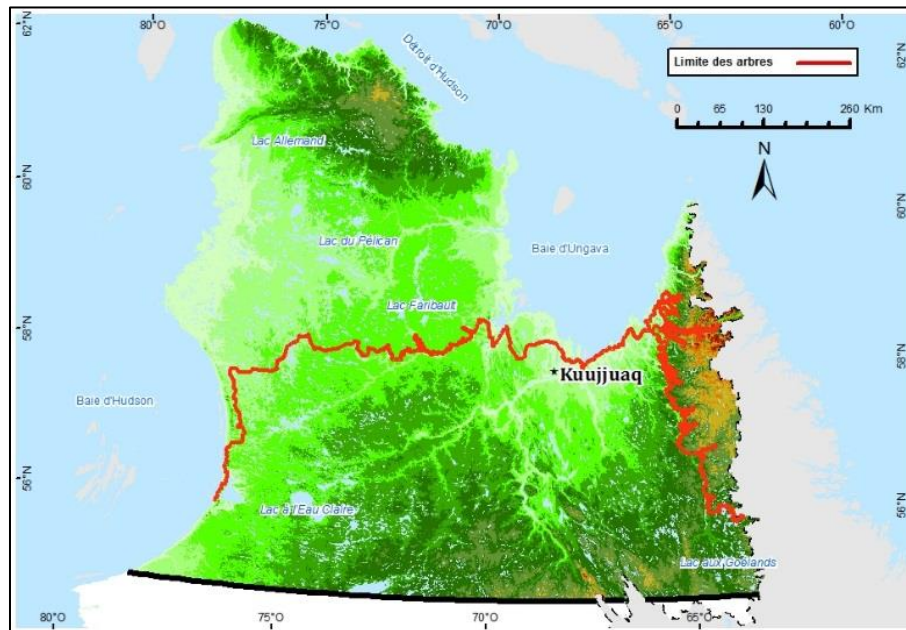


Figure 5-4 Tracé de la limite actuelle des arbres au Nunavik (Québec). L'arrière-plan présente la topographie (altitude croissante de vert pâle à rouge). Source du tracé : ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec, Direction des inventaires forestiers.

Une particularité apparaît dans les tourbières de la toundra forestière par rapport à celles de la pessière à lichens. Bien qu'on y trouve encore des fens structurés en abondance, plusieurs tourbières démontrent des signes de

l'influence croissante du pergélisol et des phénomènes périglaciaires, sous forme de levées cryogènes : les paises et plateaux palsiques (Fig. 5-3). Il s'agit de buttes de tourbe pergélisolée riche en glace de ségrégation, alimentées seulement par les eaux de précipitation. Alors que le plancher de ces tourbières est à régime minérotrophique (avec une végétation en conséquence), les paises et plateaux palsiques sont à régime ombrotrophique. La végétation qui les colonise est peu diversifiée et acidophile; elle présente souvent un couvert lichénique important.

Le rôle important de la topographie est aussi illustré au niveau des peuplements feuillus subarctiques qu'on ne trouve plus que très sporadiquement dans ce domaine. C'est dans les environs du lac Guillaume-Delisle où le relief est très travaillé, de même que dans la vallée de la rivière Caniapiscou et dans l'axe rivières Koksoak-aux Mélèzes qu'on trouve la majorité des feuillus qui persistent dans la toundra forestière. Ceux-ci se présentent sous forme de bosquets et de petites forêts isolés, répartis là où les conditions écologiques sont les plus favorables.

5.2.2 Zone arctique

La zone de végétation arctique s'étend sur tout le territoire compris entre, au sud, la limite latitudinale des arbres et, au nord, le détroit d'Hudson. C'est sur ces vastes terres que la toundra arctique, ce biome sans arbre, étend son emprise. Toutefois, des vestiges d'une époque forestière passée, sous forme de krummholz d'épinette noire, s'agrippent encore au territoire sur une certaine distance au nord de la limite des arbres. Le Québec arctique appartenant au Bas-Arctique, la toundra climacique qui le couvre est fondamentalement une toundra arbustive; à cette différence qu'elle est formée d'espèces érigées dans la partie sud et hémiprostrées ou rampantes dans la portion nord. Au sein du gradient latitudinal de la toundra arctique du Québec, les surfaces occupées par les arbustes érigés diminuent graduellement. Dans la portion méridionale, ils forment des arbustaies denses et étendues qui dominent les surfaces aux conditions écologiques moyennes. Vers le nord, ces étendues s'amenuisent progressivement pour finir par être confinées aux micro-sites les plus protégés (fond de certaines vallées et bas de versants en adret). Ce sont alors les arbustes hémiprostrés ou rampants qui dominent le couvert des surfaces aux conditions écologiques moyennes. La zone de transition entre la toundra arctique à arbustes érigés et celle à arbustes rampants n'est certes pas aussi spectaculaire que la toundra forestière et n'est pas contrôlée par les mêmes processus. Contrairement à cette dernière où

l'étendue et la configuration actuelles sont le reflet du patron de feux couplé à un échec de régénération post-incendie, la structure de la transition entre la toundra arctique à arbustes érigés et celle à arbustes rampants tient plutôt, au-delà de la température proprement dite, à des facteurs d'ordre édaphiques (présence ou non de substrat, nature et épaisseur) et topographiques (exposition au vent, enneigement, épaisseur des dépôts, etc.). Dans le domaine de la toundra arctique à arbustes érigés, la transition altitudinale vers la toundra à arbustes rampants opère partout, même sur des sites à contraste d'élévation relativement faible (quelques dizaines de mètres) et même dans ses secteurs les plus méridionaux, jusque dans les surfaces toundriques de la toundra forestière (Fig. 5-5). Dans ces secteurs, il arrive souvent qu'on trouve encore des bouleaux glanduleux sur les sommets exposés, mais les individus adoptent alors un port hémiprostré ou prostré en tapis ras, qui épousent finement le relief. L'influence des feux, d'ailleurs rares, de faible étendue et de petite superficie (Payette & *al.* 1989), est de toute évidence négligeable dans la toundra.

À l'exception des régions à hautes montagnes, l'influence de la topographie et de la géologie n'est probablement nulle part ailleurs aussi fondamentale et omniprésente que dans la toundra. Dans ce biome lourdement taxé par la rigueur du climat (tant en termes de température que de précipitations), l'exposition et l'enneigement sont tout. Et tous deux sont fonction du relief. Bien que la neige s'accumule davantage dans les formations d'arbustes érigés, le manque d'un haut couvert végétal continu sur l'ensemble du territoire résulte en une emprise importante du vent. Ceci se traduit par un transit majeur de la neige qui se dépose et s'accumule dans les dépressions du relief, en même temps que les débris organiques et les granulométries fines soulevés par le vent. Le couvert nival offre une protection contre l'action asséchante du vent et celle abrasive de la neige en transit, tout en isolant contre les écarts brusques de température. Ainsi, dans la toundra, la végétation est finement calquée sur la répartition et l'épaisseur du couvert nival. Dans les grandes concavités du terrain, la neige s'amoncelle et se compacte; raccourcissant d'autant la saison de croissance. C'est l'exposition, ainsi que l'altitude et la latitude, qui en régleront alors les conséquences sur la végétation. Dans les sites à exposition favorable, la neige accumulée disparaît relativement tôt en saison et l'ensoleillement abondant permet ensuite de rattraper un peu le temps perdu. Ces cuvettes d'accumulation nivale sont le siège d'une toundra à fort couvert, formée d'un mélange d'espèces chionophiles et de certaines espèces boréales qui y trouvent un refuge contre les rigueurs de l'hiver : ce

sont les combes à neige. La végétation est un riche assemblage d'arbustes bas ou rampants et de plantes herbacées sur un tapis continu de bryophytes et de lichens. Toutefois, dans la toundra, l'expression « trop, c'est comme trop peu » prend tout son sens. Dans les sites trop fortement enneigés, les effets bénéfiques d'un couvert nival isolant et protecteur se transforment en effets délétères. Là où la neige s'accumule et se compacte dans les versants d'exposition générale nord ou dans ceux de haute altitude ou latitude, les congères persistent très tard en saison; parfois plus d'une année. La saison de croissance y est trop courte et les conditions locales trop froides pour permettre l'existence d'un couvert végétal autre que très épars, formé surtout de bryophytes et de plantes vasculaires minuscules supportant les conditions les plus extrêmes : ce sont les niches nivales. Combes à neige et niches nivales, les terres arctiques en sont criblées dès qu'on quitte le relief de plaine (Fig. 5-5). La prédominance des niches nivales augmente avec la latitude et l'altitude.

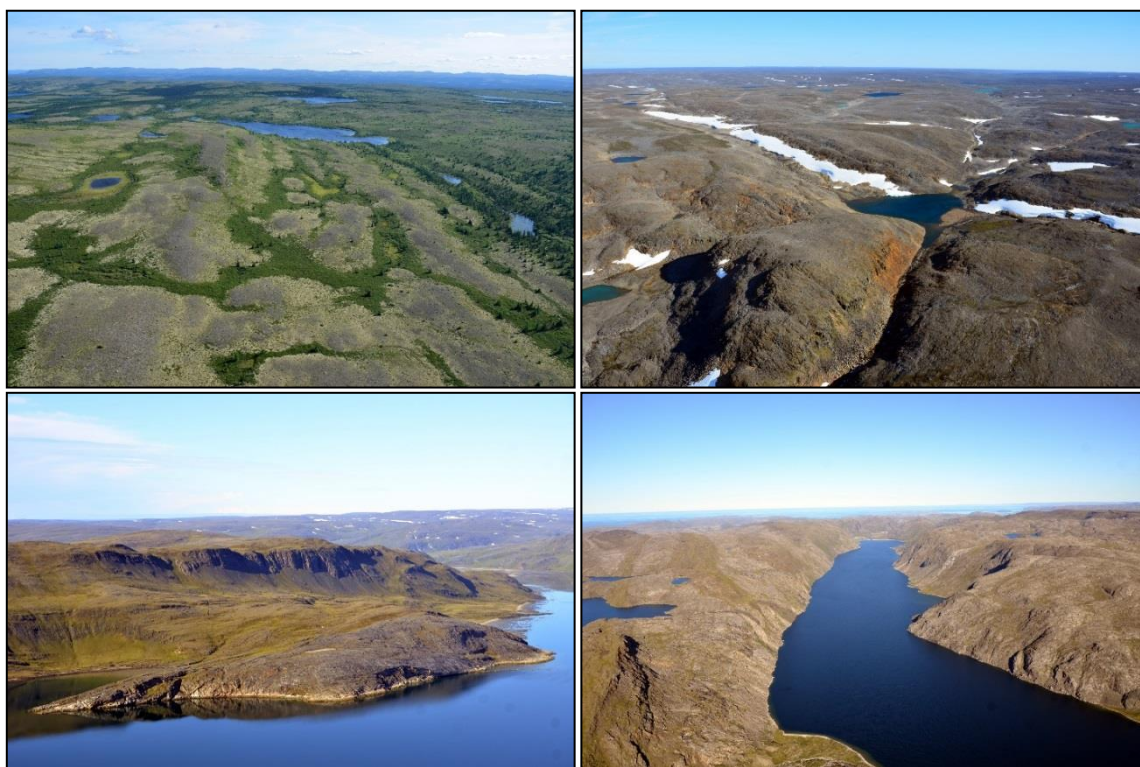


Figure 5-5 **Haut, gauche** : paysage dans le domaine bioclimatique de la toundra forestière, sur des moraines drumlinoïdes dans les hautes terres situées environ 20 km à l'ouest de la rivière Caniapiscou entre les lacs Manon et Kachatach (altitude ca. 450 m; 57°N). On y voit de façon tranchée l'influence fondamentale du relief sur

la végétation. Les forêts ouvertes sont restreintes aux dépressions les mieux protégées (à droite de la photo). Dans les creux bien enneigés du relief, ces forêts cèdent vite la place à une toundra dense et continue à arbustes érigés (surtout le bouleau glanduleux) au sein de laquelle percent des krummholz d'épinette noire. Dès qu'on s'éloigne de ces concavités allongées, les arbustales s'ouvrent et diminuent en hauteur. Ce sont alors des arbustales lichéniques où le bouleau glanduleux adopte une forme en tapis ras et sporadiques (pourtour jaune pâle des buttes sur la photo). Le sommet des buttes, trop peu enneigé et très exposé aux vents, ne supporte plus qu'une toundra discontinue à arbustes rampants sur sol minéral dénudé. **Haut, droite :** haut plateau rocheux entre Salluit et Ivujivik le long du détroit d'Hudson. On y voit de nombreuses niches nivales où de grandes congères persistent en date du 8 août. Cette photo démontre à quel point, dans l'Arctique, toute dépression du relief est propice à l'accumulation de neige soufflée. **Bas, gauche :** terres bordant la baie Wakeham non loin à l'ouest de Kangiqsujuaq dans le détroit d'Hudson. Elles montrent clairement l'influence de la nature du socle rocheux sur la végétation. À l'avant-plan, un lambeau résiduel de roche archéenne acide, massive, granitique. Une ligne nette sépare celui-ci de la roche schisteuse basique qui forme le terrain immédiatement derrière. Bien que l'inlandsis n'ait pas laissé de dépôts sur les surfaces peu inclinées, la météorisation a tôt fait d'éroder les schistes friables pour y former un minimum de dépôt meuble, riche en bases échangeables. La surface accueille une toundra dense et continue alors que le terrain acide granitique adjacent, gris et dénudé, demeure pratiquement dépourvu de dépôt et de couvert végétal. **Bas, droite :** même phénomène que celui illustré dans la photo de gauche, mais vu ici à plus large échelle, le long de la vallée de la rivière Lataille entre Quaqtac et Kangiqsujuaq. Les bandes verdâtres à gauche du lac glaciaire sont calquées sur des enclaves de schistes. Ces enclaves supportent une toundra dense à arbustes rampants basiphiles et herbacées sur dépôts d'altérations minces, mais humifères. Ces bandes alternent avec des bandes grises formées de granite et granodiorite, où les dépôts font défaut et où on trouve une toundra acide beaucoup plus éparse.

Puisque les versants exposés au sud ou à l'ouest offrent un meilleur régime thermique et un mollisol plus épais, c'est dans le bas des pentes ainsi orientées et sur le fond des vallées protégées qu'on trouve la végétation la plus riche et la plus haute; pourvu qu'il y ait un minimum de dépôts meubles. Les plantes arctiques étant en majorité de très petite stature et puisque le couvert végétal est souvent formé en majorité de plantes invasculaires, la micro-topographie exerce une influence majeure sur la structure et la composition de la végétation en contrôlant l'accumulation nivale et l'humidité locales. En raison de l'omniprésence des phénomènes périglaciaires (cryoturbation, solifluxion, etc.), cette micro-topographie est partout très travaillée là où il y a du substrat meuble avec au moins une fraction de granulométrie fine (limon et argile). L'influence de la micro-topographie est d'autant plus importante que le sol est gelé en permanence non loin sous la surface. Sur un sommet de colline, même une très légère dépression, où s'accumule un tant soit peu de neige l'hiver, suffira pour changer complètement la composition du couvert végétal et en augmenter la densité par rapport aux surfaces exposées en périphérie immédiate. Au pourtour d'un bloc erratique, les surfaces sous le vent où

s'accumule un peu de neige supportent une végétation tout autre, et bien plus dense, que les surfaces opposées exposées au vent dominant.

L'influence de la géologie sur la végétation de toundra est particulièrement probante là où l'inlandsis a laissé très peu ou pas de dépôts meubles; situation qui prévaut dans de larges pans de l'Arctique québécois. Fondamentalement, les espèces qui dominent le couvert végétal de la toundra sur socle rocheux acide ne sont pas du tout les mêmes que celles qui forment le couvert sur socle basique; bien qu'il existe un cortège d'espèces compagnes ubiquistes indifférentes à la nature du substrat. Une distinction aussi tranchée ne s'observe pas dans les forêts du Haut-Boréal, où les espèces qui dominent le couvert forestier sont les mêmes, quelle que soit la nature du socle rocheux. Dans le paysage arctique, le passage d'une enclave de roche basique relativement friable à une roche acide (friable ou non) est tranché au couteau (Fig. 5-5). La majorité du Québec arctique est formée de roches archéennes acides, granito-gneissiques, massives, peu sensibles à la météorisation et se désagrégeant alors en blocs. En dehors des lichens saxicoles qui couvrent le roc affleurant, les paysages formés de ces roches sont grisâtres et mornes, ne supportant qu'une toundra très éparse formée d'espèces xérophiiles et acidophiles, principalement des lichens et la mousse *Racomitrium lanuginosum*. À l'opposé, là où le socle est formé de roches sédimentaires ou métamorphiques basiques et plus ou moins friables, la cryoclastie a tôt fait de générer un minimum de dépôts meubles d'altération, dont même quelques centimètres suffisent pour la plupart des plantes arctiques. Ces enclaves de roches basiques fournissent ainsi non seulement un minimum de substrat meuble, mais des bases échangeables qui font cruellement défaut dans les sites sur roche acide et dans un environnement où le climat froid ralentit la décomposition et le recyclage des nutriments. Ces enclaves supportent de ce fait une toundra dense et à diversité floristique élevée, souvent établie sur un substrat fort mince, mais de grande qualité, formé d'une terre noire riche en matière organique bien décomposée et ce, du niveau du roc jusqu'à la surface.

En dépit du fait que les précipitations sont très faibles dans l'Arctique (le nord de la péninsule d'Ungava se trouvant au-delà de l'isohyète annuel de 300 mm), et diminuent graduellement du sud au nord, les surfaces où le relief est peu travaillé est loin d'avoir une allure désertique. En raison du pergélisol qui entrave de façon majeure le drainage, l'eau a tendance à s'accumuler dans la moindre dépression du paysage. De ce fait, la toundra humide sur sol minéral et les fens arctiques abondent. Ceux-ci sont bien souvent établis sur

des couches de tourbe peu épaisses (10-15 cm) et peuvent être qualifiés de fens arctiques minces. L'importance de la toundra humide dans le paysage est exacerbée, surtout dans les versants des secteurs les plus nordiques du Québec arctique, par le ruissellement nival en provenance des congères qui fondent tranquillement tout au long de l'été.

5.2.2.1 Domaine de la toundra arctique à arbustes érigés

Ce domaine bioclimatique couvre les portions les plus méridionales de l'Arctique québécois, de la limite des arbres vers le nord jusqu'au voisinage du 61^e parallèle, soit sur près de 400 km à son point le plus large. Il trouve sa limite la plus nordique sur les côtes de la baie d'Hudson, en concordance avec la marge sud de la fosse de l'Ungava à la hauteur de la baie Mosquito. Vers l'est, cette limite passe au sud du lac Nantais et s'incurve ensuite vers le sud pour rejoindre la rivière Arnaud environ à la hauteur de Kangirsuk. Au nord de cette limite, la toundra à arbustes érigés ne se trouve plus qu'en formations isolées et peu étendues, restreintes aux vallées les plus profondes et les mieux protégées : portion aval de la rivière Kovik, puis Salluit et ensuite vers l'est uniquement le long des fjords et des vallées glaciaires jusqu'à Quaqtaq.

Dans la toundra arctique à arbustes érigés, il se produit en se déplaçant du sud vers le nord un phénomène comparable à celui que subit la forêt du Haut-Boréal, qui passe de la pessière à lichens au sud (forêts ouvertes continues) vers la toundra forestière au nord. Le bouleau glanduleux est, et de loin, l'espèce maîtresse de ce domaine bioclimatique arctique. Dans l'est de l'Arctique nord-américain, cet arbuste est l'équivalent, pour la toundra arctique, de ce que représente l'épinette noire pour la forêt boréale. Bien que le bouleau glanduleux ne forme pas de krummholz comme l'épinette noire, il adopte néanmoins une panoplie de formes selon le degré d'exposition. Il passe de formations étendues, denses et hautes parfois de plus de 1,5 m dans la partie sud de la toundra arctique (Fig. 5-6) à des tapis ras, discontinus et sporadiques ne dépassant guère 10-15 cm de haut dans les sites les plus exposés à la limite de sa distribution altitudinale ou latitudinale (Fig. 5-6). Ces tapis sont alors entrecoupés de surfaces dénudées (roc affleurant ou ostioles de toundra) et de toundra à arbustes rampants sur fond de bryophytes et de lichens. Dans une telle comparaison, les hauts individus sont l'équivalent des épinettes arborescentes alors que les tapis ras sont l'équivalent des krummholz empétrôides d'épinette noire. Dans la portion septentrionale du domaine bioclimatique, où l'on passe graduellement vers le domaine de la toundra arctique à arbustes rampants, les arbustales érigées sont confinées aux

dépressions de mieux en mieux protégées, comme le sont les forêts ouvertes dans la toundra forestière.



Figure 5-6 **Haut, gauche** : toundra à arbustes érigés formée d'un dense couvert continu de bouleau glanduleux haut d'environ 50 cm à plus d'un mètre. Ces grandes bétulaies couvrent la majorité des versants d'une vallée protégée située environ 15 km au nord de la rivière Koroc (près du 59°N). **Haut, droite** : toundra arctique à arbustes érigés au nord de la rivière Koroc. Du bas vers le haut du versant (de droite à gauche de la photo), les formations denses et continues de bouleaux glanduleux s'ouvrent peu à peu et leur taille diminue. Dans les parties supérieures de la pente, les bétulaies finissent par être confinées aux sites les mieux enneigés où les formations sont égrenées en plaques discontinues. **Centre, gauche** : arbustaies hautes à aulne crispé occupant les cuvettes dans le flanc érodé d'une terrasse glaciomarine, en bordure sud de Weymouth Inlet

(fjord à l'embouchure de la rivière Abrat; 59°20'N). Les bosquets atteignent 3 m de haut et même davantage. **Centre, droite** : arbustaie basse basiphile à saule pubescent (*Salix vestita*) occupant une légère dépression au sommet d'une colline de marbre calcitique en bordure nord de la baie Tasikallak (fjord à l'embouchure de la rivière Baudan, 59°N). **Bas, gauche** : fen arctique à coin de glace dans la zone de transition entre la toundra forestière et la toundra arctique à arbustes érigés vers 58°20'N, entre les rivières Koksoak et False. Une mélèzaie très ouverte à krummholz d'épinette noire est visible en arrière-plan au centre de la photo et la rivière False au loin, un peu au nord du lac Kohlmeister. **Bas, droite** : terres hautes (550 à 650 m) dans le contrefort des monts Torngat à la tête de la vallée de la rivière Baudan (58°45'N). De grandes congères persistent en date du 1^{er} août. Ces terres accueillent une toundra éparse surtout à bryophytes et lichens, localement à arbustes rampants dans les sites mieux protégés.

Bien que le bouleau glanduleux soit l'espèce la plus fréquente et abondante dans la toundra à arbustes érigés, une autre espèce y tient une place qu'on ne saurait négliger : l'aulne crispé (*Alnus alnobetula* (Ehrh.) K. Koch subsp. *crispa* (Ait.) Raus). Cependant, c'est véritablement dans les portions méridionales de ce domaine bioclimatique et dans les ouvertures de la toundra forestière plus au sud que cet arbuste occupe une place de choix, bien qu'il remonte jusqu'au 60°N le long de la rivière Arnaud. L'aulne crispé forme des bosquets denses dépassant parfois 3 m de hauteur, surtout sur les dépôts alluviaux en bordure des cours d'eau et dans la toundra mésique sur dépôts épais. On le trouve parfois aussi dans des micro-sites plutôt xériques (concavités dans les buttes rocheuses, bas d'escarpements) pourvu que l'exposition soit favorable et que le site jouisse d'un bon enneigement hivernal. Dans la toundra, les bosquets d'aulne crispé saillent dans le paysage et captent donc la neige en transit, l'accumulant et profitant de son effet isolant et protecteur. Cette protection se poursuit l'été alors que le dense couvert de feuilles et de branches offre, en sous-étage, un environnement ombragé, mais bien protégé contre les éléments. Plusieurs espèces boréales, absentes de la toundra environnante, y trouvent d'ailleurs refuge (*Dryopteris expansa* (C. Presl) Fraser-Jenkins & Jermy, *Ribes glandulosum* Grauer, *Solidago macrophylla* Banks ex Pursh, etc.).

Dans les sites les mieux protégés à la frontière de l'Arctique, d'autres arbustes érigés participent parfois au couvert végétal de la toundra arbustive : le bouleau mineur (*Betula minor* (Tuck.) Fernald), le génévrier commun déprimé (*Juniperus communis* L. var. *depressa* Pursh), la viorne comestible (*Viburnum edule* (Michx.) Raf.) et même un feuillu arborescent, le sorbier plaisant (*Sorbus decora* (Sargent) C.K. Schneid.). Ces espèces se trouvent le plus souvent en individus ou petits bosquets isolés et n'occupent donc qu'une part infime du couvert arbustif total. De plus, en bordure de la mer, dans les basses terres

environnantes et sur les talus d'éboulis, une espèce de saule érigé abonde souvent : le saule à beaux fruits (*Salix glauca* L. var. *cordifolia* (Pursh) Dorn).

Au sein des quelques enclaves de roches basiques qu'on trouve dans les environs de la baie Keglo et dans la fosse du Labrador, le bouleau glanduleux cède sa place au saule pubescent (*Salix vestita* Pursh) qui peut former des arbustaies érigées assez denses et étendues (Fig. 5-6). On y trouve parfois aussi la shépherdie du Canada (*Shepherdia canadensis* (L.) Nutt.). Toutefois, l'essentiel des arbustaies de ces enclaves sont rampantes et formées de dryade à feuilles entières (*Dryas integrifolia* Vahl subsp. *integrifolia*), accompagnée surtout du rhododendron de Laponie (*Rhododendron lapponicum* (L.) Wahlenb.).

Les basses terres alluviales accueillent des marécages arbustifs constitués surtout du saule à feuilles planes (*Salix planifolia* Pursh) en formations denses et hautes pouvant dépasser 4-5 m de haut. Dans les zones méridionales du domaine bioclimatique, le saule à fruits argentés (*Salix argyrocarpa* Andersson) participe souvent au couvert des marécages arbustifs et le domine parfois. Les dépressions du relief accueillent partout une toundra humide sur sol minéral ou des fens arctiques. Cette omniprésence des milieux humides est favorisée par la présence d'un pergélisol continu qui entrave le drainage vertical. Bien que le dépôt de tourbe atteigne une épaisseur considérable dans certains fens arctiques de ce domaine, plusieurs reposent sur des dépôts organiques relativement minces. L'épaisseur de tourbe est souvent inférieure à 30 cm et parfois même de l'ordre de 10-15 cm seulement. Ce sont néanmoins des écosystèmes accumulateurs de tourbe qui accueillent une flore de tendance tourbicole et acidophile. Certains fens sont disséqués d'un réseau polygonal de fentes de gel dans lesquelles des intrusions de glace massive se sont formées : ce sont les fens arctiques à coin de glace. Bien que ceux-ci soient plus fréquents dans la frange qui borde le détroit d'Hudson au nord de Quaqtak et la baie d'Hudson d'Ivujivik à Akulivik, on en trouve à l'occasion bien plus au sud; jusque dans la zone de transition entre la toundra forestière et la toundra arctique aux environs de l'embouchure de la rivière Koksoak (Fig. 5-6). Les fens arctiques sont surtout formés de plantes herbacées (en majorité des Cypéracées) en association plus ou moins importante avec le bouleau glanduleux et divers arbustes rampants sur les buttons (*Empetrum nigrum* L. subsp. *hermaphroditum* (Hagerup) Böcher, *Rhododendron tomentosum* Harmaja, *Salix arctophila* Cockerell, *Vaccinium uliginosum* L.).

Enfin, on ne saurait passer sous silence l'enclave topographique et écologique que sont les monts Torngat. Bien qu'ils soient inclus dans le domaine bioclimatique de la toundra à arbustes érigés, ce type de toundra est plutôt l'apanage des vallées alors que la majorité des surfaces sont couvertes de toundra à arbustes rampants (Fig. 5-6). Les sites les plus élevés et les hauts sommets sont même le lieu d'une toundra cryptogamique à couvert épars, au faciès Haut-Arctique marqué et qui s'apparente à ce que l'on trouve dans certains déserts polaires de l'archipel arctique canadien.

5.2.2.2 Domaine de la toundra arctique à arbustes rampants

La toundra arctique à arbustes rampants constitue le domaine bioclimatique le plus nordique du Québec. Il englobe les terres situées de la limite nord de la toundra arctique à arbustes érigés jusqu'au détroit d'Hudson et jusqu'aux côtes de la baie d'Hudson à la hauteur d'Akulivik. À l'exception des basses terres entre Akulivik et Ivujivik, c'est un territoire au relief contrasté et très travaillé, qui culmine à une altitude de près de 700 m dans les monts de Puvirnituk, à la tête de la rivière Lacoudray au sud du Havre Douglas. La côte du détroit d'Hudson, d'Ivujivik à Quaqtaq, est formée d'une série de fjords de taille variable, donnant sur des vallées glaciaires profondes aux versants escarpés qui incisent les plateaux rocheux. Ces fjords sont entrecoupés de façades rocheuses plongeant dans la mer. Bien entendu, cette topographie sculptée par les glaciers influence profondément la végétation. Les monts de Puvirnituk, et les monts d'Youville qui les précèdent à l'ouest, forment une entité tectonostratigraphique de la fosse de l'Ungava, de grand axe est-ouest, de même qu'une enclave topographique majeure. Leurs sommets plats, exposés et très ventés, arborent un faciès végétal au caractère Haut-Arctique marqué, bien que ce soit de moins en moins le cas alors que l'on s'éloigne des monts de Puvirnituk vers l'ouest et que l'altitude diminue en conséquence. La géologie de la fosse de l'Ungava, comme celle de la fosse du Labrador qui vient mourir entre Kangirsuk et Quaqtaq à la limite sud-est de ce domaine bioclimatique, est excessivement complexe et variée. Elle influence aussi grandement la végétation, autant par sa nature acide ou basique que par sa structure. Par exemple, les formations de basalte et de gabbro au nord de Kangirsuk sont en saillie dans le paysage parce qu'il s'agit de roches massives résistantes à l'érosion. Elles forment des collines rocheuses allongées qui accueillent une végétation différente de celle qui nappe les basses terres environnantes.

C'est dans ce domaine bioclimatique que les phénomènes périglaciaires (cryoturbation, solifluxion, etc.) trouvent leur expression la plus détaillée et

spectaculaire, sous forme de sols structurés en mosaïques complexes qui s'étendent souvent à perte de vue et affectent tous les sites où on trouve un tant soit peu de dépôts meubles. Il s'agit surtout de sols structurés par cryoturbation en champs de cellules plus ou moins arrondies, d'ordre décimétrique à métrique, formées le plus souvent d'un cercle de pierres externe et d'un ostiole de toundra central plus ou moins dénudé, séparés l'un l'autre par un bourrelet végétalisé. Dans les pentes, la solifluxion entre en jeu et ces cellules s'étirent, générant des sols striés. La végétation est, bien entendu, finement calquée sur la micro-topographie générée par ces phénomènes périglaciaires.

La végétation des terrains aux conditions écologiques moyennes est dominée par des arbustes hémiprostrés ou rampants (Fig. 5-7), parmi lesquels les éricacées et les saules tiennent une place prépondérante :

- busserole alpine (*Arctous alpina* (L.) Nied.);
- cassiope tétragone (*Cassiope tetragona* (L.) D. Don subsp. *tetragona*);
- camarine hermaphrodite (*Empetrum nigrum* L. subsp. *hermaphroditum* (Hagerup) Böcher);
- petit thé du Labrador (*Rhododendron tomentosum* Harmaja)
- saule arctique (*Salix arctica* Pallas);
- saule herbacé (*Salix herbacea* L.);
- saule raisin-d'ours (*Salix uva-ursi* Pursh);
- airelle des marécages (*Vaccinium uliginosum* L.);
- airelle rouge (*Vaccinium vitis-idaea* L.).

L'ensemble repose sur un fond de bryophytes et de lichens très diversifiés dont l'abondance de l'un et l'autre varie en fonction des conditions d'humidité locales. Les plantes herbacées n'occupent qu'une proportion secondaire du couvert. Vues de loin et à l'oblique, on croirait cependant le contraire parce que celles-ci dépassent en hauteur, et souvent de beaucoup, les autres strates végétales. Leurs parties aériennes meurent jusqu'au sol, mais demeurent souvent dressées pendant plusieurs années, de sorte qu'il se forme une litière dressée de couleur paille ou beige, parfois bien abondante et très visible de loin, qui colore la toundra en conséquence. Une fois au sol et à la verticale cependant, on constate que le gros du couvert est dû à des espèces rases et tapissantes, arbustives ou cryptogamiques, et non aux herbacées. Le couvert en plantes herbacées est surtout formé de graminoides (*Anthoxanthum monticola* (Bigelow) Veldkamp subsp. *alpinum* (Sw. ex. Willd.) Soreng, *Carex bigelowii* Torr. subsp. *bigelowii*, *Luzula confusa* Lindeb., *Luzula nivalis* (Laest.)

Spreng.) et de diverses phorbes (*Saxifraga* spp., *Oxytropis* spp., *Ranunculus* spp., etc.).



Figure 5-7 **Haut, gauche** : toundra arctique à arbustes rampants nappant les flancs d’une butte dans le cours supérieur de la rivière Vachon. Le till est remanié par cryoturbation et solifluxion. Un ostiole de toundra à surface caillouteuse est visible au centre de la photo. Le couvert est dominé par des arbustes éricacés : *Cassiope tetragona* subsp. *tetragona*, *Vaccinium uliginosum* et *V. vitis-idaea*; ainsi que par *Salix arctica*. **Haut, droite** : toundra basique à arbustes rampants du côté sud de la baie Wakeham, sur une formation de schistes. Les surfaces mésiques sont couvertes d’une arbustaie rampante herbacée à *Dryas integrifolia* subsp. *integrifolia*/ *Carex rupestris*. C’est une toundra relativement verdoyante, riche en espèces et à couvert élevé. **Centre, gauche** : vue du vaste plateau formant les zones sommitales des monts de Puvirnituq dans les environs de Katinniq (mine Raglan). Les dépôts minces sont structurés par cryoturbation en cercles de pierres et ostioles de toundra, à bourrelet végétal formé surtout de la bryophyte *Racomitrium lanuginosum*. C’est une toundra éparsée dominée par des

cryptogames (bryophytes et lichens). Même les pierres sont cryotriées en cercles excentriques : les graviers au centre, les cailloux et les blocs vers l'extérieur. **Centre, droite** : toundra humide sur sol minéral dans les versants doux de part et d'autre d'un cours d'eau dans les monts de Puvirnituq. Le couvert est dominé par les plantes herbacées. Le versant au loin est affecté par le ruissellement nival alors que celui au centre de la photo arbore des sols structurés à ostioles de toundra et bourrelets végétalisés. Un fen arctique à coins de glace est visible au centre droite de la photo en bordure du cours d'eau. **Bas, gauche** : avant-poste de toundra arctique à arbustes érigés couvrant un cône de déjection et le fond de la vallée de la rivière Lacoudray, débouchant dans le bras sud-est du Havre Douglas. La végétation est une bétulaie glanduleuse en plaques discontinues, avec *Calamagrostis lapponica* dans les ouvertures. De hautes saulaies à *Salix planifolia* sont aussi présentes sur le fond de la vallée. **Bas, droite** : hautes saulaies à *Salix alaxensis* var. *alaxensis* en marge d'un delta glaciomarin, colonisant des îles alluviales basses de la rivière Qullisau Kuunga entre les lacs Watts et François-Malherbe. Les arbustaies comprennent aussi *Betula glandulosa* et *Salix planifolia*.

La végétation qui colonise les surfaces reposant sur les roches basiques des fosses de l'Ungava et du Labrador n'est pas composée des mêmes espèces que celle établie sur roche acide ou intermédiaire, bien qu'on y trouve un cortège d'espèces ubiquistes indifférentes à la nature du substrat (dont plusieurs espèces nommées au paragraphe précédent). Elle est principalement formée d'une toundra rase basique associant un arbuste rampant, la dryade à feuilles entières (*Dryas integrifolia* Vahl subsp. *integrifolia*) à une plante herbacée, le carex des rochers (*Carex rupestris* All.). D'autres espèces fréquentes incluent le carex faux-scirpe (*Carex scirpoidea* Michx. subsp. *scirpoidea*), le rhododendron de Laponie (*Rhododendron lapponicum* (L.) Wahlenb.) et le saule réticulé (*Salix reticulata* L.). Même situation chez les bryophytes, où la composition en espèces change même s'il demeure, dans cette strate aussi, une série d'espèces indifférentes à la nature du substrat. Les bryophytes *Rhytidium rugosum* (Hedw.) Kindb. et *Tortella tortuosa* (Hedw.) Limpr. sont particulièrement fréquentes et abondantes. La toundra établie sur roche basique est une toundra riche et très diversifiée, à densité de couvert élevée (Fig. 5-7).

Les basses terres et les versants soumis au ruissellement nival hébergent une toundra humide sur sol minéral ou des fens arctiques minces (Fig. 5-7). Bien qu'on trouve çà et là des tourbières minérotrophes à coins de glace, ce type n'est pas le plus répandu. La plupart des fens sont plutôt des fens uniformes, parfois à mares, mais alors sans structure apparente. Leur surface est parfois percée d'ostioles de toundra et fréquemment en creux et en bosses atteignant 20 ou 30 cm de hauteur. Des blocs (possiblement cryoéjectés) sont parfois présents sous la surface de ces bosses alors que d'autres sont entièrement

formées de sphaignes. La toundra humide est dominée par diverses cypéracées (*Carex aquatilis* Wahlenb. s. lat., *C. membranacea* Hook., *C. rariflora* (Wahlenb.) Sm., *Eriophorum angustifolium* Honck. subsp. *angustifolium*, etc.); une graminée, l'arctagrostide à larges feuilles (*Arctagrostis latifolia* (R. Br.) Griseb. subsp. *latifolia*) et un arbuste rampant, le saule arctophile (*Salix arctophila* Cockerell). Les fens sur substrat basique sont passablement plus riches et diversifiés. S'y ajoutent plusieurs espèces basiphiles (*Carex microglochin* Wahlenb., *C. simpliciuscula* Wahlenb., *Eriophorum callitrix* Cham., etc.).

La toundra qui occupe les hautes terres des monts de Puvirnituk et d'Youville, le plateau entre Salluit et Ivujivik et celui entre Kangiqsujaq et Quaqtaq est éparsée et très souvent dominée par des invasculaires, particulièrement la mousse *Racomitrium lanuginosum* et des lichens variés (Fig. 5-7). Ce sont des secteurs rocheux ou pierreux, au climat particulièrement rude, où toutes les surfaces à dépôts meubles sont fortement structurées par l'activité périglaciaire. La diversité en plantes vasculaires y est faible. Quelques arbustes hémiprostrés ou rampants s'y maintiennent (surtout *Cassiope tetragona* subsp. *tetragona*, *Salix arctica* et *S. herbacea*) de même que quelques plantes herbacées surtout graminoides.

Le domaine bioclimatique de la toundra arctique à arbustes rampants comprend des avant-postes de toundra arctique à arbustes érigés dans les sites les mieux protégés. Les plus importants se trouvent dans le cours aval de la rivière Kovik et les basses terres environnantes, dans le fjord Saglék, les baies Déception et Wakeham, le Havre-Douglas (Fig. 5-7), autour des lacs glaciaires Watts, François-Malherbe et Duquet (Fig. 5-7) de même qu'autour du lac Roberts au nord de Kangirsuk. Il s'agit principalement de bétulaies glanduleuses, mais on trouve aussi, sur les cônes de déjection et les îles alluviales des vallées glaciaires, de grands massifs de saules dressés hauts de plusieurs mètres. Ces saulaies sont formées surtout de saule à feuilles planes (*Salix planifolia* Pursh), mais localement aussi de saule feutré (*Salix alaxensis* (Andersson) Coville var. *alaxensis*).

5.3 Dynamique spatio-temporelle de la végétation : scénarios possibles face à un climat changeant

5.3.1 Vers le haut et le nord : une migration de la limite des arbres?

Les limites latitudinales et altitudinales des arbres sont fondamentalement contrôlées par le climat (Epstein et al. 2004) et celles du Québec-Labrador nordique représentent les écosystèmes forestiers les plus climatiquement « stressés » de l'est de l'Amérique du Nord (Payette 2007). C'est en remontant vers le nord ou en s'élevant en altitude, alors que la température annuelle moyenne diminue, qu'on atteint éventuellement cette limite. Ainsi, la position de la limite des arbres est le reflet d'un équilibre dynamique entre, d'une part, la ou les espèce(s) qui forment cette limite, leur rusticité et leur capacité de régénération (sexuée comme végétative) et, d'autre part, les conditions climatiques qui prévalent à une échelle temporelle pluridécennale. Payette et al. (1982) mentionnaient d'ailleurs que la limite des arbres dans les environs de la rivière aux Feuilles à la fin des années 70 était en équilibre avec le climat actuel. Cependant, 35 ans plus tard, les conditions climatiques de cette région du Nunavik ont bien changé...

Dans la mesure où les modèles climatiques prévoient, pour l'horizon 2080, une augmentation des températures annuelles moyennes allant de 3,5 à 10°C selon les scénarios aux latitudes de la limite actuelle des arbres, il est logique d'en conclure qu'on pourrait assister à une remontée généralisée et spectaculaire de la limite des arbres vers le nord et le haut des versants. Callaghan et al. (2002) tiennent d'ailleurs des propos de cet ordre, mentionnant que les modèles de répartition future de la végétation suggèrent une invasion rapide et dramatique de la toundra par la taïga. Or, nous verrons que les connaissances acquises sur la dynamique passée de la limite latitudinale des arbres au Nunavik et ailleurs dans le Circumboréal laissent entendre qu'un tel scénario est peu probable.

Plusieurs études se sont penchées sur la dynamique latitudinale et altitudinale de la limite des arbres dans un passé récent (Gagnon et Payette 1981, Payette et al. 1982, Lavoie et Payette 1994; Lescop-Sinclair et Payette 1995, Szeicz et Macdonald 1995, Payette et al. 2001, Lloyd et Fastie 2002, Gamache et Payette 2005, Payette 2007, Harsch et al. 2009, Dufour-Tremblay et al. 2012a, Trant et Hermanutz 2014) comme ancien (Payette et Fillion 1985, Gajewski et al. 1993, Lavoie et Payette 1996, Mamet et Kershaw 2012); alors que d'autres ont tenté de la modéliser pour en évaluer l'évolution future (Noble 1993,

Chapin et Starfield 1997, Rupp et al. 2001). Ces études ont mis en évidence le fait que maints facteurs autres que climatiques sont impliqués dans la dynamique locale de la limite des arbres. Dans un contexte de réchauffement climatique, ces facteurs viendront nuancer les modalités et l'ampleur de la réponse positive de cette limite, voire même la contrecarrer. Ces facteurs sont d'ordre multiple, abiotiques comme biotiques : présence et qualité du substrat, stress hydrique, sites de germination, viabilité et prédation des graines, allélopathie, survie des semis, etc.

Il existe plusieurs indices d'une récente avancée de la limite latitudinale et altitudinale des arbres en réponse apparente au réchauffement du climat en cours depuis le début des années 1900 et qui s'accélère depuis le dernier quart de siècle. De tels indices abondent dans les environs de Kangiqsualujjuaq, où cette limite est formée par le mélèze laricin et où il y aurait eu une vague d'établissement de semis au niveau de la limite des arbres et au-delà depuis 1990 (Tremblay 2009, Tremblay et al. 2012, Dufour-Tremblay et al. 2012a; Fig. 5-8). À la limite des arbres, la régénération et l'expansion sont limitées par la production de graines viables et le succès de germination, tous deux tributaires du climat. Or, des taux de germination avoisinant 100 % ont été obtenus en laboratoire sur des graines de mélèze récoltées en 2008 autour de Kangiqsualujjuaq (Tremblay & Lévesque, inéd.). Si la production de graines de qualité était une contrainte à l'expansion du mélèze auparavant, elle ne l'est apparemment plus aujourd'hui. La réponse de l'épinette noire est différente et moins remarquable. Elle semble plutôt se traduire par le passage d'une forme en *krummholz* vers une forme arborescente. Très peu de semis et de gaulis ont été observés, ce qui suggère que la régénération de cette espèce par des moyens sexués est déficiente, malgré une viabilité accrue de ses graines (Dufour-Tremblay & Boudreau 2011). Cet échec serait dû à une plus grande susceptibilité de l'épinette noire aux composés allélopathiques du couvert arbustif que le mélèze, ainsi qu'au manque de lits de germination adéquats (Dufour-Tremblay et al. 2012b). Dufour-Tremblay et Boudreau (2011) ont d'ailleurs démontré que l'établissement de semis était plus élevé dans les sites perturbés (sol minéral mis à nu), notamment dans les années suivant une forte activité du caribou. Dans un contexte où les troupeaux de caribous du Nunavik sont en décroissance marquée, la mise en disponibilité de lits de germination favorables à l'épinette noire dans les prochaines décennies sera plutôt tributaire de perturbations liées à l'activité périglaciaire et à la dégradation du pergélisol. Cette dégradation sera évidemment favorisée par le réchauffement climatique important que prévoient les modèles. Cependant,

l'augmentation du couvert arbustif résultant du même réchauffement risque, lui, d'avoir l'effet contraire; en diminuant la quantité et la qualité des lits de germination.



Figure 5-8 Vue d'un versant dans les environs de Kangiqsualujjuaq, prise en 2008. De nombreux gaulis de mélèze laricin sont visibles au-delà de la limite altitudinale des arbres, indiquant que celle-ci a entamé un déplacement vers le haut de la pente. Quelques krummholz d'épinette noire sont également visibles, de même que de grandes arbustaies à bouleau glanduleux.

D'autres signes d'une avancée récente de la limite des arbres ont été trouvés, tant au Québec et au Labrador que dans le centre et l'Ouest canadien. Depuis 1900, il s'est produit en réponse au réchauffement du climat une élévation de la limite des arbres altitudinale dans la toundra forestière du Québec, surtout par établissement de semis d'épinette noire dans la portion sud et par la croissance en hauteur de krummholz préétablis dans la portion nord (Gamache & Payette 2005). Lavoie et Payette (1994) rapportent une avancée de la limite des arbres latitudinale d'environ 4 km depuis la fin des années 1800 dans la région de la rivière Boniface, principalement via le passage vers une croissance

arborescente des krummholz préexistants. Une avancée de la limite des arbres d'environ 12 km vers la baie d'Hudson depuis 1850 a été documentée par Lescop-Sinclair et Payette (1995). Ici aussi cette avancée s'est concrétisée via des changements structuraux de krummholz préétablis plutôt que par l'établissement de semis. Le long des côtes du Labrador, la limite latitudinale et altitudinale, formée là par l'épinette blanche, a répondu positivement au réchauffement des dernières décennies par une avancée de quelques dizaines de mètres (Payette 2007). À l'opposé, cette limite a reculé du même ordre de grandeur à partir de 1750 sur le plateau labradorien et ne s'est pas remise depuis, indiquant que le réchauffement récent n'a pas été suffisant pour inverser la tendance dans le Labrador intérieur. Dans les monts Mealy au Labrador, Trant et Hermanutz (2014) signalent aussi une avancée de la limite altitudinale des arbres, via l'épinette noire. La limite des arbres a avancé dans les environs de Churchill au cours du 20^e siècle, mais la réponse n'a pas été uniforme d'un site à l'autre et d'une espèce à l'autre (Mamet & Kershaw 2012). Dans les montagnes du Nord-ouest canadien, Szeicz et Macdonald (1995) ne rapportent que des changements mineurs de la limite altitudinale des arbres, formée par l'épinette blanche, au cours des 100 à 150 dernières années. Ici, les effets bénéfiques de températures plus chaudes auraient été contrecarrés au moins en partie par un stress hydrique induit par ces mêmes températures plus élevées. Harsch et al. (2009), dans une méta-analyse de la dynamique de la limite des arbres depuis 1900 à 166 sites à travers le monde, indique que l'avancée n'est pas universelle et que certaines sont demeurées stables. Le point commun de l'ensemble de ces études est qu'une avancée de la limite des arbres a été détectée dans la majorité des sites, mais que cette avancée demeure partout mineure et peu significative malgré une échelle temporelle qui atteint plusieurs décennies, voire plus d'un siècle. Il s'agit là, par ailleurs, d'une échelle temporelle du même ordre que celle des modélisations climatiques réalisées par Ouranos pour l'horizon 2080.

À cet égard, les divers exercices de modélisation de la limite des arbres dans un contexte de changement climatique suggèrent tous que la réponse de cette limite à une amélioration des conditions climatiques est passablement lente. Chapin et Starfield (1997) estiment à entre 100 et 150 ans la période de décalage entre un réchauffement du climat et l'afforestation de la toundra alaskienne. Une simulation effectuée par Rupp *et al.* 2001 pour une chaîne de montagnes en Alaska indique qu'une afforestation généralisée jusqu'à la façade nord actuellement dépourvue d'arbre nécessiterait de 3000 à 4000 ans, même dans un contexte estival beaucoup plus chaud (+6°C). Ces auteurs concluent

d'ailleurs que les prédictions actuelles surestiment grandement la réponse de la végétation aux changements climatiques, du moins pour l'Alaska. Au Québec, toutes les études qui se sont penchées sur la dynamique passée de la limite latitudinale des arbres démontrent que les fluctuations holocènes ont été de faible amplitude et que sa position n'a pas changé de manière significative au cours des derniers millénaires (Gagnon & Payette 1981, Payette & Filion 1985, Gajewski *et al.* 1993, Lavoie & Payette 1996, Payette *et al.* 2001). Un diagramme pollinique s'étendant sur 7000 ans et issu des environs du lac Le Roy dans la toundra arctique à arbustes érigés suggère à cet effet que la forêt n'a jamais été plus au nord qu'elle l'est actuellement (Gajewski *et al.* 1993). Cette stabilité, même lors de périodes chaudes comme l'Hypsithermal ou le Moyen Âge, démontre que les mécanismes à l'origine de l'avancée ou du recul de la limite des arbres ne sont pas facilement mis en branle par des changements climatiques (Lavoie & Payette 1996).

En somme, il est peu probable que les changements climatiques modélisés, s'ils se concrétisent, résultent en une remontée significative de la limite des arbres latitudinale au Nunavik d'ici 2100, même si les modèles prévoient un réchauffement majeur des températures et un allongement substantiel de la saison de croissance. Des déplacements sont à prévoir, certes, mais ne dépasseront probablement pas quelques kilomètres vers le nord. Ces avancées se feront par l'établissement de semis de mélèze laricin où cette espèce forme la limite des arbres alors qu'elle risque d'opérer davantage par un passage de la forme de krummholz à la forme arborescente dans le cas de l'épinette noire, bien qu'une amélioration dans le taux de recrutement par semis puisse aussi se produire chez cette espèce. Elle procèdera probablement de façon combinée dans le cas de l'épinette blanche, tel qu'il s'est produit par le passé le long de la côte est de la baie d'Hudson lors de périodes plus chaudes (Caccianiga *et al.* 2006). Il apparaît fort probable que les plus fortes réponses soient enregistrées plus au sud et se manifestent surtout par une élévation plus ou moins importante des limites des arbres altitudinales au sein de la toundra forestière, ainsi que par la fermeture conséquente des parcelles de toundra (*cf.* section 5.3.3). Certaines limites des arbres locales pourraient même disparaître si la colonisation atteint le sommet des collines. À l'opposé, d'autres limites des arbres pourraient stagner ou même reculer si la modification des conditions climatiques dans les prochaines décennies résulte en effets néfastes importants, à l'échelle d'un site donné.

5.3.2 Croissance et densification des forêts

Tel qu'avancé à la fin de la section précédente, il est possible que les réponses les plus significatives de la strate arborescente face aux changements climatiques dans les prochaines décennies se manifestent au sud de la limite latitudinale des arbres, par une densification des pessières à lichens et une expansion des forêts dans les zones ouvertes de la toundra forestière. Bien entendu, la croissance des arbres et l'expansion des forêts via la reproduction sexuée sont tributaires du climat et particulièrement de la température. Toutefois, la dynamique forestière dans les domaines bioclimatiques du Haut-Boréal est fort complexe et elle n'est pas une simple question de température annuelle moyenne. Elle implique une gamme de facteurs, climatiques ou non, mais alors néanmoins liés au climat : humidité du sol et stress hydrique, événements climatiques extrêmes, fréquence et amplitude des feux, viabilité des graines, germination et survie des semis, abondance et qualité des lits de germination, fonte du pergélisol, piétinement par les grands herbivores, épidémies d'insectes phytophages, etc.

Compte tenu du fait qu'on associe d'instinct la croissance des arbres à la température, on serait porté à croire que la hausse des températures observée au cours des dernières décennies aurait dû, logiquement, stimuler la croissance au sein de la forêt boréale. Or, ceci ne semble pas être le cas selon les résultats obtenus par Girardin et al. (2016) pour la forêt boréale canadienne. Durant la période 1950-2002, la croissance n'a pas changé significativement malgré une hausse des températures de 0,5 à 3°C et une augmentation des concentrations de CO₂ atmosphérique. Les résultats de MacManus et al. (2012) vont dans le même sens pour la période 1986-2010 dans le cas d'un transect traversant la forêt boréale et la toundra forestière du Québec nordique. Ces auteurs ont documenté des réponses très variables à fine échelle, mais peu de tendances positives significatives au verdissement des sites forestiers malgré le réchauffement marqué de cette région du Nunavik au cours des 40 dernières années. Pourtant, Grace et al. (2002) affirmaient comme une évidence même que la croissance arborescente en deçà de la limite des arbres augmenterait de façon substantielle avec un réchauffement du climat. Selon Girardin et al. (2016), il existe un fort contrôle de l'humidité sur le patron spatial des taux de croissance des arbres, démontrant la sensibilité des écosystèmes à des changements dans les régimes hydriques. Ainsi, cette absence de réponse positive serait une conséquence de stress hydrique dans le contexte d'une dépendance accrue de

la croissance forestière à l'humidité du sol, et ce, suite à une augmentation rapide des températures estivales vers la fin du 20^e siècle. Ces auteurs ne sont toutefois pas les premiers à mentionner le régime hydrique comme étant un facteur de grande importance pouvant limiter ou même annuler les effets positifs d'une augmentation des températures sur la croissance des arbres en milieu boréal. Dans le cas d'épinettes blanches provenant d'une vingtaine de peuplements en Alaska, Barber et al. (2000) rapportent une diminution de la croissance radiale avec une augmentation des températures. Les données démontrent qu'un stress hydrique induit par une hausse des températures serait à l'origine de cette diminution. Scott et Hansell (2002) en viennent aux mêmes conclusions concernant des îlots d'épinettes blanches dans la toundra forestière des environs de Churchill, dans un contexte où la neige disparaît plus tôt au printemps et les étés sont plus chauds. En Alaska, Lloyd et Fastie (2002) ont observé, quant à eux, une réponse inverse de la croissance par rapport aux températures après 1950 chez des épinettes blanches situées à la limite arctique et alpine des arbres ou près de celle-ci. Cette réponse inverse était plus fréquente dans les sites sous la limite des arbres et plus marquée dans les sites plus secs, supportant l'hypothèse qu'un stress hydrique peut accompagner une hausse des températures dans la forêt boréale.

Concernant l'impact majeur que peut avoir un tel stress sur la croissance des arbres dans le Haut-Boréal, une situation observée par l'auteur à l'été 2008 à Kangiqsualujuaq est, à cet égard, fort éloquent. Le mois de juillet a vu plus d'une semaine avec des températures variant entre 25 et 30°C accompagnées d'un plein soleil. Cette canicule s'est produite de surcroît durant une période dépourvue de précipitation qui a duré plus d'un mois. En réponse au stress hydrique énorme ainsi engendré, des mélèzes ont complètement perdu leurs aiguilles en pleine saison de croissance (fin juillet/ début août) et des arbustes parmi les plus résistants (*Juniperus communis* var. *depressa*, *Empetrum nigrum* subsp. *hermaphroditum*) sont morts sur pied. On peut imaginer les conséquences néfastes majeures de tels événements sur la croissance annuelle et la production de graines. Si la fréquence de tels événements extrêmes venait à augmenter dans le futur dans un contexte où les modèles prévoient des augmentations substantielles des températures, cela pourrait entraver significativement la croissance des individus et l'expansion des forêts du Haut-Boréal. Bien que des augmentations en parallèle des précipitations soient également prévues, les modèles estiment qu'elles se produiront davantage tard dans la saison de croissance (juillet, août et septembre) et moins durant les premières phases de croissance au printemps et en début d'été (avril, mai

et juin). Un tel déphasage, dans un contexte où on prévoit un allongement substantiel de la saison de croissance (qui de ce fait débutera beaucoup plus tôt), pourrait entraîner des stress hydriques importants, entravant la croissance et mettant en péril la germination et la survie des semis.

Malgré les points discutés précédemment, il existe dans le Haut-Boréal du Nunavik plusieurs indices comme quoi la forêt a répondu positivement au réchauffement climatique par le passé et répond actuellement dans le même sens au réchauffement climatique récent. À la limite latitudinale des arbres dans les environs de Kangiqsualujjuaq, on assiste à une invasion de certaines zones ouvertes des basses terres par le mélèze (Fig. 5-9); réponse qui semble se traduire aussi dans la croissance radiale et en hauteur des individus préétablis (Tremblay & Lévesque inéd., Fig. 5-9; Dufour-Tremblay et al. 2012a). Des observations similaires sont rapportées par Gamache et Payette (2004) pour les portions septentrionales de la toundra forestière où l'augmentation récente de la croissance et le passage des krummholz d'épinette vers une forme de croissance dressée concordent avec l'augmentation marquée des températures depuis le début des années 1990. Dans une étude portant sur la dynamique de l'épinette blanche à la limite des arbres le long de la côte est de la baie d'Hudson, Payette et Fillion (1985) rapportent que les modifications les plus importantes au cours du dernier siècle en réponse au réchauffement du climat ont eu lieu en deçà de la limite des arbres, par une hausse substantielle de la densité des arbres et du couvert forestier. Leurs trouvailles supportent l'hypothèse que les épisodes de réchauffement climatique holocènes ont surtout eu un impact sur la densité des forêts plutôt que sur les limites altitudinales et latitudinale des arbres. Payette et al. (2001) indiquent d'ailleurs que les populations d'épinette blanche de la toundra forestière ont augmenté leur densité durant les 100 à 150 dernières années partout au Canada sans pour autant conduire à une migration significative de la limite arctique des arbres. Un constat similaire a été fait par Morin et Payette (1984) concernant le mélèze laricin à la limite des arbres le long de la rivière aux Feuilles. C'est également ce qu'ont trouvé Sturm et al. (2001a) en Alaska où il y a eu une augmentation marquée de l'étendue et de la densité des forêts d'épinettes blanches entre 1950 et 2000 près de la limite des arbres.



Figure 5-9 **Gauche** : photo prise à l'été 2008 et montrant de nombreux gaulis (et semis non visibles) de mélèze laricin récemment établis dans une ouverture herbacée d'un versant doux tourbeux près de Kangiqsualujjuaq. **Droite** : section d'une tranche prélevée sur un gaulis de mélèze laricin dans les environs de Kangiqsualujjuaq à la mi-août 2008. On y voit les 6 derniers cernes de croissance (période 2003-2008) nettement plus larges que les précédents.

En dehors des conditions d'humidité et du stress hydrique pouvant en découler, un autre facteur de grande importance est à considérer dans l'évolution future des forêts du Haut-Boréal soumises à des changements climatiques : la fréquence et l'amplitude des feux. Ce facteur est d'autant important qu'on sait qu'il s'agit de la principale perturbation naturelle affectant la forêt boréale (Payette 1992, Arseneault 2001) et que la structure actuelle de la toundra forestière est une conséquence directe des feux : toutes les parcelles incendiées depuis au moins le dernier siècle ont été converties en toundra en raison d'un manque répété de régénération après-feu (Payette et al. 2001). Dans les décennies à venir, l'évolution des forêts au sein de ces deux domaines bioclimatiques sera tributaire de la façon dont les changements climatiques affecteront la fréquence et l'ampleur des feux. On sait par ailleurs que la fréquence et la taille des feux diminuent de la forêt boréale vers la toundra (Payette et al. 1989) et que la fréquence des feux et des processus de déforestation associés était plus importante durant les périodes froides de l'Holocène par rapport aux périodes plus chaudes et humides. Selon Payette et al. (2001), même si le réchauffement prévu peut être accompagné d'une humidité plus grande du sol, la probabilité de feu risque d'augmenter dans les jours et semaines suivant la disparition du couvert nival au printemps, la période la plus propice à l'ignition des feux. Or, les modèles climatiques prévoient un certain déphasage dans les paramètres climatiques de température et de précipitations. Les augmentations de température les plus marquées auront lieu l'hiver et au printemps, alors que les hausses de précipitations les plus importantes se produiront plutôt de juillet à septembre.

De ce fait, des printemps plus chauds et secs à l'avenir risquent de favoriser grandement l'occurrence de feux dans le Haut-Boréal. Dans l'état actuel des choses, Payette et al. (2001) mentionnent que le couvert forestier très réduit et sporadique à la limite arctique des arbres est un facteur important qui augmente la probabilité de survie des peuplements forestiers qui s'y trouvent, dans un contexte de changements climatiques futurs impliquant les feux. Toutefois, on sait que l'échec de régénération après feu dans les pessières à lichens les plus nordiques était dû à l'incapacité des semenciers à produire un nombre suffisamment élevé de graines viables pour restaurer les peuplements brûlés. Or, une amélioration du régime thermique dans les décennies à venir risque de mettre fin à ce problème de viabilité des graines, même dans les parties septentrionales de la toundra forestière. Des indices pointent déjà en ce sens chez les épinettes noires des environs de Kangiqsualujjuaq (Dufour-Tremblay & Boudreau 2011).

À l'opposé, si le réchauffement des températures est accompagné d'une hausse synchrone des précipitations et que celles-ci sont suffisantes durant la fenêtre des feux au printemps et au début de l'été, une diminution de la fréquence et de l'amplitude des feux pourrait être observée à moyen terme. Couplés à une amélioration dans la viabilité des graines, de tels changements pourraient résulter en une densification marquée des pessières à lichens et une expansion significative de celles-ci dans le domaine de la toundra forestière; c'est-à-dire une recolonisation des étendues perdues autrefois au profit de la toundra suite aux feux. Toutefois, comme le mentionnent Payette et al. (2001), la transition de forêt à toundra dans un climat plus froid sujet aux feux procède plus rapidement qu'une transition de toundra vers forêt dans un climat plus chaud également sujet aux feux : la destruction d'une forêt prend bien moins de temps que sa construction. Par ailleurs, une reforestation des parcelles de toundra risque d'opérer plus rapidement dans la partie méridionale de la toundra forestière en raison d'un plus grand nombre de semenciers et de régimes thermiques meilleurs.

Bien qu'une avancée des forêts puisse opérer via une modification de la forme de croissance des krummholz d'épinettes blanches ou noires préétablis dans les zones toundriques, une expansion et une densification majeures des forêts passent nécessairement par la reproduction sexuée, c'est-à-dire l'établissement de nouveaux individus par semis. C'est un processus évidemment tributaire de la qualité des graines produites. La viabilité des graines, de même que leur germination et la survie initiale des jeunes plants

sont elles-mêmes dépendantes du climat. Dans la forêt boréale par exemple, les épinettes noires produisent autant de cônes peu importe où elles se situent dans de ce biome. Toutefois, le nombre de graines par cône de même que le pourcentage de graines pleines et de germination montrent une diminution importante du sud vers le nord; ces deux derniers paramètres étant significativement associés aux variations régionales du régime thermique (Sirois 2000). À la limite des arbres dans la région de la rivière aux Feuilles, Payette et al. (1982) mentionnaient que la végétation arborescente n'était pas à ce moment renouvelée via une banque de graines, mais qu'il y avait néanmoins une régénération épisodique du mélèze par graines; d'ailleurs confirmée pour le même secteur par Morin et Payette (1984). Le problème ne semblait pas être en termes de production de graines, mais bien plutôt en termes de viabilité et de succès de germination; tous deux fortement contrôlés par le climat. À cet égard, nous avons vu à la section précédente que le réchauffement climatique des dernières décennies semble avoir grandement amélioré le problème de viabilité chez les graines de mélèze dans les portions nordiques de la toundra forestière. Une tendance similaire se dessine aussi pour l'épinette noire (Dufour-Tremblay & Boudreau 2011) bien que, au contraire du mélèze, elle ne semble pas jusqu'à maintenant s'être traduite concrètement dans le paysage par une hausse du recrutement de jeunes individus.

En dehors de la production de graines viables en quantité suffisante, un autre facteur de première importance dans l'expansion et la densification des forêts est la disponibilité de sites de germination adéquats. Les meilleurs sites de germination, pour les épinettes noire et blanche du moins, sont ceux formés de substrat minéral. Celui-ci est remis à nu suite à une perturbation d'origine physique (phénomènes périglaciaires, fonte du pergélisol, feux, etc.) ou biologique (piétinement par les grands herbivores). Les lichénaires et les arbustives denses de la toundra entravent grandement la germination en empêchant les graines d'atteindre le sol, en compétitionnant pour l'espace et la lumière et en produisant des composés allélopathiques; auxquels l'épinette noire semble d'ailleurs plus susceptible que le mélèze (Dufour-Tremblay & Boudreau 2011). Dufour-Tremblay et al. (2012b) suggèrent que le manque de lits de germination de qualité dans la région de Kangiqsualujjuaq serait une des principales causes de l'échec de régénération de l'épinette noire dans ce secteur. C'est également le constat auquel arrivent Walker et al. (2012) en Alaska, où il n'y a pas eu de signe de régénération naturelle de l'épinette blanche entre 1993 et 2009 dans les sites les plus nordiques de l'écotone forêt-

tundra, malgré la production de graines viables et une augmentation des températures moyennes de 0,9°C. Dans un contexte où les populations de caribou du Nunavik sont très faibles et que leur rétablissement, s'il s'effectue, nécessitera certainement quelques décennies; on ne saurait attribuer une participation importante de ces grands herbivores dans la mise en disponibilité de sites de germination adéquats dans les premiers temps de la période 2020-2100. Si on observe en parallèle une augmentation considérable du couvert arbustif dans les zones ouvertes de la tundra forestière, l'expansion des forêts dans le Haut-Boréal du Nunavik pourrait être sérieusement freinée par le manque de sites de germination de qualité.

Par ailleurs, même si le réchauffement des températures améliorera certainement la production de graines viables et le succès de germination, il risque de favoriser en parallèle les populations d'insectes phytophages, tant défoliateurs que conophages (se nourrissant de graines). Payette (2013b) mentionne toutefois que dans la pessière à lichens et la tundra forestière, l'épinette noire ne semble pas affectée par les insectes défoliateurs, dont le principal est la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clemens). Il ajoute que le sapin baumier semble moins affecté par cet insecte près de sa limite d'aire de répartition. Cette situation pourrait bien devenir caduque dans le contexte des changements climatiques majeurs tels que ceux prévus par modélisation pour l'horizon 2080. Les impacts d'épidémies d'insectes phytophages sur la croissance et la production de graines pourraient alors faire contrepoids aux effets bénéfiques d'une amélioration du climat. En ce qui concerne le mélèze, on sait que des épidémies récurrentes de la tenthrède du mélèze (*Pristiphora erichsonii* Htg.) se produisent déjà dans le Haut-Boréal jusqu'à la limite des arbres, et ce depuis au moins les deux derniers siècles (Arquillère et al. 1990, Filion et al. 2010). Quant à l'épinette blanche, même ses populations les plus nordiques sont affectées par des épidémies du dendroctone de l'épinette (*Dendroctonus rufipennis* Kirby), tant le long de la baie d'Hudson (Caccianiga et al. 2008) qu'au Labrador (Payette 2007). La fréquence et la sévérité de telles épidémies, tant de tenthrède du mélèze que de dendroctone de l'épinette, pourraient être appelées à augmenter dans les prochaines décennies en concordance avec une amélioration des températures et une densification des peuplements des espèces hôtes.

Le réchauffement des températures dans les décennies à venir risque d'entraîner une dégradation locale du couvert forestier en raison de la fonte du

pergélisol. Ce recul du couvert forestier pourra se produire autant via des événements subits et catastrophiques (ex. : glissements de terrain) que plus lentement par des processus qui opèrent de façon graduelle (ex. : dégradation des paises boisées et plateaux palsiques boisés). Les données disponibles démontrent que le sol a déjà commencé à se réchauffer depuis 1993 dans le Haut-Boréal de l'est du Canada, avec en parallèle une augmentation de l'épaisseur du mollisol (Allard et al. 2007, 2013). De tels indices existent aussi pour les tourbières boréales pergélisolées de l'hémisphère nord, où une dégradation du pergélisol est entamée depuis les dernières décennies en réponse au réchauffement climatique récent. Ce réchauffement a entraîné une dégradation progressive de paises et de plateaux palsiques alors que certains autres ont carrément disparu (Payette 2001). Bien entendu, un tel recul du couvert forestier causé par des perturbations du substrat demeurera ponctuel et n'affectera que des superficies relativement restreintes. On peut s'attendre par ailleurs à ce que les substrats minéral ou organique mis à nu suite à ces perturbations représentent des lits de germination de qualité qui favoriseront un retour relativement rapide du couvert forestier sur les sites perturbés.

Bien que l'épinette noire et le mélèze laricin, de même que l'épinette blanche en zone maritime, soient les principales espèces formant le couvert forestier du Haut-Boréal et donc celles qui seront responsables du gros des changements qui s'y produiront, d'autres espèces d'arbres pourraient être favorisées par les changements climatiques. Dans la mesure où les modèles prévoient une augmentation marquée des précipitations annuelles moyennes d'ici 2100, on peut s'attendre à une expansion des populations de sapin baumier si cette augmentation est accompagnée d'une diminution de la fréquence des feux couplée à un régime thermique plus favorable. Ali et al. (2008) précisent que le sapin baumier était abondant dans la forêt boréale de l'ouest du Québec durant les étés chauds et humides de l'Hypsithermal, mais que ses populations ont ensuite décliné au cours du Néoglaciale froid et sec où les feux étaient plus fréquents et sévères. Par ailleurs, si l'augmentation des températures n'est pas accompagnée d'une hausse importante des précipitations ou si un déphasage se produit entre les deux, la fréquence et l'ampleur des feux pourraient s'accroître; notamment dans le secteur sud-ouest du Nunavik. Les petites populations limitrophes de pin gris qui se trouvent actuellement près de la Grande rivière de la Baleine pourraient alors être favorisées et prendre de l'expansion. Arsenault et Sirois (2004) ont d'ailleurs montré que l'abondance du pin gris à la baie James a augmenté durant l'Holocène lors de périodes à courts intervalles de feux.

En résumé, la trajectoire que prendra à moyen terme le couvert forestier dans la zone boréale du Nunavik est bien incertaine. Elle dépend de l'ampleur des changements au sein des divers paramètres climatiques, de leur synchronicité et de la façon dont ces changements s'exprimeront aux échelles locale comme régionale. Un grand nombre de facteurs liés plus ou moins étroitement au climat sont impliqués. Il est probable qu'on assiste à une densification et une expansion des forêts dans un contexte où les changements climatiques se solderont par des étés chauds et humides, où la fréquence des feux est moindre et où les précipitations abondantes durant la saison de croissance réduisent les stress hydriques. La conséquence serait donc, d'une part, une remontée des lignes des arbres altitudinales et la perte locale de limites des arbres là où la forêt reprendrait le sommet des collines. D'autre part, l'ensemble se solderait par une diminution de l'étendue de la toundra forestière au profit de la pessière noire à lichens. Il s'agirait là d'une évolution à revers vers la situation qui semble avoir prévalu à l'Holocène tardif, puisque la position actuelle de la limite des arbres arctique correspond probablement à la limite nordique des forêts d'épinettes à cette époque (Lavoie & Payette 1996). Cette recolonisation serait en outre favorisée par des capacités de régénération accrues en raison de régimes thermiques meilleurs. Toutefois, l'expansion pourrait être freinée par une augmentation de la fréquence et de l'étendue des épidémies d'insectes phytophages et par le manque de lits de germination adéquats.

5.3.3 La toundra et les arbustes

Au Nunavik, comme ailleurs dans l'Arctique nord-américain, il existe une multitude de preuves comme quoi la toundra répond déjà de façon plus ou moins importante au réchauffement du climat qui s'y est produit au cours des dernières décennies. Une telle réponse n'est pas un phénomène isolé ou nouveau, Gajewski (2015) ayant démontré dans le cadre d'une étude palynologique que les écosystèmes arctiques étaient plus productifs lors des périodes de réchauffement holocènes passées. Les preuves de réponses contemporaines ont, elles, été obtenues principalement par l'analyse comparative de séquences temporelles de photographies aériennes verticales ou obliques, d'images satellites ou de photographies répétées au sol. Un verdissement de la toundra et une tendance nette à l'expansion des arbustes érigés ont été trouvés à diverses échelles, tant au Québec (Fraser et al. 2011, Tremblay et al. 2012, McManus et al. 2012, Ropars et Boudreau 2012, Provencher-Nolet 2014), au Manitoba (Fraser et al. 2011), dans les Territoires

du Nord-Ouest (Fraser et al. 2014), au Yukon (Myers-Smith et al. 2011) au Nunavut (Fraser et al. 2011), qu'en Alaska (Sturm et al. 2001a, Tape et al. 2006). Ju et Masek (2016) révèlent d'ailleurs qu'entre 1984 et 2012, 29,4 % des surfaces terrestres du Canada ont subi un verdissement et que celui-ci a eu lieu surtout le long de la côte nord du pays ainsi que dans le nord-est canadien (Québec et Labrador), où le verdissement le plus intensif se serait produit. Au Québec du moins, les conclusions des diverses études sont appuyées par de nombreux témoignages de la part des Inuits (Lévesque et al. 2013, Cuerrier et al. 2015).

C'est principalement dans le Bas-Arctique que les modifications les plus importantes dans la végétation de toundra semblent se produire et les diverses études démontrent que tous les éléments du couvert végétal ne répondent pas de la même façon. Les changements sont attribuables dans une large mesure aux arbustes érigés. Les herbacées graminoides sont également impliquées quoique de façon moins importante (Frost et al. 2011, McManus et al. 2012). Ce sont les espèces arbustives de bouleaux (*Betula* spp.) qui sont responsables de l'essentiel de l'expansion de la toundra arctique à arbustes érigés nord-américaine. Le bouleau glanduleux est de loin l'espèce qui semble profiter le plus du réchauffement climatique (Tape et al. 2006, Ropars et Boudreau 2012, Tremblay et al. 2012) bien que le bouleau grêle (*Betula nana* L. subsp. *exilis* (Sukaczew) Hultén) soit également impliqué dans l'ouest de l'Amérique du Nord. Il semble que le succès des espèces naines de bouleaux soit lié à leur capacité à produire à la fois des rameaux courts et longs ainsi qu'à la flexibilité dans leurs réponses de croissance lorsque soumis à conditions environnementales changeantes (Bret-Harte et al. 2001, 2002; Wahren et al. 2005).

Les études ont également révélé que la réponse de la toundra au réchauffement climatique récent varie dans l'espace à l'échelle du paysage, en fonction notamment de facteurs d'ordre édaphique et topographique. Dans les environs de Kangiqsualujjuaq, Tremblay et al. (2012) rapportent une augmentation des arbustes érigés à toutes les altitudes et pour toutes les orientations, mais une hausse proportionnelle plus grande s'est produite dans la partie supérieure des versants et dans ceux exposés à l'est et au sud. Dans la région de la rivière Boniface, Ropars et Boudreau (2012) signalent une augmentation significativement plus élevée des arbustes érigés sur les terrasses par rapport aux sommets de collines. Dans les monts Torngat, Fraser et al. (2011) précisent que les sites qui ont subi le plus de verdissement entre

1985 et 2009 sont les stations humides de basse altitude, le fond des larges vallées et le bas des versants. En Alaska, Tape et al. (2006, 2012) indiquent que les changements les plus importants au cours des 50 dernières années se sont produits dans le bas des versants et le fond des vallées, notamment sur les plaines inondables et les corridors de ruisseaux. Ils interprètent ces résultats comme impliquant que les conditions pédologiques préexistantes prédisposent certaines parties du paysage à une réponse rapide face aux changements climatiques. Cette interprétation est supportée par Fraser et al. (2011) qui précisent que l'augmentation de la croissance végétale dans les Torngat a eu lieu de façon plus importante dans les sites qui avaient déjà des conditions de croissance favorable. Myers-Smith et al. (2015) indiquent d'ailleurs que la sensibilité de la croissance arbustive face au climat est plus grande dans les sites avec une plus grande humidité du sol. On voit donc que la topographie et les sols représentent des facteurs écologiques de première importance qui influencent de façon fondamentale la nature et l'ampleur de la réponse de la végétation face aux changements climatiques (*cf.* section 5.3.4.).

Malgré la multitude de preuves citées précédemment, la réponse positive du couvert arbustif érigé n'est pas ubiquiste. Dans les environs de la baie Déception le long du détroit d'Hudson, où les arbustaies érigées sont restreintes aux microsites les mieux protégés, Plante et al. (2014) ne rapportent aucune augmentation significative des arbustes érigés entre 1972 et 2010. Les auteurs suggèrent que le broutement par les caribous du troupeau de la Rivière-aux-Feuilles, qui a atteint un sommet démographique au début des années 2000, pourrait avoir contrecarré les effets bénéfiques du réchauffement climatique récent. L'influence tant bénéfique que néfaste des grands herbivores sur la réponse des arbustes érigés face aux changements climatiques est discutée plus en détail à la section 5.3.5.

Dans la foulée des changements récents observés au niveau du couvert arbustif arctique, de nombreux chercheurs se sont penchés sur les interactions entre les arbustes érigés et le couvert nival. Dans la surface rase d'un paysage de toundra, des bosquets d'arbustes érigés, même s'ils ne dépassent que de quelques décimètres le couvert végétal environnant, représentent des barrières au transit de la neige soufflée. Celle-ci s'accumule donc dans ces arbustaies et dans les zones périphériques sous le vent. Bien entendu, ce couvert nival protège contre l'abrasion éolienne, mais surtout isole les surfaces sous-jacentes contre les variations brusques de température et retarde à

l'automne la pénétration du froid dans le mollisol. Plusieurs auteurs ont exploré les impacts d'une augmentation du couvert arbustif, et conséquemment du couvert nival, sur l'albédo, l'épaisseur du mollisol, les températures hivernales du sol de même que sur la décomposition et le cycle des éléments nutritifs (Grogan et Chapin 2000, Sturm et al. 2001b, 2005; Liston et al. 2002, Schimel et al. 2004, Pomeroy et al. 2006, Larsen et al. 2007, Nobrega et Grogan 2007, Buckeridge et Grogan 2008, Marsh et al. 2010, Myers-Smith et Hik 2013). Ces études sont à l'origine de l'hypothèse d'une boucle de rétroaction positive entre les arbustes érigés et la neige, où la présence des premiers favorise l'accumulation de la seconde, qui à son tour augmente les températures du sol et donc l'activité microbienne, pour ultimement hausser la disponibilité de nutriments et ainsi favoriser une expansion supplémentaire des arbustes érigés. Si une telle boucle de rétroaction existe, elle pourrait résulter en une accélération majeure de la cadence dans l'arbustification de la toundra au cours des prochaines décennies si les modèles climatiques se concrétisent. Cependant, les interactions entre les arbustales érigées et leur environnement tant physique que biologique au sein d'un écosystème de toundra impliquent une multitude de facteurs et de processus qui sont encore mal compris. Une étude récente suggère d'ailleurs que l'impact sur les nutriments du sol de l'arbustification (et de l'isolement par la neige qui en découle) n'est peut-être pas aussi important qu'on le pensait initialement (Myers-Smith et Hik 2013).

Comme nous l'avons exposé pour les arbres dans la section précédente, l'expansion des arbustes érigés, au-delà de l'accroissement radial des bosquets déjà établis, nécessite la présence de sites de germination adéquats. Une fois les contraintes climatiques abolies, c'est probablement ce facteur qui est le plus limitant à l'expansion des arbustes érigés. À l'opposé des espèces arborescentes à la frontière de l'Arctique, les arbustes érigés comme le bouleau glanduleux et l'aulne crispé produisent actuellement et produisaient déjà avant le réchauffement récent une semence viable abondante. Les meilleurs lits de germination, tant pour l'un que pour l'autre, sont formés de sol minéral dénudé (Gilbert et Payette 1982, Ropars et Boudreau 2012, Tremblay et al. 2012, Frost et al. 2013). La dénudation du sol peut procéder de diverses façons, via des agents perturbateurs abiotiques comme la cryoturbation ou la dégradation du pergélisol; ou d'autres de nature biotique tels que le piétinement par les grands herbivores comme le caribou (Boudreau et Payette 2004) ou le bœuf musqué. Les populations de caribous sont actuellement dans un creux démographique alors que celles de bœuf musqué sont en hausse. Toutefois, leur abondance n'est probablement pas suffisante

pour influencer significativement la mise en disponibilité de sites de germination par piétinement. Si le rebond des populations de caribou tarde à se manifester dans les prochaines décennies, l'expansion des arbustes pourrait être freinée par la compétition interspécifique avec le couvert végétal dense préétabli, tant vasculaire que cryptogamique. Toutefois, une augmentation des perturbations liée à la fonte du pergélisol pourrait compenser au moins en partie cette situation. Il semble que la réponse des paysages du Bas-Arctique aux changements climatiques est largement tributaire de la fréquence et de l'étendue des processus de perturbations qui créent des lits de germination riches en minéraux favorables au recrutement des arbustes hauts (Frost et al. 2013).

Un autre type de facteur qui pourrait venir freiner l'expansion des arbustes érigés dans un contexte de réchauffement climatique est l'occurrence d'événements extrêmes et tout particulièrement les épisodes de redoux hivernaux. Bokhorst et al. (2008) ont démontré qu'un seul court événement de réchauffement hivernal extrême peut avoir un impact considérable sur la production de bourgeons, la phénologie et l'effort de reproduction des plantes dominantes dans les arbustaises naines lors de la saison de croissance suivante. Ces auteurs précisent que des événements répétés pourraient avoir un impact négatif sur la productivité des écosystèmes nordiques si la fréquence de ces événements extrêmes augmente dans un contexte de changement climatique.

Même si le gros de l'augmentation du couvert des arbustes érigés sera attribuable au bouleau glanduleux, ainsi qu'à l'aulne crispé dans les portions méridionales de l'Arctique québécois, les populations de saules érigés (*Salix alaxensis* var. *alaxensis*, *S. argyrocarpa*, *S. calcicola*, *S. glauca* var. *cordifolia*, *S. planifolia* et *S. vestita*) risquent aussi de prendre de l'expansion dans les basses terres au sein des habitats offrant les conditions écologiques qu'ils requièrent. Puisque les caribous semblent particulièrement apprécier les saules et que ceux-ci supportent très mal un broutement répété, un rebondissement des populations de caribou dans les prochaines décennies pourrait freiner l'expansion des saules dans les portions nordiques du territoire où les saulaies érigées sont petites et isolées.

Les modèles climatiques prévoient pour l'horizon 2080 une diminution de la fraction nivale des précipitations pouvant aller jusqu'à 20 % à l'échelle annuelle; diminution particulièrement marquée au printemps et à l'automne. De plus, la durée du couvert de neige pourrait diminuer de 7-8 semaines, voire davantage, et donc disparaître beaucoup plus tôt au printemps et apparaître

bien plus tard à l'automne. De tels changements pourraient entraîner certains problèmes pour diverses communautés végétales de toundra, notamment en raison d'un manque d'un couvert nival protecteur en hiver et d'une déficience dans l'apport printanier d'humidité. Un stress hydrique pourrait s'ensuivre s'il se produit un déphasage entre les précipitations et les périodes de la saison de croissance où les hausses de températures seront les plus marquées. Puisqu'on sait que dans la toundra la structure de la végétation est un reflet fidèle de la répartition du couvert nival, et que celui-ci est responsable d'un apport important d'humidité au printemps, on pourrait assister à des bouleversements majeurs dans les communautés végétales arctiques en général. Ces changements reflèteront les modifications qui se produiront au niveau des conditions hydriques locales, elles-mêmes tributaires du couvert nival, des températures et des précipitations estivales et, bien évidemment, de la stabilité du pergélisol.

En somme, dans la mesure où les modèles climatiques prévoient, pour l'Arctique québécois, une augmentation substantielle des températures, des précipitations et du nombre de degrés-jours de croissance de même qu'un allongement important de la saison de croissance à l'horizon 2080, il est fort probable qu'on assiste à une arbustification majeure de la toundra; un processus qui est d'ailleurs déjà entamé depuis les dernières décennies. Cette expansion des arbustes érigés opérera probablement selon deux patrons. D'une part, par leur expansion vers le haut des versants ainsi que par la densification et la fermeture graduelle des arbustaies discontinues (infilling) dans le domaine de la toundra arctique à arbustes érigés et dans les avant-postes de ce domaine situés au sein de la toundra arctique à arbustes rampants. D'autre part, par une invasion graduelle des arbustes érigés dans la toundra à arbustes rampants via la colonisation de nouveaux sites auparavant favorables sur les plans édaphique et topographique, mais jusqu'alors climatiquement défavorables. La limite entre les deux domaines bioclimatiques de la toundra arctique ne changera probablement pas de façon significative, mais puisque les avant-postes de toundra arctique à arbustes érigés prendront certainement de l'expansion, le bilan final sera vraisemblablement une augmentation de la superficie occupée par la toundra à arbustes érigés au détriment de la toundra à arbustes rampants. La principale espèce impliquée sera le bouleau glanduleux, mais les populations d'aulne crispé risquent aussi de s'étendre considérablement dans les portions méridionales de l'Arctique québécois. De vastes portions du Nunavik situées dans l'un ou l'autre des domaines bioclimatiques arctiques ne verront que peu ou pas de changements

au niveau des strates végétales en raison de contraintes édaphiques et topographiques majeures. Là, les changements pourraient plutôt se produire au niveau de la composition spécifique des strates, en fonction des modifications qui se produiront au niveau du pergélisol et du régime hydrique; tant à l'échelle du paysage qu'à microéchelle.

5.3.4 Les facteurs topographique et édaphique : modulateurs fondamentaux de la réponse aux changements climatiques

Les sections précédentes ont donné un aperçu de l'importance des facteurs topographiques et édaphiques sur le couvert végétal, tant actuel que dans un contexte de changements climatiques. La topographie influence le régime thermique par l'exposition et l'altitude, mais elle joue aussi sur le régime hydrique à divers niveaux (pente, patrons d'enneigement, etc.). Le facteur édaphique exerce également un contrôle fondamental sur la végétation. La présence ou non de substrat meuble est une facette primordiale. En présence de dépôts, les diverses caractéristiques impliquées sont l'épaisseur, la nature (organique ou minérale, acide ou basique), la texture, l'état pergélisolé ou non de même que l'épaisseur de la couche active (mollisol).

Les secteurs du Nunavik caractérisés par un relief imposant et travaillé illustrent bien l'influence profonde de la topographie sur le couvert végétal. Le bas des versants et le fond des vallées glaciaires et des fjords profonds aux versants escarpés à l'est de la baie d'Ungava et dans le contrefort des monts Torngat offrent des milieux protégés et bien enneigés où règne un bien meilleur régime thermique que dans le haut des versants et sur les sommets environnants. De plus, alors que ces derniers sont pratiquement dépourvus de substrat meuble, le fond et la partie inférieure des versants en sont abondamment nappés. On y trouve les avant-postes forestiers les plus septentrionaux dans l'est de l'Amérique, riches en espèces boréales; de même que de hautes et denses arbustaies (Fig. 5-10). Le haut des versants et les sommets n'abritent, eux, qu'une toundra éparse et rase au faciès Haut-Arctique marqué. On ne saurait trouver environnements plus contrastés en termes de couvert végétal et de conditions écologiques, pourtant la distance qui sépare les deux est bien faible... Plusieurs centaines de kilomètres plus au nord, les versants en adret (exposition sud) et le fond de la vallée de la rivière Guichaud, qui débouche dans le fjord de Salluit le long du détroit d'Hudson, recèlent des arbustaies érigées pouvant dépasser un mètre de hauteur et surtout formées de bouleaux glanduleux (Fig. 5-11). Ceci étant, on ne trouvera

pas un seul arbuste érigé en dehors de cette vallée vers l'ouest jusqu'à Ivujivik.



Figure 5-10 Photographies de la vallée de la rivière Baudan (58°50'N) à l'est de la baie d'Ungava, située à la limite latitudinale des arbres et illustrant l'influence à la fois de la topographie et des dépôts sur le couvert végétal. À l'avant-plan de la photo de gauche, on voit un haut de versant rocheux à dépôts d'altération minces et discontinus dans les légers creux du relief. La végétation est rase et formée d'une muscinaie à arbustes rampants. Non loin s'étendent les bas de versants et le fond verdoyants de la vallée qui abritent des arbustiaies denses et continues formées de bouleau glanduleux et de hautes saulaies riveraines. Malgré la faible distance qui sépare l'avant et l'arrière-plan sur le terrain, le contraste entre les conditions de croissance et le couvert végétal de l'un et de l'autre est énorme. Ce contraste est bien visible dans la vue aérienne oblique de la photo de droite. Le fond de telles vallées glaciaires encaissées offre des sites de croissance protégés et un meilleur régime thermique qui permettent le développement azonal d'une végétation boréale. À l'avant-plan du côté gauche de la rivière se trouvent des krummholz d'épinettes noires et des mélèzes laricins arborescents.

De vastes portions du Nunavik sont caractérisées par une absence de dépôts ou par des dépôts d'altération très minces et discontinus recouvrant le socle rocheux. Ces étendues rocheuses ou pierreuses (principalement des champs de blocs) ne supportent qu'une toundra épars et xérique formée surtout de plantes invasculaires (Fig. 5-12). Ces surfaces sont bien visibles lorsqu'on réalise un exercice de classification de la végétation par imagerie satellitaire Landsat (Fig. 5-13). Il est peu probable qu'on observe un changement dans la végétation de ces surfaces, du moins dans le sens d'une augmentation du couvert, même si elles jouissent de conditions climatiques meilleures (températures et précipitations) telles que le prévoient les modèles. C'est d'ailleurs ce qu'ont observé Fraser et al. (2011) dans les monts Torngat pour la période 1985-2009. L'absence de dépôts ou de granulométrie fine est ici un facteur limitant implacable qui ne peut être compensé par une amélioration des conditions climatiques. La pédogénèse est un processus excessivement long et

la situation édaphique risque d'avoir peu changé d'ici 2100. Si des changements ont lieu, ils se situeront davantage au niveau de la composition et de l'abondance des espèces au sein des strates de végétation qui occupent déjà ces sites plutôt qu'au niveau du type de couvert végétal (forme de croissance).



Figure 5-11 Vue aérienne et au sol d'une partie du versant en adret (exposition sud) de la vallée de la rivière Guichaud (62°10'N) dans son cours inférieur. Cette rivière débouche dans le fjord de Salluit en bordure duquel est établi le village du même nom. Ces versants bien exposés offrent un refuge pour des arbustes érigés tels que le bouleau glanduleux qui y forme des arbustiaies étendues. Les saulaies érigées, constituées surtout de *Salix glauca* var. *cordifolia* qui peuvent dépasser 1 m de hauteur, sont moribondes en raison d'un broutement intensif par les caribous du troupeau de la rivière aux Feuilles (photo de droite à l'avant-plan). En dehors de cette vallée protégée, on ne trouvera aucun arbuste érigé sur tout le territoire qui s'étend vers l'ouest jusqu'à Ivujivik.

La hausse majeure des températures annuelles moyennes prévues par les modèles climatiques entraînera sans nul doute un réchauffement important du sol et par conséquent un épaissement du mollisol et une dégradation du pergélisol. Elle risque aussi d'entraîner des stress hydriques supplémentaires dans les milieux où les dépôts meubles sont minces ou inexistantes si cette hausse n'est pas accompagnée de précipitations suffisantes durant la saison estivale. Nous avons vu précédemment que les températures du sol sont déjà à la hausse, même dans les portions les plus nordiques du Québec. Il apparaît certain que le pergélisol disparaîtra complètement des portions méridionales du Nunavik où il est actuellement sporadique (occupant <2 % du territoire) et peut-être même de la zone où il est discontinu et dispersé (<50 % du territoire). Une telle dégradation du pergélisol, ainsi qu'un épaissement du mollisol là où le pergélisol perdurera, auront des impacts multiples : perturbations du substrat, modifications au niveau du drainage, hausse de l'activité microbienne et par conséquent accroissement du taux de

décomposition et de recyclage des éléments nutritifs. L'ensemble risque fort d'entraîner des changements importants au sein des communautés végétales qui occupent actuellement le territoire et de stimuler la croissance de la végétation.

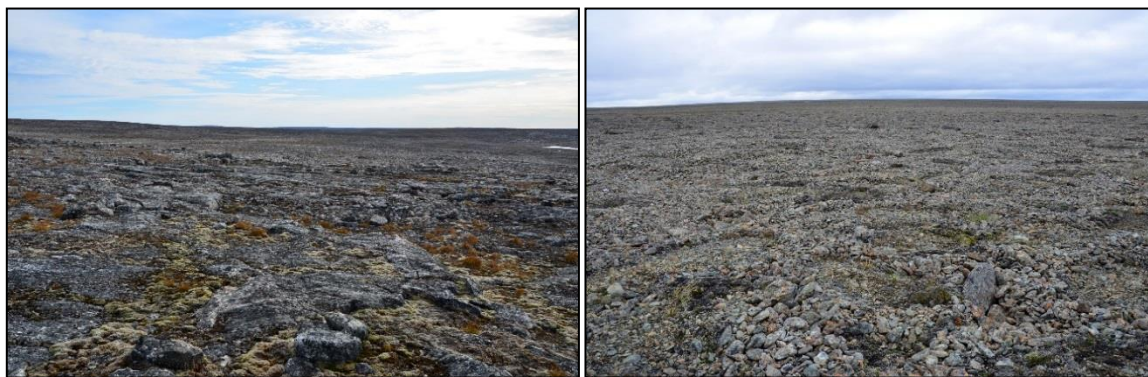


Figure 5-12 Vue au sol de toundra rocheuse ou pierreuse dans la portion nord de la péninsule d'Ungava. Les dépôts meubles sont absents ou minces et discontinus. Ces surfaces ne supportent qu'une végétation éparse (souvent <10 %) constituée surtout de lichens et de bryophytes. La photo de gauche illustre une portion du plateau rocheux acide qui s'étend entre Salluit et Ivujivik. Celle de droite montre le plateau exposé qui forme le sommet des monts de Puvirnituq, non loin de Katinnik (mine de Raglan). Les dépôts minces pierreux y sont structurés par cryoturbation en cercles de pierres et ostioles de toundra à surface graveleuse. En dehors des lichens saxicoles qui couvrent les pierres, la végétation est dominée par une bryophyte, le *Racomitrium lanuginosum*. Ces photos montrent des exemples de sites exposés aux conditions extrêmes. De tels milieux occupent de vastes superficies au Nunavik. Il est peu probable que le couvert végétal y change de façon notable même si les conditions climatiques s'améliorent d'ici 2100.

Les études qui se sont penchées sur les changements récents dans le couvert végétal de toundra en Amérique du Nord démontrent que ceux-ci se sont produits de façon préférentielle ou plus marquée dans certains types d'habitats alors que d'autres n'ont subi que peu ou pas de changements (Tape et al. 2006, 2012; Frost et al. 2011, Ropars et al. 2012, Tremblay et al. 2012). Ainsi, on peut s'attendre à ce que les changements futurs opèrent de façon similaire, c'est-à-dire que le verdissement en général et l'expansion des arbustes érigés en particulier se produisent principalement dans les sites qui offrent déjà des conditions topographiques et édaphiques favorables.

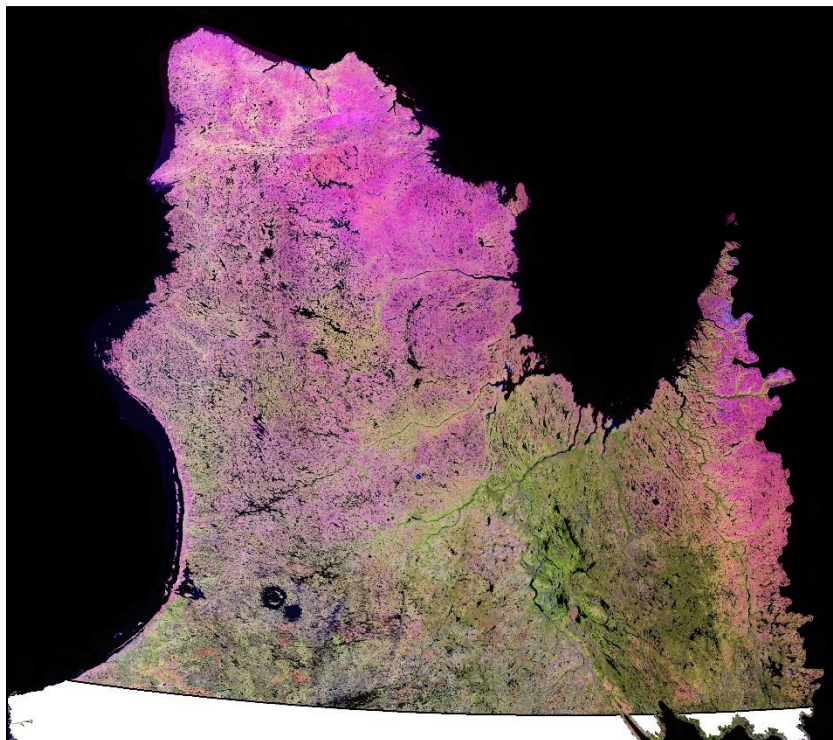


Figure 5-13 Le Nunavik vu par imagerie satellitaire Landsat. La mosaïque est issue d'images captées entre 1997 et 2011. La coloration fuschia (mais non rose pâle) est associée aux surfaces dominées par le roc affleurant ou des pierrailles. On remarque une concentration de surfaces en fuschia dans la moitié est de la péninsule d'Ungava, dans la portion nord-ouest de celle-ci de même qu'à l'est de la baie d'Ungava près du Labrador, en concordance avec les monts Torngat. Cela ne signifie pas que ces surfaces sont dépourvues de végétation. Toutefois, celle-ci est discontinue ou éparse et constituée surtout de plantes invasculaires (bryophytes et lichens). Voir la figure 5-12 pour une vue au sol des types d'écosystèmes auxquels peuvent correspondre ces surfaces en fuschia. Source : ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

5.3.5 Les grands herbivores : modérateurs de la réponse arbustive

Les grands herbivores tels que les cervidés et les bovidés représentent, partout dans les écosystèmes qui les supportent, un facteur d'influence fondamental sur le couvert végétal. Cette influence opère à plusieurs niveaux et selon diverses façons : par le broutement bien entendu, mais aussi par le piétinement, la dispersion des graines et l'engraissement par les fèces. Évidemment, les écosystèmes arctiques n'y échappent pas. L'Arctique québécois supporte deux grands herbivores. L'un est le caribou (*Rangifer tarandus* L.), indigène et de loin le plus abondant; réparti en deux troupes : celui de la rivière George et celui de la rivière aux Feuilles. L'autre est le bœuf musqué (*Ovibos moschatus* Zimmermann), introduit au Québec depuis 1973 (Jean et al. 2006). La population des deux troupes de caribous a culminé

chacun avec plusieurs centaines de milliers d'individus; celui de la rivière George en 1993 et celui de la rivière aux Feuilles en 2001. Tous deux sont maintenant en déclin majeur. Le premier s'est effondré et comptait moins de 9 000 individus en 2016 (Gouvernement du Québec 2016a). Celui de la rivière aux Feuilles, bien qu'en meilleur état, poursuit sa chute démographique et ne comptait plus que 199 000 têtes en 2016 (Gouvernement du Québec 2016b). Le cas du bœuf musqué lui, est tout autre. Une fois libérées, les bêtes semblent s'être fort bien accommodées de la toundra qui les a accueillies dans les portions méridionales du Québec arctique. Se référer au chapitre 6 pour davantage de détails sur l'état et les fluctuations démographiques du caribou et du bœuf musqué au Nunavik.

Les arbustes érigés occupent une part importante du régime alimentaire des caribous comme des bœufs musqués. Le bouleau glanduleux et les saules tiennent une place de choix dans les préférences alimentaires du caribou (Crête et al. 1990). Des observations réalisées par l'auteur dans les environs de la baie Déception (détroit d'Hudson) indiquent que les caribous semblent particulièrement apprécier les saules érigés, qui y sont rares dans le paysage et forment des saulaies peu étendues. Malgré cela, elles sont systématiquement broutées, et ce à répétition; de sorte que la totalité des saules dressés dans ce secteur sont moribonds (Fig. 5-14) à moins d'avoir atteint une taille suffisante pour que l'apex soit hors d'atteinte (possible seulement pour deux espèces : *Salix planifolia* et *S. alaxensis* var. *alaxensis*). On y trouve aussi des bouleaux glanduleux mutilés suite au broutement intensif (Fig. 5-14). Toutefois, cet arbuste semble bien tolérer un broutement modéré soutenu et compense par la production de rameaux longs à partir des rameaux courts (Manseau et al. 1996, Crête et al. 2001, Champagne et al. 2012). À l'opposé, les saules érigés ne tolèrent pas un tel broutement et ne répondent pas comme le fait le bouleau glanduleux. Un rameau brouté produira la plupart du temps un rejet via un bourgeon dormant situé plus bas. Toutefois, cela ne semble pas pouvoir se produire à maintes reprises. Brouté à nouveau, le rameau meurt éventuellement jusqu'à la tige principale. Cette dernière finit par mourir jusqu'au sol si tous les rameaux sont soumis à un broutement répété. Les plants survivent alors par drageonnement, produisant quelques feuilles sur des rameaux courts qui émergent du sol et qui sont immédiatement broutés s'ils dépassent le couvert environnant. En ce qui concerne le bœuf musqué, il broute également les bouleaux érigés et diverses espèces de saules, sans compter plusieurs espèces d'éricacées rampantes de même qu'une variété de plantes herbacées (Belzile et al. 1981).



Figure 5-14 Gauche : saulaie érigée à *Salix alaxensis* var. *alaxensis* dans les environs de la baie Déception, où tous les plants sont moribonds suite à un broutement intensif et répété par les caribous du troupeau de la rivière aux Feuilles. Même l'écorce des tiges principales et des plus gros rameaux a été mangée. Droite : bouleaux glanduleux dans les environs de la baie Déception. Les individus sont mutilés suite au broutement par les caribous.

Plusieurs études ont illustré les impacts du broutement intensif et du piétinement des caribous sur la structure et la composition de la végétation de toundra. Ces impacts incluent une destruction généralisée du couvert lichénique (Manseau et al. 1996, Boudreau et Payette 2004) ainsi qu'une diminution du couvert et de la biomasse des arbustes (Manseau et al. 1996, Crête et al. 2001). Par opposition, plusieurs auteurs ont démontré de façon expérimentale *in natura* l'importance de l'herbivore dans la stabilité des communautés végétales arctiques soumises aux changements climatiques. Un des résultats majeurs de ces travaux est une augmentation importante du couvert arbustif (attribuable surtout aux bouleaux, *Betula glandulosa* et *B. nana*) au sein de communautés soustraites au broutement (Post et Pedersen 2008, Olofsson et al. 2009, Zamin et Grogan 2013). Certains rapportent aussi une diminution de la diversité floristique dans les parcelles où le caribou était exclu (Post 2013, Zamin et Grogan 2013). À l'opposé, la composition des communautés végétales ne changeait pas dans les stations de référence soumises à l'herbivore. Par ailleurs, bien que le couvert arbustif ait augmenté dans les parcelles réchauffées artificiellement, la hausse a été beaucoup moins importante dans celles qui étaient également soumises au broutement (Post et Pedersen 2008). Un tel frein exercé par les grands herbivores sur l'augmentation du couvert d'arbustes érigés dans un contexte de réchauffement climatique est également avancé par Plante et al. (2014). Ces auteurs rapportent que ce type de couvert n'a pas changé dans les environs de la baie Déception entre 1972 et 2010 malgré une hausse des températures de 3°C. L'absence de réponse positive serait probablement une conséquence du

broutement intensif par le caribou dont la population dans ce secteur a culminé en 2001. Tel qu'exposé précédemment, des observations sur le terrain réalisées par l'auteur en 2010 démontraient que les saulaies érigées de ce secteur étaient sévèrement dégradées et que la plupart des bétulaies glanduleuses étaient passablement broutées. Il semble donc que la pression exercée par les grands herbivores puisse limiter l'expansion des arbustes érigés et donc contrecarrer au moins en partie les effets bénéfiques d'un réchauffement climatique sur la croissance arbustive. Si les populations de caribous du Nunavik peinent à se remettre du creux démographique dans lequel elles se trouvent actuellement, cela pourrait agir en synergie avec l'amélioration des conditions climatiques et résulter en une expansion majeure des arbustes érigés (Champagne et al. 2012). À cet effet, voir le chapitre 6 pour une discussion sur divers scénarios d'abondance du caribou du troupeau de la rivière aux Feuilles dans le futur. Quant au bœuf musqué, la population actuelle est probablement trop faible pour avoir un impact significatif sur le couvert végétal de l'Arctique québécois dans un contexte de changements climatiques, mais si la hausse remarquable des effectifs qui s'est produite depuis 1973 poursuit sa lancée dans les prochaines décennies, la situation risque de changer.

Bien que le piétinement et le broutement par les grands herbivores peuvent résulter en impacts négatifs importants sur certaines composantes du couvert végétal et probablement freiner l'expansion du couvert arbustif dans un contexte de réchauffement climatique, cette même activité peut aussi avoir des conséquences positives à certains niveaux. Cela démontre qu'il existe aux latitudes nordiques un équilibre dynamique entre les grands herbivores et le couvert végétal. Tel que discuté aux sections 5.3.1 à 5.3.3, les arbres et les arbustes érigés nécessitent des lits de germination de qualité si une expansion significative de leurs populations doit avoir lieu. Or, les meilleurs sites de germination tant pour l'un que pour l'autre sont formés de substrat minéral à nu. Par leur piétinement, les grands herbivores perturbent le substrat et suppriment en partie ou en totalité le couvert végétal préétabli qui fait obstacle à la germination. Ainsi, si les populations de caribous demeurent faibles au cours des prochaines décennies, la mise en disponibilité de lits de germination de qualité devra reposer sur des éléments perturbateurs abiotiques (fonte du pergélisol, cryoturbation, etc.).

5.3.6 La diversité floristique : menacée ou simplement modifiée?

Une des craintes légitimes qu'on peut avoir face aux bouleversements engendrés par les changements climatiques est que ceux-ci menacent l'intégrité de la biodiversité en entraînant une chute dramatique des populations d'une espèce et éventuellement sa disparition d'un territoire donné, voire même son extinction globale.

Au niveau floristique, il est certain que la hausse importante des températures et des précipitations annuelles ainsi que l'allongement de la saison de croissance prévue à l'horizon 2080, tant dans le scénario optimiste que pessimiste, favoriseront certaines espèces au détriment d'autres. Un grand nombre d'études se sont penchées sur l'évolution du couvert végétal de toundra dans un contexte de réchauffement climatique. Elles se sont basées soit sur la mesure des changements réels qui se sont produits au cours des dernières décennies soit sur des méthodes expérimentales *in natura* (réchauffement artificiel). Leurs conclusions vont toutes dans le même sens : c'est systématiquement le couvert en arbustes érigés qui augmente au détriment de toutes les autres strates (Cornelissen et al. 2001, Wahren et al. 2005, Walker et al. 2006, Pajunen et al. 2011, Post 2013, Provencher-Nolet 2014, Fraser et al. 2014, Hollister et al. 2015). Ce semble être tout particulièrement le couvert en bryophytes et en lichens qui décline. Certains auteurs rapportent également une augmentation des arbustes sempervirents (des éricacées rampantes), mais dans plusieurs cas ceux-ci sont défavorisés par le réchauffement des températures. Plusieurs autres ont observé une diminution de la richesse spécifique (nombre d'espèces) en parallèle avec l'augmentation du couvert arbustif. On peut donc craindre l'impact sur la diversité floristique si une expansion généralisée des arbustes érigés se produit au Nunavik dans les prochaines décennies.

Toutefois, il est probable que les impacts à l'échelle du Nunavik touchent davantage la diversité spécifique que la richesse spécifique. C'est-à-dire que les changements climatiques vont probablement jouer sur les rapports d'abondance des espèces aux échelles locale et régionale plutôt que sur le nombre total d'espèces qui occupent le territoire. Si ce nombre change, ce sera vraisemblablement vers le haut. Certaines espèces boréales risquent de s'étendre vers le nord, trouvant de nouvelles niches climatiques absentes jusqu'alors. De nouvelles espèces introduites risquent également d'apparaître et de prendre de l'expansion. Cependant, il est peu probable que des espèces qui occupent déjà le territoire en disparaissent complètement. À cet égard, les

données palynologiques de Gajewski (2015) en provenance de l'archipel arctique canadien révèlent qu'il n'y a pas d'évidence de changement dans la biodiversité au cours de l'Holocène; les changements se situant plutôt dans la proportion occupée par chaque taxon au sein des diagrammes polliniques. Bien entendu, les conclusions reposent sur un niveau taxonomique grossier du pollen, mais elles suggèrent néanmoins que la variabilité climatique a un impact plus marqué sur la productivité ou la biomasse que sur la biodiversité. Cet auteur avance donc que dans l'avenir, les écosystèmes arctiques vont répondre rapidement au réchauffement, mais que les modifications principales se produiront dans la productivité végétale davantage que dans la biodiversité.

La diminution du couvert des arbustes sempervirents observée dans plusieurs études expérimentales en parallèle avec l'augmentation des arbustes décidus est une conséquence prévisible. Ces arbustes, tous rampants ou hémiprostrés, sont héliophiles. Leur forme de croissance est fixée génétiquement et ils sont donc incapables de s'adapter en hauteur pour compétitionner avec les arbustes érigés qui leur font ombrage. Ces arbustes sempervirents sont essentiellement des éricacées et comprennent des espèces productrices de petits fruits qui sont très prisés par les Inuits : la camarine hermaphrodite (*Empetrum nigrum* L. subsp. *hermaphroditum* (Hagerup) Böcher), l'airelle des marécages (*Vaccinium uliginosum* L.) et l'airelle rouge (*Vaccinium vitis-idaea* L.). Une autre espèce qui produit des fruits très appréciés est le chicouté (*Rubus chamaemorus* L.), un arbuste rampant décidu de la famille des Rosacées qu'on trouve dans la toundra tourbeuse et qui peut également être affecté négativement par l'expansion des arbustes érigés. Tous les arbustes rampants cités précédemment sont capables de se maintenir sous un couvert arbustif plus haut, mais elles adoptent alors un port étioilé et ne produisent que très peu ou pas de fruits. Ainsi, si l'expansion des arbustes érigés se poursuit et prend de l'ampleur dans les décennies à venir, cela pourrait avoir des conséquences néfastes sur la productivité des sites de cueillette de petits fruits et donc porter ombrage à cette activité traditionnelle qui a encore une grande importance culturelle et alimentaire au Nunavik.

Actuellement, les plantes introduites sont rares et peu abondantes au Nunavik. Seules quelques espèces réussissent à se maintenir et elles sont restreintes à l'enceinte même des villages les plus méridionaux, situés au sud de la limite des arbres. Les populations sont petites et n'ont pas un comportement envahissant. Aucune plante introduite ne pénètre dans les écosystèmes naturels. L'arrivée de plantes adventices au Nunavik n'était qu'une question de

temps compte tenu du va-et-vient élevé de marchandises et de personnes entre le sud du Québec et les villages nordiques. La situation pourrait changer dramatiquement à l'horizon 2080 si les modèles climatiques se réalisent, peu importe le scénario. Les quelques espèces déjà présentes prendront certainement de l'expansion et pourraient pénétrer dans les milieux naturels. D'autres espèces venues du sud risquent de s'établir, trouvant des niches climatiques favorables dans des secteurs où elles ne le sont pas actuellement ou ne l'étaient pas jusqu'à récemment.

5.3.7 Impacts potentiels sur les écosystèmes exceptionnels du Nunavik

Les travaux d'inventaire de la flore et de la végétation réalisés par l'auteur depuis 2006 au Nunavik ont permis de couvrir de larges pans du territoire demeurés jusque-là inexplorés sur le plan botanique. Ils ont permis de circonscrire six principaux types d'écosystèmes exceptionnels :

- Les affleurements et pierrailles de roches sédimentaires ou métamorphiques alcalines;
Quatre sous-types :
 - Affleurements et pierrailles de formation de fer à faciès carbonaté (fosse du Labrador);
 - Affleurements et pierrailles de roches dolomitiques (lac Guillaume-Deslisle, fosse du Labrador, baie Keglo et monts Torngat);
 - Affleurements et pierrailles de marbre calcitique (baie Keglo);
 - Affleurements et pierrailles d'autres roches sédimentaires et métamorphiques alcalines non carbonatées (fosse du Labrador, fosse de l'Ungava);
- Les cailloutis de roches ultrabasiques (environs de Purtunig, environs du lac Laza);
- Les dépôts glaciomarins d'eau profonde (le long du détroit d'Hudson du cap Qarliik Nuvua vers l'est jusqu'à la baie Fisher);
- Les dépôts coquilliers (Akulivik, environs du havre Nuvuk);
- Les lacs marneux (leurs rives; fosse du Labrador aux environs des lacs Le Moyne et Oteluk);

- Les forêts feuillues subarctiques (le long des principales vallées du domaine bioclimatique de la toundra forestière);

Trois sous-types :

- Bétulaie blanche
- Tremblaie
- Peupleraie baumière.

Le concept d'écosystème exceptionnel est défini dans Tremblay (2016a, b et c) et les trois premiers types de la liste ci-dessus y sont décrits, discutés et illustrés. Les écosystèmes considérés comme exceptionnels sont caractérisés par un ou plusieurs facteur(s) écologique(s) inusité(s) qui en font des habitats singuliers, propices à l'existence d'espèces ou de communautés rares, tant végétales qu'animales. Ces écosystèmes s'illustrent par le grand intérêt qu'ils présentent au niveau de la biodiversité, de la conservation et de la biogéographie (présence d'espèces endémiques, disjointes, à la limite de leur aire de répartition, etc.). Par définition, ces écosystèmes « exceptionnels » sont de superficie restreinte, rares et sporadiques à l'échelle du Québec. Des photographies illustrant un exemple de chacun des six types d'écosystèmes exceptionnels sont fournies à la Figure 5-15 et leur répartition respective au Nunavik est cartographiée à la Figure 5-16.

Les quatre premiers types d'écosystèmes exceptionnels du Nunavik sont des milieux ouverts à végétation éparse, exposés et habituellement plus ou moins xériques. Les dépôts glaciomarins d'eau profonde et les cailloutis de roches ultrabasiques contiennent ou reposent sur du loam et sont donc fortement sujets à l'activité périglaciaire. La cryoturbation et la solifluxion contribuent ainsi grandement à garder ces habitats ouverts. Dans le cas des cailloutis de roches ultrabasiques, la toxicité de ce type de roche y contribue également. La principale menace qui pèse sur ces quatre types d'écosystèmes exceptionnels est un envahissement par un couvert végétal dense et haut. Une telle menace est faible ou nulle pour les affleurements rocheux et les pierrailles où la contrainte est essentiellement d'ordre édaphique. Elle est également faible pour les cailloutis de roches ultrabasiques en raison de la nature de la roche, ainsi que pour les dépôts coquilliers qui sont des habitats côtiers exposés et à fort drainage. La menace pourrait être plus grande pour les dépôts glaciomarins d'eau profonde si le mollisol s'épaissit et se stabilise en raison d'une moins grande activité périglaciaire. Les modèles climatiques prévoient d'ailleurs une diminution du nombre annuel de gel/dégel. Toutefois, cette prévision est basée sur des températures de l'air et non du sol. C'est là une dynamique complexe qui peut varier beaucoup aux échelles locale et

temporelle selon l'exposition, le ton de la surface du terrain (pâle vs foncé) et l'ensoleillement (temps couvert, ensoleillé, alternance de soleil et de nuage, etc.).

Un envahissement par un couvert végétal haut et dense ne représente pas une menace pour les rives des lacs marneux, la contrainte étant ici d'ordre hydrologique. Cependant, des bouleversements sont à prévoir dans un contexte où une hausse substantielle des précipitations annuelles risque d'entraîner une modification importante du régime hydrologique et donc un remodelage des rives. Les forêts feuillues subarctiques sont certes le type d'écosystème exceptionnel qui risque le plus de répondre aux changements climatiques à l'horizon 2080. On devrait assister à une augmentation de la croissance radiale et en hauteur des individus. Certaines bétulaies blanches sont toutefois établies sur des versants rocheux exposés au sud. Des stress hydriques importants sont à prévoir dans ces milieux avec une hausse des températures; stress qui pourraient entraîner une stagnation dans la croissance voire même des mortalités locales. On peut par ailleurs s'attendre à ce que les forêts feuillues subarctiques prennent de l'expansion là où l'environnement en périphérie immédiate est favorable (substrat adéquat, pente, etc.) et où la végétation préétablie ne représente pas une entrave majeure. Avec une amélioration dans la production et la viabilité des graines, de nouvelles petites forêts décidues devraient s'établir dans les sites où la principale contrainte était jusqu'alors d'ordre climatique. Les feux et les perturbations mécaniques du sol pourraient alors favoriser l'établissement des semis.

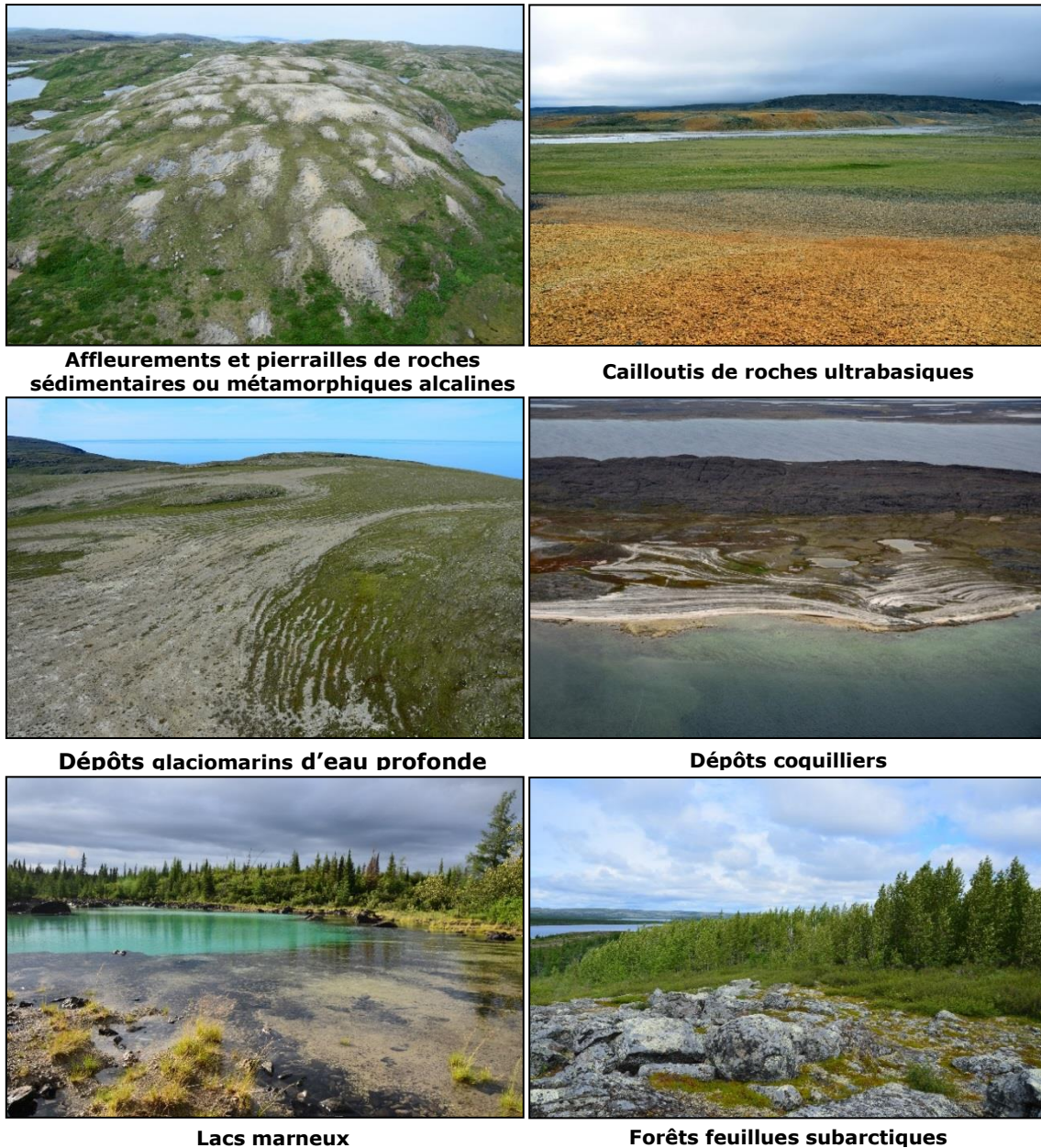


Figure 5-15 Photos illustrant les types d'écosystèmes exceptionnels du Nunavik. **Haut, gauche** : buttes de marbre calcitique affleurant dans les environs de la baie Keglo. **Haut, droite** : cailloutis de péridotite dans le cours supérieur de la rivière Déception (monts de Puvirnituq). **Centre, gauche** : dépôts glaciomarins d'eau profonde soliflués et partiellement dénudés près de la côte entre Salluit et Ivujivik. **Centre, droite** : dépôts coquilliers en marge d'une butte rocheuse côtière à proximité du village d'Akulivik. Ces dépôts sont formés de coquilles de myes (*Mya* spp.) plus ou moins éclatées et mélangées avec du sable. Il s'agit de plages soulevées où les étapes du retrait marin en lien avec le relèvement isostatique sont bien visibles par la succession de bandes foncées (creux végétalisés) et de bandes blanches (coquilles dénudées sur les crêtes). **Bas, gauche** : lac marneux entre la rivière Caniapiscau et le lac Castignon, fosse du Labrador. **Bas, droite** : peupleraie baumière sur le flanc d'une butte gréseuse en bordure du lac Finger (fosse du Labrador, 58°25'N).

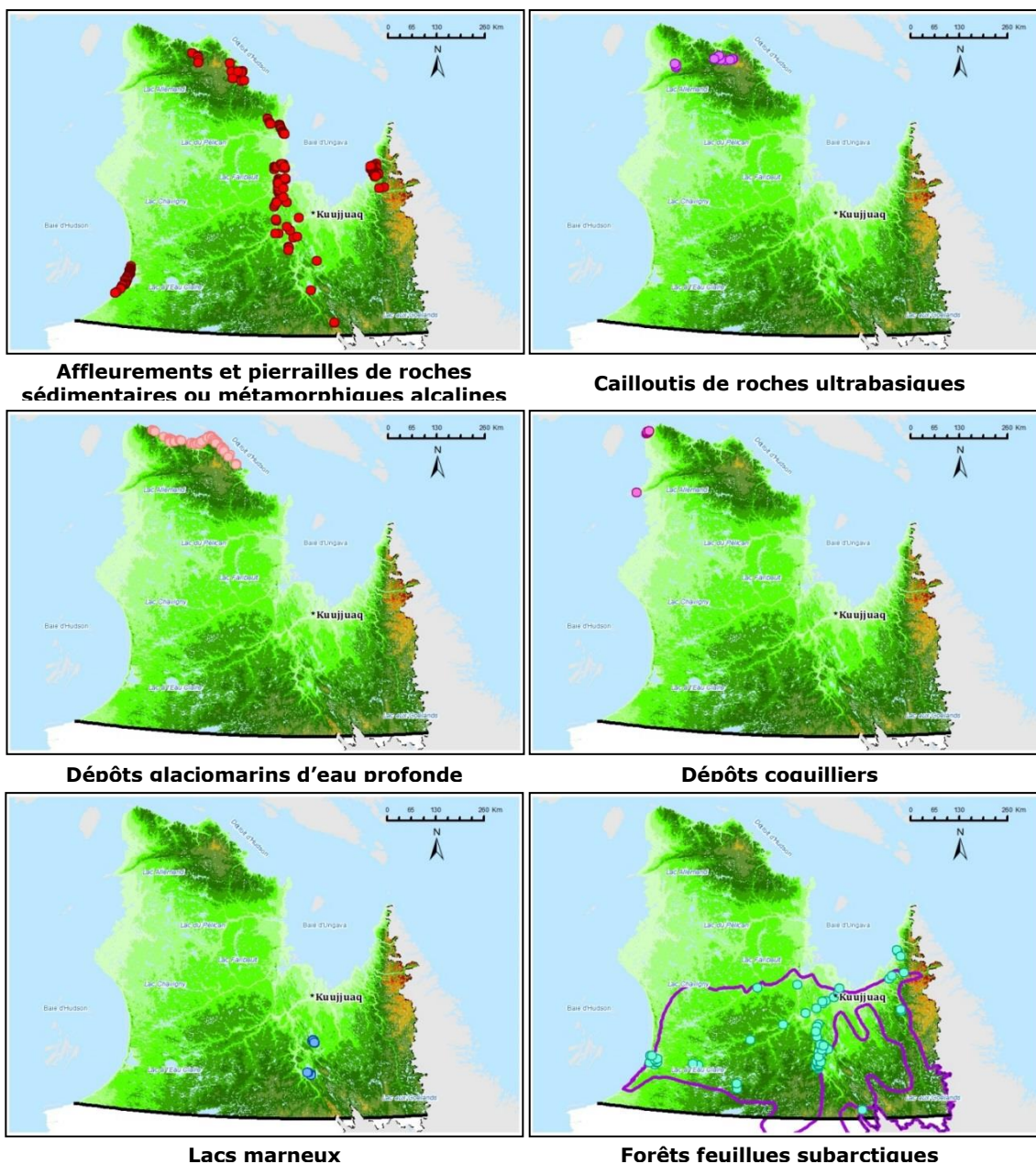


Figure 5-16 Répartition des écosystèmes exceptionnels du Nunavik. La ligne violette dans la carte des forêts feuillues subarctiques représente les limites du domaine bioclimatique de la toundra forestière. L'arrière-plan montre la topographie (altitude croissante de vert pâle à rouge).

5.4 Synthèse

- Il apparaît peu probable qu'on assiste à une remontée significative de la limite des arbres latitudinale même si les changements climatiques modélisés pour l'horizon 2080 se concrétisent, et ce malgré de possibles réponses locales rapides et spectaculaires. Au Nunavik du moins, plusieurs études démontrent que la position de la limite nordique des arbres n'a pas fluctué de façon marquée au cours des derniers millénaires, malgré des périodes aux températures plus chaudes. Il semble que l'avancée ou le recul de la limite des arbres soient des processus complexes qui impliquent une gamme de mécanismes qui ne sont pas aisément déclenchés par des changements climatiques. C'est probablement plus au sud, au niveau des limites des arbres altitudinales de la toundra forestière, que se produiront les réponses dynamiques les plus fortes. Une élévation significative de ces limites est fort probable là où il n'y a pas de contrainte édaphique ou hydrique majeure, de même qu'une perte locale de limites altitudinales là où les remontées atteindront les sommets. L'allongement important de la saison de croissance et la hausse substantielle des températures estivales, couplés à une augmentation des précipitations peu marquée au printemps et au début de l'été, pourraient toutefois entraîner un stress hydrique important résultant en une stagnation ou un recul local de la limite des arbres;
- En ce qui concerne les forêts du Haut-Boréal (pessière à lichens et toundra forestière), leur évolution dans les décennies à venir est incertaine et implique une gamme étendue de facteurs biotiques et abiotiques; tous plus ou moins étroitement gouvernés par le climat. Il demeure probable qu'on assiste à une densification et une expansion des forêts dans un contexte où les modélisations climatiques prévoient une augmentation substantielle des températures et des précipitations de même qu'un allongement important de la saison de croissance. Une telle réponse positive des forêts se produira pourvu qu'il n'y ait pas de déphasage intra-annuel entre la hausse des températures et l'augmentation des précipitations. Si un tel déphasage se produit, il pourrait résulter en une hausse de l'incidence des feux et en des stress hydriques importants qui limiterait les gains en croissance et en production de graines de qualité et mettrait en péril la survie des semis. Au final, si une telle expansion des forêts se produit, cela se soldera par une

augmentation de l'étendue du domaine bioclimatique de la pessière à lichens au détriment de celui de la toundra forestière;

- Il est probable qu'une expansion des arbustes érigés dans les sites où il n'y a pas de contraintes édaphiques et topographiques majeures soit la principale réponse de la toundra arctique face aux changements climatiques. Cette expansion est d'ailleurs déjà entamée et se manifeste particulièrement dans les portions méridionales de l'Arctique québécois. La limite entre les deux domaines bioclimatiques arctiques ne changera probablement pas de façon significative. Cependant, on peut s'attendre à ce que les arbustales érigées au sein du domaine de la toundra arctique à arbustes rampants prennent de l'expansion et qu'une colonisation de nouveaux sites se produise, surtout là où la topographie et le substrat étaient déjà favorables, mais où le climat ne l'était pas. On devrait également assister à une densification et à une croissance en hauteur des arbustales existantes dont le couvert est discontinu. Certains milieux verront les ouvertures entre les bosquets se fermer graduellement et complètement. Dans l'ensemble au Québec arctique, la conséquence sera donc une hausse des superficies occupées par la toundra à arbustes érigés au détriment de celles occupées par la toundra à arbustes rampants. Une expansion et une croissance en hauteur des herbacées graminéoïdes risquent aussi de se produire, principalement dans les vallées. Les sites trop exposés ou dépourvus de substrat meuble verront probablement peu de changements. Plusieurs facteurs viendront freiner ou nuancer la réponse de la toundra aux changements climatiques, notamment : les modifications dans les régimes hydriques et dans les conditions d'enneigement, les patrons de dégradation du pergélisol, les grands herbivores (tant au niveau du piétinement que du broutement) et la fréquence d'événements climatiques extrêmes tels que les redoux hivernaux;
- Les aspects édaphiques et topographiques représentent des facteurs de première importance desquels dépendent à la fois la structure et la répartition actuelles du couvert végétal au Nunavik, comme son évolution dans un contexte de changements climatiques. Dans l'Arctique, un verdissement en général et une expansion des arbustes érigés en particulier sont déjà entamés et s'observent de façon préférentielle dans certains milieux alors que d'autres sont demeurés inchangés. L'évolution future du couvert devrait procéder selon le même patron. Ce sont surtout

les sites aux conditions édaphiques et topographiques favorables telles que les portions inférieures des versants et le fond des vallées qui devraient subir le gros du verdissement et de l'arbustification. De grandes portions du Nunavik sont dépourvues ou presque de dépôts meubles et ne devraient donc pas voir de changement significatif du couvert végétal d'ici 2100. Le pergélisol est certainement l'un des aspects les plus importants à considérer dans l'évolution future de la végétation de toundra soumise à un climat changeant. La dégradation généralisée du pergélisol et sa disparition appréhendée dans les portions méridionales du Nunavik risquent d'entraîner des modifications locales importantes au sein du couvert végétal;

- Dans plusieurs écosystèmes arctiques, les grands herbivores comme le caribou et le bœuf musqué ont, via le broutement et le piétinement, une influence fondamentale sur la structure et la composition des communautés végétales. Plusieurs études démontrent que le broutement peut limiter l'expansion du couvert des espèces privilégiées dans leur régime alimentaire, dont les arbustes érigés. La pression exercée par le broutement peut donc inhiber ou même empêcher la hausse du couvert arbustif dans un contexte de réchauffement climatique, en agissant en contrepoids face aux effets bénéfiques d'un tel réchauffement sur la croissance. Ce type d'interaction se produira davantage dans les portions les plus nordiques du Québec arctique où les arbustales érigées sont rares et peu étendues. Quant au piétinement, un des impacts est la mise en disponibilité de lits de germination de qualité par la dénudation du substrat minéral. Le rôle futur que joueront les grands herbivores au sein des environnements subarctiques et arctiques soumis à des conditions climatiques changeantes dépendra de leur évolution démographique; à savoir si les troupeaux de caribous reprennent de l'ampleur et si la population de bœuf musqué maintient sa tendance à la hausse;
- Bien qu'il puisse se produire des extinctions locales au sein d'écosystèmes soumis à des conditions climatiques telles que celles modélisées pour l'horizon 2080 (peu importe le scénario), il est peu probable que des espèces de plantes viennent à disparaître complètement du Nunavik. Les impacts toucheront vraisemblablement davantage l'abondance relative des espèces sur le territoire et la productivité que la biodiversité. Dans la toundra, l'expansion des arbustes érigés est liée à une diminution du

couvert des autres strates, particulièrement des strates muscinales et lichéniques. Les arbustes rampants, qui incluent les espèces productrices de petits fruits, en subissent aussi des effets délétères. La qualité des sites de cueillette de petits fruits, une activité de grande importance pour les Inuits du Nunavik, pourrait donc être mise en péril par une expansion généralisée des arbustes érigés. Par ailleurs, il faut s'attendre à ce que les quelques populations existantes d'espèces adventices prennent de l'expansion, mais aussi à l'arrivée d'autres espèces qui y trouveront des niches climatiques nouvellement favorables;

- Cinq des six écosystèmes exceptionnels du Nunavik sont des milieux ouverts à végétation éparse. La principale menace à l'intégrité des écosystèmes non riverains est l'envahissement par un couvert végétal haut et dense, notamment arbustif. Ceci est toutefois peu probable pour les affleurements et les pierrailles où la contrainte est surtout d'ordre édaphique. Les cailloutis de roches ultrabasiques sont aussi sujets à la toxicité liée à la nature de la roche qui limite la croissance végétale. Les dépôts coquilliers, quant à eux, sont des habitats côtiers exposés et à drainage élevés dont le couvert risque peu de changer dans les prochaines décennies. Le couvert des dépôts glaciomarins d'eau profonde pourrait changer si le mollisol s'épaissit et si l'activité périglaciaire diminue. Les rives des lacs marneux pourraient être bouleversées si le régime hydrologique change dans un contexte où les précipitations annuelles augmentent substantiellement. Les forêts feuillues subarctiques représentent le type d'écosystème exceptionnel qui risque de répondre le plus. Une augmentation de la croissance radiale et en hauteur est à prévoir pourvu que la hausse des températures soit accompagnée d'une hausse synchrone des précipitations afin de limiter le stress hydrique. Une expansion des forêts feuillues existantes risque de se produire là où le contexte biophysique des zones périphériques le permet. Une colonisation de nouveaux sites devenus climatiquement favorables est également envisageable et sera favorisée par une augmentation de la production et de la viabilité de graines par les individus préétablis.

5.5 Références

- Ali, A.A., H. Asselin, A.C. Larouche, Y. Bergeron, C. Carcaillet et P.J.H. Richard, 2008. Changes in fire regime explain Holocene rise and fall of *Abies balsamea* in the coniferous forests of western Québec, Canada. *The Holocene*, 18(5), pp. 693-703.
- Allard, M., R. Fortier, D. Sarrazin, F. Calmels, F. Fortier, D. Chaumond, J.-P. Savard et A. Tarussov, 2007. L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractéristique du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes. Centre d'études Nordiques, Québec, 184 pp.
- Allard, M., M. Lemay, C. Barrette, E. L'Hériault et D. Sarrazin, 2013. Le pergélisol et les changements climatiques au Nunavik et au Nunatsiavut : importance en matière d'infrastructures municipales et de transports. Pp. 175-203 in M. Allard et M. Lemay (éd.). Le Nunavik et le Nunatsiavut : de la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation. ArcticNet Inc., Québec, Québec, 318 pp.
- Arquillère, S., L. Filion, K. Gajewski et C. Cloutier, 1990. A dendroecological analysis of eastern larch (*Larix laricina*) in subarctic Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 20, pp. 1312-1319.
- Arseneault, D., 2001. Impact of fire behavior on postfire forest development in a homogeneous forest landscape. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, pp. 1367-1374.
- Arseneault, D. et L. Sirois, 2004. The millennial dynamics of a boreal forest stand from buried trees. *Journal of Ecology*, 92, pp. 490-504.
- Barber, V.A., G.P. Juday et B.P. Finney, 2000. Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced draught stress. *Nature*, 405, pp. 668-673.
- Belzile, R., G. Gendron, J. Huot, S. Payette, H. Leblond et J. Bouchard, 1981. Rapport d'évaluation du projet d'élevage de bœuf musqué. Umingmaqautik, N.Q. (1967-1980). Centre d'études nordiques et faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec, 169 pp.

- Bokhorst, S., J.W. Bjerke, F.W. Bowles, J. Melillo, T.V. Callaghan et G.K. Phoenix, 2008. Impacts of extreme winter warming in the sub-Arctic: growing season responses of dwarf shrub heathland. *Global Change Biology*, 14, pp. 2603-2612.
- Boudreau, S. et S. Payette, 2004. Caribou-induced changes in species dominance of lichen woodlands: an analysis of plant remains. *American Journal of Botany*, 91(3), pp. 422-429.
- Bret-Harte, M.S., G.R. Shaver, J.P. Zoerner, J.F. Johnstone, J.L. Wagner, A.S. Chavez, R.F. Gunkelman, S.C. Lippert et J.A. Laundre, 2001. Developmental plasticity allows *Betula nana* to dominate tundra subjected to an altered environment. *Ecology*, 82, pp. 18-32.
- Bret-Harte, M.S., G.R. Shaver et F.S. Chapin III, 2002. Primary and secondary stem growth in arctic shrubs: implications for community response to environmental change. *Journal of Ecology*, 90, pp. 251-267.
- Buckeridge, K.M. et P. Grogan, 2008. Deepened snow alters soil microbial nutrient limitations in arctic birch hummock tundra. *Applied Soil Ecology*, 39, pp. 210-222.
- Caccianiga, M. et S. Payette, 2006. Recent advance of white spruce (*Picea glauca*) in the coastal tundra of the eastern shore of Hudson Bay (Québec, Canada). *Journal of Biogeography*, 233, pp. 2120-2135.
- Caccianiga, M., S. Payette et L. Filion, 2008. Biotic disturbance in expanding subarctic forests along the eastern coast of Hudson Bay. *New Phytologist*, 178, pp. 823-834.
- Callaghan, T.V., R.M.M. Crawford, M. Eronen, A. Hofgaard, S. Payette, W.G. Rees, O. Skre, B. Sveinbjörnsson, T.K. Vlassova et B.R. Werkman, 2002. The dynamics of the tundra-taïga boundary: an overview and suggested coordinated and integrated approach to research. *Ambio* Special Report 12, Tundra-Taïga Treeline Research, pp. 3-5.
- CAVM Team, 2003. Circumpolar Arctic Vegetation Map. Échelle 1 : 7 500 000. Conservation of Arctic Flora and Faune (CAFF) Map No. 1. Fish and Wildlife Service, Anchorage, Alaska.
- Champagne, E., J.-P. Tremblay et S. Côté, 2012. Tolerance of an expanding subarctic shrub, *Betula glandulosa*, to simulated caribou browsing. *PLoS One*, 7(12), e51940.

- Chapin III, F.S. et A.M. Starfield, 1997. Time lags and novel ecosystems in response to transient climatic change in arctic Alaska. *Climate Change*, 35, pp. 449-461.
- Cornelissen, J.H.C., T.V. Callaghan, J.M. Alatalo, A. Michelsen, E. Graglia, A.E. Hartley, D.S. Hik, S.E. Hobbie, M.C. Press, C.H. Robinson, G.H.R. Henry, G.R. Shaver, G.K. Phoenix, D. Gwynn Jones, S. Jonasson, F.S. Chapin III, U. Molau, C. Neill, J.A. Lee, J.M. Melillo, B. Sveinbjörnsson et R. Aerts, 2001. Global change and arctic ecosystems : is lichen decline a function of increase in vascular plant biomass? *Journal of Ecology*, 89, pp. 984-994.
- Crête, M., J. Huot et L. Gauthier, 1990. Food selection during early lactation by caribou calving on the tundra in Quebec. *Arctic*, 43(1), pp. 60-65.
- Crête, M., J.-P. Ouellet et L. Lesage, 2001. Comparative effects on plants of caribou/reindeer, moose and white-tailed deer herbivory. *Arctic*, 54(4), pp. 407-417.
- Cuerrier, A., N.D. Brunet, J. Gérin-Lajoie, A. Downing et E. Lévesque, 2015. The study of Inuit knowledge of climate change in Nunavik, Quebec: a mixed methods approach. *Human Ecology*, DOI 10.1007/s10745-015-9750-4.
- Dufour-Tremblay, G. et S. Boudreau, 2011. Black spruce regeneration at the treeline ecotone: synergistic impacts of climate change and caribou activity. *Canadian Journal of Forest Research*, 41, pp. 460-468.
- Dufour-Tremblay, G., E. Lévesque et S. Boudreau, 2012a. Dynamics at the treeline: differential responses of *Picea mariana* and *Larix laricina* to climate change in subarctic eastern Québec. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044038.
- Dufour-Tremblay, G., L. De Vriendt, E. Lévesque et S. Boudreau, 2012b. The importance of ecological constraints on the control of multi-species treeline dynamics in eastern Nunavik, Québec. *American Journal of Botany*, 99(10), pp. 1638-1646.
- Epstein, H.E., J. Beringer, W.A. Gould, A.H. Lloyd, C.D. Thompson, F.S. Chapin III, G.J. Michaelson, C.L. Ping, T.S. Rupp et D.A. Walker, 2004. The nature of spatial transitions in the Arctic. *Journal of Biogeography*, 31, pp. 1917-1933.

- Filion, L., C. Cloutier et L. Cournoyer, 2010. Dendroécologie des épidémies de la tenthrède du mélèze (*Pristiphora erichsonii*) dans l'est du Canada. Pp. 437-447 in S. Payette et L. Filion (éd.). La dendroécologie: principes, méthodes et applications. Presses de l'Université Laval, Québec, Québec.
- Fraser, R.H., I. Olthof, M. Carrière, A. Deschamps et D. Pouliot, 2011. Detecting long-term changes to vegetation in northern Canada using the Landsat satellite image archive. *Environmental Research Letter*, 6, 045502 (9 pp.).
- Fraser, R.H., T.C. Lantz, I. Olthof, S.V. Kokelj et R.A. Sims, 2014. Warming-induced shrub expansion and lichen decline in the western Canadian Arctic. *Ecosystems*, 17, pp. 1151-1168.
- Frost, G.V., H.E. Epstein, D.A. Walker, G. Matyshak et K. Ermokhina, 2013. Patterned-ground facilitates shrub expansion in Low Arctic tundra. *Environmental Research Letters*, 8, 015035 (9 pp.).
- Gagnon, R. et S. Payette, 1981. Fluctuations holocènes de la limite des forêts de mélèzes, rivière aux Feuilles, Nouveau-Québec : une analyse macrofossile en milieu tourbeux. *Géographie physique et Quaternaire*, 39, pp. 57-72.
- Gajewski, K., S. Payette et J.C. Ritchie, 1993. Holocene vegetation history at the Boreal-Forest--Shrub-Tundra transition in north-western Quebec. *The Journal of Ecology*, 81(3), pp. 433-443.
- Gajewski, K., 2015. Impact of Holocene climate variability on Arctic vegetation. *Global and Planetary Change*, 133, pp. 272-287.
- Gamache, I. et S. Payette, 2004. Height growth response of tree line black spruce to recent climate warming across the forest-tundra of eastern Canada. *Journal of Ecology*, 92, pp. 835-845.
- Gamache, I. et S. Payette, 2005. Latitudinal response of subarctic tree lines to recent climate change in eastern Canada. *Journal of Biogeography*, 32, pp. 849-862.
- Gilbert, H. et S. Payette, 1982. Écologie des populations d'aulne vert (*Alnus crispa* (Ait.) Pursh) à la limite des forêts, Québec nordique. *Géographie physique et Quaternaire*, 36(1-2), pp. 109-124.

- Girardin, M.P., O. Bouriaud, E.H. Hogg, W. Kurz, N.E. Zimmermann, J.M. Metsaranta, R. De Jong, D.C. Frank, J. Esper, U. Büntgen, X. Jing Guo et J. Bhatti, 2016. No growth stimulation of Canada's boreal forest under half-century of combined warming and CO₂ fertilization. *PNAS*, 113(52), pp. 406-414.
- Gouvernement du Québec, 2003-2016. Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. En ligne: <http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/inventaire-zones-carte.jsp> (consulté en janvier 2017).
- Gouvernement du Québec, 2016a. Caribous de la rivière George – Résultats de l'inventaire aérien du troupeau. En ligne: <http://mffp.gouv.qc.ca/caribous-de-la-riviere-george-resultats-de-linventaire-aerien-du-troupeau/> (consulté en février 2017).
- Gouvernement du Québec, 2016b. Caribous de la rivière aux Feuilles – Résultats de l'inventaire aérien. En ligne: <http://mffp.gouv.qc.ca/2016-12-09-inventaire-caribous-riviere-aux-feuilles/> (consulté en février 2017).
- Grace, J., F. Beringer et L. Nagy, 2002. Impacts of climate change on the treeline. *Annals of Botany*, 90, pp. 537-544.
- Grogan, P. et F.S. Chapin, 2000. Initial effects of experimental warming on above – and below ground components of net ecosystem CO₂ exchange in arctic tundra. *Oecologia*, 125, pp. 512-520.
- Harsch, M.A., P.E. Hulme, M.S. McGlone et R.P. Duncan, 2009. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters*, 12, pp. 1040-1049.
- Hollister, R.D., J.L. May, K.S. Kremers, C.E. Tweedie, S.F. Oberbauer, J.A. Liebig, T.F. Botting, R.T. Barrett et J.L. Gregory, 2015. Warming experiments elucidate the drivers of observed directional changes in tundra vegetation. *Ecology and Evolution*, 5(9), pp. 1881-1895.
- Jean, D., S. Rivard et M. Bélanger, 2006. Inventaire et structure de population du bœuf musqué (*Ovibos moschatus*) au sud-ouest de la baie d'Ungava (août 2003). *Naturaliste canadien*, 130(2), pp. 42-48.
- Ju, J. et J.G. Masek, 2016. The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984-2012 Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 176, pp. 1-16.

- Larsen, K.S, P. Grogan, S. Jonasson et A. Michelsen, 2007. Respiration and microbial dynamics in two subarctic ecosystems during winter and spring thaw: effects of increased snow depth. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 39(2), pp. 268-276.
- Lavoie, C. et S. Payette, 1994. Recent fluctuations of the lichen-spruce forest limite in subarctic Quebec. *The Journal of Ecology*, 82(4), pp. 725-734.
- Lavoie, C. et S. Payette, 1996. The long term stability of the boreal forest limit in subarctic Quebec. *Ecology*, 77(4), pp. 1226-1233.
- Lescop-Sinclair, K. et S. Payette, 1995. Recent advance of the Arctic treeline along the eastern coast of Hudson Bay. *The Journal of Ecology*, 83(6), pp. 929-936.
- Lévesque, E., L. Hermanutz, J. Gérin-Lajoie, T. Bell, S. Boudreau, A. Cuerrier, J. Jacobs, C. Laroque, C. Lavallée, L. Siegwart Collier et B. Tremblay, 2013. Évolution dynamique de la végétation et ses répercussions sur la productivité des petits fruits. Pp. 231-257 in M. Allard et M. Lemay (éd.). *Le Nunavik et le Nunatsiavut : de la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation*. ArcticNet Inc., Québec, Québec, 318 pp.
- Liston, G.E., J.P. McFadden, M. Sturm et R.A. Pielke, 2002. Modelled changes in Arctic tundra snow, energy and moisture fluxes due to increased shrubs. *Global Change Biology*, 8, pp. 17-32.
- Lloyd, A.H. et C.L. Fastie, 2002. Spatial and temporal variability in the growth and climate response of treeline trees in Alaska. *Climate Change*, 52, pp. 481-509.
- Mamet, S.D. et G.P. Kershaw, 2012. Subarctic and alpine tree line dynamics during the last 400 years in north-western and central Canada. *Journal of Biogeography*, 39, pp. 855-868.
- Manseau, M., J. Huot et M. Crête, 1996. Effects of summer grazing by caribou on composition and productivity of vegetation: community and landscape level. *Journal of Ecology*, 84, pp. 503-513.
- Marsh, P., P. Bartlett, M. MacKay, S. Pohl et T. Lantz, 2010. Snowmelt energetics at a shrub tundra site in the western Canadian Arctic. *Hydrological Processes*, 24, pp. 3603-3620.

- McManus, K.M., D.C. Morton, J.G. Masek, D. Wang, J.O. Sexton, J.R. Nagol, P. Ropars et S. Boudreau, 2012. Satellite-based evidence for shrub and graminoid tundra expansion in northern Quebec from 1986 to 2010. *Global Change Biology*, 18, pp. 2313-2323.
- Morin, A. et S. Payette, 1984. Expansion récente du mélèze à la limite des forêts (Québec nordique). *Canadian Journal of Botany*, 62, pp. 1404-408.
- Myers-Smith, I.H., D.S. Hik, C. Kennedy, D. Cooley, J.F. Johnstone, A.J. Kenney et C.J. Krebs, 2011. Expansion of canopy forming willows over the twentieth century on Herschel Island, Yukon Territory, Canada. *Ambio*, 40(6), pp. 610-623.
- Myers-Smith, I.H. et D.S. Hik, 2013. Shrub canopies influence soil temperature but not nutrient dynamics: an experimental test of tundra snow-shrub interactions. *Ecology and Evolution*, 3(11), pp. 3683-3700.
- Myers-Smith, I.H., S.C. Elmendorf, P.S.A. Beck, M. Wilmking, M. Hallinger, D. Blok, K.D. Tape, S.A. Rayback, M. Macias-Fauria, B.C. Forbes, J.D.M. Speed, N. Boulanger-Lapointe, C. Rixen, E. Lévesque, N. Martin Schmidt, C. Baittinger, A.J. Trant, L. Hermanutz, L. Siegwart Collier, M.A. Dawes, T.C. Lantz, S. Weijers, R.H. Jørgensen, A. Buchwal, A. Buras, A.T. Naito, V. Ravolainen, G. Schaepman-Strub, J.A. Wheeler, S. Wipf, K.C. Guay, D.S. Hik et M. Vellend, 2015. Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome. *Nature Climate Change*, 5, pp. 887-891.
- Noble, I.R., 1993. A model of the response of ecotones to climate change. *Ecological Applications*, 3(3), pp. 396-403.
- Nobrega, S. et P. Grogan, 2007. Deeper snow enhances winter respiration from both plant-associated and bulk soil carbon pools in birch hummock tundra. *Ecosystems*, 10, pp. 419-431.
- Olofsson, J., L. Oksanen, T. Callaghan, P.E. Hulme, T. Oksanen et O. Suominen, 2009. Herbivores inhibit climate-driven shrub expansion on the tundra. *Global Change Biology*, 15, pp. 2681-2693.
- Pajunen, A.M., J. Oksanen et R. Virtanen, 2011. Impact of shrub canopies on understory vegetation in western Eurasian tundra. *Journal of Vegetation Science*, 22, pp. 837-846.

- Payette, S., 1976. Les limites écologiques de la zone héli-arctique entre la mer d'Hudson et la baie d'Ungava, Nouveau-Québec. *Cahiers de géographie du Québec*, 20(50), pp. 347-365.
- Payette, S., 1992. Fire as a controlling process in the North American boreal forest. Pp. 145-169 in H. H. Shugart, R. Leemans et G. B. Bonan (éd.). A system analysis of the global boreal forest. Cambridge University Press, Cambridge.
- Payette, S., 2001. Origine et dynamique des paises et des plateaux palsiques. Pp. 229-239 in S. Payette et L. Rochefort (éd.). Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Presses de l'Université Laval, Québec, Québec. 621 pp.
- Payette, S., 2007. Contrasted dynamics of northern Labrador tree lines caused by climate change and migrational lag. *Ecology*, 88(3), pp. 770-780.
- Payette, S., 2013a. Contexte géographique. Pp. 37-60 in S. Payette (Éd.). Flore nordique du Québec et du Labrador. Volume 1. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Québec. 553 pp.
- Payette, S., 2013b. *Pinacea* Lindley. Répartition et habitat. Pp. 237-241 in S. Payette (Éd.). Flore nordique du Québec et du Labrador. Volume 1. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Québec. 553 pp.
- Payette, S. et R. Gagnon, 1979. Tree-line dynamics in Ungava peninsula, northern Quebec. *Holarctic Ecology*, 2, pp. 239-248.
- Payette, S., J. Deshayé et H. Gilbert, 1982. Tree seed populations at the treeline in rivière aux Feuilles area, northern Quebec, Canada. *Arctic and Alpine Research*, 14(3), pp. 215-221.
- Payette, S. et L. Filion, 1985. White spruce expansion at the tree line and recent climatic change. *Canadian Journal of Forest Research*, 15, pp. 241-251.
- Payette, S., C. Morneau, L. Sirois et M. Despons, 1989. Recent fire history of the northern Québec biomes. *Ecology*, 70(3), pp. 656-673.
- Payette, S., M.-J. Fortin et I. Gamache, 2001. The subarctic forest-tundra : the structure of a biome in a changing climate. *BioScience* 51 (9) : 709-718.
- Payette, S. et L. Rochefort, 2001. Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Presses de l'Université Laval, Québec, Québec. 621 pp.

- Plante, S., E. Champagne, P. Ropars, S. Boudreau, E. Lévesque, B. Tremblay et J.-P. Tremblay, 2014. Shrub cover in northern Nunavik: can herbivores limit shrub expansion? *Polar Biology*, 37(5), pp. 611-619.
- Pomeroy, J.W., D.S. Bewley, R.L.H. Essery, N.R. Hedstrom, T. Link, R.J. Granger, J.E. Sicart, C.R. Ellis et J.R. Janowicz, 2006. Shrub tundra snowmelt. *Hydrological Processes*, 20(4), pp. 923-941.
- Post, E., 2013. Erosion of community diversity and stability by herbivore removal under warming. *Proceedings of the Royal Society B*, 280, 20122722.
- Post, E. et C. Pederson, 2008. Opposing plant community responses to warming with and without herbivores. *PNAS*, 105(34), pp. 12353-12358.
- Provencher-Nolet, L., 2014. Détection de changement à court terme de la toundra arbustive à partir de photographies aériennes, région d'Umiujaq (Nunavik, Québec). Mémoire de maîtrise, Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau, Terre, Environnement, Québec, Québec, 172 pp.
- Ropars, P. et S. Boudreau, 2012. Shrub expansion at the forest-tundra ecotone: spatial heterogeneity linked to local topography. *Environmental Research Letters*, 7, 015501 (9 pp.).
- Rupp, T.S., F.S. Chapin III et A.M. Starfield, 2001. Modeling the influence of topographic barriers on tree line advance at the forest-tundra ecotone in northwestern Alaska. *Climate Change*, 48, pp. 399-416.
- Schimel, J.P., C. Bilbrough et J.M. Welker, 2004. Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities. *Soil Biology & Biochemistry*, 36(2), pp. 217-227.
- Scott, P.A. et R.I.C. Hansell, 2002. Development of white spruce tree islands in the shrub zone of the forest-tundra. *Arctic*, 55(3), pp. 238-246.
- Sirois, L., 2000. Spatiotemporal variation in black spruce cone and seed crops along a boreal forest – tree line transect. *Canadian Journal of Forest Research*, 30, pp. 900-909.
- Sturm, M., C. Racine et K. Tape, 2001a. Increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature*, 411, pp. 546-547.

- Sturm, M., J.P. McFadden, G.E. Liston, F.S. Chapin C.H. Racine et J. Holmgren, 2001b. Snow-shrub interactions in Arctic tundra: a hypothesis with climatic implications. *Journal of Climate*, 14(3), pp. 336-344.
- Sturm, M., J. Schimel, G. Michaelson, J.M. Welker, S.F. Oberbauer, G.E. Liston, J. Fahnestock et V.E. Romanovsky, 2005. Winter biological processes could help convert arctic tundra to shrubland. *Bioscience*, 55, pp. 17-26.
- Szeicz, J.M. et G.M. MacDonald, 1995. Recent white spruce dynamics at the subarctic alpine treeline of north-western Canada. *The Journal of Ecology*, 83(5), pp. 873-885.
- Tape, K., M. Sturm et C. Racine, 2006. The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic. *Global Change Biology*, 12, pp. 686-702.
- Tape, K., M. Hallinger, J.M. Welker et R.W. Ruess, 2012. Landscape heterogeneity of shrub expansion in Arctic Alaska. *Ecosystems*, 15(5), pp. 711-724.
- Trant, A.J. et L. Hermanutz, 2014. Advancing towards novel tree lines? A multispecies approach to recent tree line dynamics in subarctic alpine Labrador, northern Canada. *Journal of Biogeography*, 41, pp. 1115-1125.
- Tremblay, B., 2009. Augmentation récente du couvert ligneux érigé dans les environs de Kangisualujjuaq (Nunavik, Québec). Mémoire de maîtrise, université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec. 72 pp.
- Tremblay, B., 2016a. La flore vasculaire, la végétation et les écosystèmes de l'aire d'étude du projet de parc national du Cap-Wolstenholme (Nunavik, Québec). Document préparé pour l'Administration régionale Kativik, Service des ressources renouvelables, de l'environnement, du territoire et des parcs, Kuujjuaq, Québec, 122 pp.
- Tremblay, B., 2016b. La flore vasculaire, la végétation et les écosystèmes de l'aire d'étude du projet de réserve aquatique de la Rivière-Kovik (Nunavik, Québec). Document préparé pour l'Administration régionale Kativik, Service des ressources renouvelables, de l'environnement, du territoire et des parcs, Kuujjuaq, Québec, 114 pp.
- Tremblay, B., 2016c. La flore vasculaire, la végétation et les écosystèmes de l'aire d'étude de la réserve de biodiversité projetée de Quaqtak-Kangirsuk (Nunavik, Québec). Document préparé pour l'Administration régionale

- Kativik, Service des ressources renouvelables, de l'environnement, du territoire et des parcs, Kuujjuaq, Québec, 117 pp.
- Tremblay, B., E. Lévesque et S. Boudreau, 2012. Recent expansion of erect shrubs in the Low Arctic: evidence from Eastern Nunavik. *Environmental Research Letters*, 7, pp. 1-11.
- Wahren, C.-H.A., M.D. Walker et M.S. Bret-Harte, 2005. Vegetation responses in Alaskan arctic tundra after 8 years of a summer warming and winter snow accumulation experiment. *Global Change Biology*, 11, pp. 537-552.
- Walker, D.A., 2000. Hierarchical subdivision of Arctic tundra based on vegetation response to climate, parent material and topography. *Global Change Biology*, 6, pp. 19-34.
- Walker, M.D., C.H. Wahren, R.D. Hollister, G.H.R. Henry, L.E. Ahlquist, J.M. Alatalo, M.S. Bret-Harte, M.P. Calef, T.V. Callaghan, A.B. Carroll, H.E. Epstein, I.S. Jonsdottir, J.A. Klein, B. Magnusson, U. Molau, S.F. Oberbauer, S.P. Rewa, C.H. Robinson, G.R. Shaver, K.N. Suding, C.C. Thompson, A. Tolvanen, O. Totland, P.L. Turner, C.E. Tweedie, P.J. Webber et P.A. Wookey, 2006. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. *PNAS*, 103(5), pp. 1342-1346.
- Walker, X., G.H.R. Henry, K. McLeod et A. Hofgaard, 2012. Reproduction and seedling establishment of *Picea glauca* across the northernmost forest-tundra region in Canada. *Global Change Biology*, 18, pp. 3202-3211.
- Zamin, T.J. et P. Grogan, 2013. Caribou exclusion during a population low increases deciduous and evergreen shrub species biomass and nitrogen pools in low Arctic tundra. *Journal of Ecology*, 101, pp. 671-683.

Chapitre 6 La grande faune et son évolution possible

Auteurs:

Pascale Ropars, UQAR
Nicolas Casajus, UQAR
Dominique Berteaux, UQAR

Collaborateurs:

Vincent Brodeur, MFFP
Steeve D. Côté, Université Laval



6.1 Mise en contexte

Les changements prévus dans le régime climatique du Nunavik auront des conséquences importantes sur les processus écologiques de la région. Déjà enclenchée depuis le milieu des années 1990 (Bhiry et al. 2011), l'augmentation des températures est directement impliquée dans le dégel du pergélisol (Allard et Lemay 2013) et l'arbustification de la toundra du Québec nordique (Ropars et Boudreau 2012, Tremblay et al. 2012). La section 5.3.3, *La toundra et les arbustes*, présente une analyse détaillée sur le sujet. Au cœur de ces écosystèmes, une faune unique subit ces changements et devra s'adapter à ceux prévus dans les années à venir. Dans le cadre d'une étude à grande échelle des changements potentiels du régime climatique du Nunavik, le caribou migrateur s'impose tout naturellement comme espèce modèle pour étudier les impacts sur la faune; par le nombre impressionnant de bêtes que comptent ses troupes pour commencer, mais également parce qu'il est au centre d'un réseau trophique relativement simple et qu'il revêt une grande valeur pour les communautés autochtones locales.

6.1.1 Le caribou migrateur : une espèce emblématique du Nunavik

Le caribou, appelé renne en Europe, appartient à l'espèce *Rangifer tarandus* (Fig. 6-1a). En Amérique du Nord, on le classifie en quatre sous-groupes, dont trois se retrouvent au Nunavik : le caribou montagnard, que l'on retrouve dans les monts Torngat à cheval entre le Québec et le Labrador; le caribou forestier, qui sillonne la forêt boréale entre les 49^e et 55^e parallèles et le caribou migrateur, réparti en deux troupes en plein cœur du Nunavik. L'inventaire de mars 2014 répertoriait 930 individus dans le troupeau des monts Torngat (Couturier et al. 2015), tandis que 6740 caribous répartis en plusieurs hardes composent le sous-groupe forestier au Québec (Équipe de rétablissement du caribou forestier du Québec 2013). Comptant plusieurs milliers d'individus, l'écotype migrateur est de loin le plus important au Nunavik et revêt un caractère particulier pour les communautés inuites, tant au niveau culturel que socioéconomique. Ils sont en effet les animaux terrestres les plus chassés par les Inuits (Fig. 6-1d; Blanchet et Rochette 2008), en plus d'occuper une place de choix dans leur art traditionnel (Fig. 6-1b,c,e).

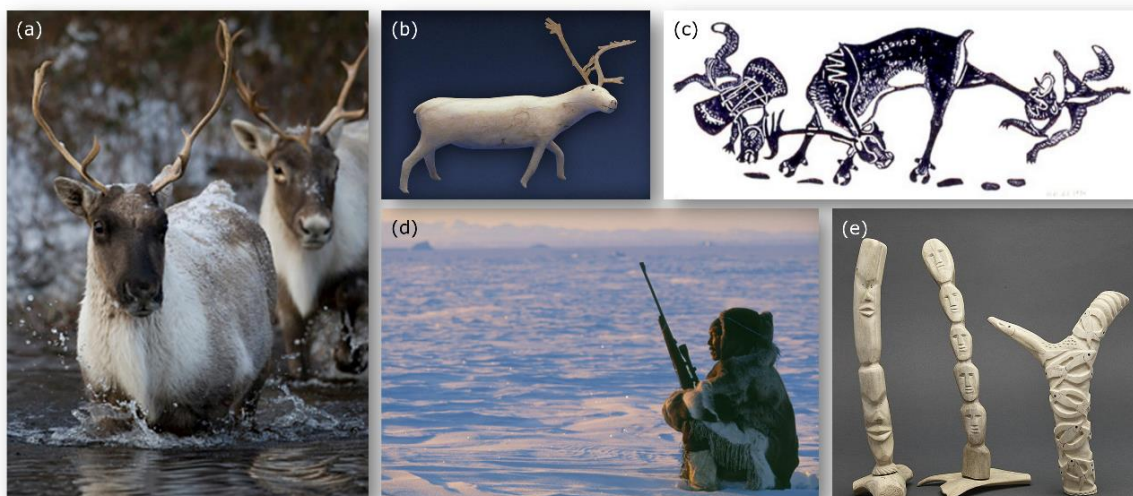


Figure 6-1 (a) Le caribou migrateur est une espèce emblématique du Nunavik, spécialement pour ses habitants qui le (b, c) représentent dans leur art, (d) le chassent et (e) l'utilisent comme support pour sculpter. Crédits photos : (a) Alamy photography (www.alamy.com), (b) Musée canadien de l'histoire, représentation d'un caribou sur ivoire, baie d'Hudson, (c) Musée RISD, œuvre de l'artiste inuit Tivi Etok, « Dogs in trouble with a caribou », 1974, Nunavik, (d) Staffant Widstrand, WWF et (e) Galerie Invaluable (www.invaluable.com), sculpture sur bois de l'artiste Tivi Etok, Nunavik.

6.1.1.1 Les troupeaux du Nunavik

Les caribous migrateurs du Nunavik sont répartis en deux troupeaux (Fig. 6-2) : celui de la rivière George (TRG), dont l'aire de répartition se situe dans la partie est du Nunavik et qui chevauche également le Labrador et le Nunatsiavut, et celui de la rivière aux Feuilles (TRF) qui occupe une grande partie de la péninsule de l'Ungava et qui s'étend au sud jusqu'au 52^e parallèle. Ces deux troupeaux, comptant plusieurs milliers de caribous, effectuent de longues migrations annuelles entre la toundra et la forêt boréale (Festa-Bianchet et al. 2011).

L'effectif des deux troupeaux a connu de grandes fluctuations dans les dernières décennies (Fig. 6-3), et des études dendroécologiques suggèrent que ces fluctuations ont également existé au cours des derniers siècles (Boudreau et al. 2003, Payette et al. 2004). Évalué à un minimum de 60 000 individus dans les années 1950 (Rasiulis 2015), l'effectif du TRG a rapidement augmenté pour atteindre à 823 000 individus en 1993 ($\pm 104\,000$; Fig. 6-3). La taille de la population du TRG a ensuite chuté, atteignant moins de la moitié de son effectif en 2001 (385 000 individus $\pm 108\,000$; Couturier et al. 2004). À l'été 2016, l'inventaire aérien estimait le troupeau à 8 900 individus (± 670 ;

ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec [MFFP], données non publiées).

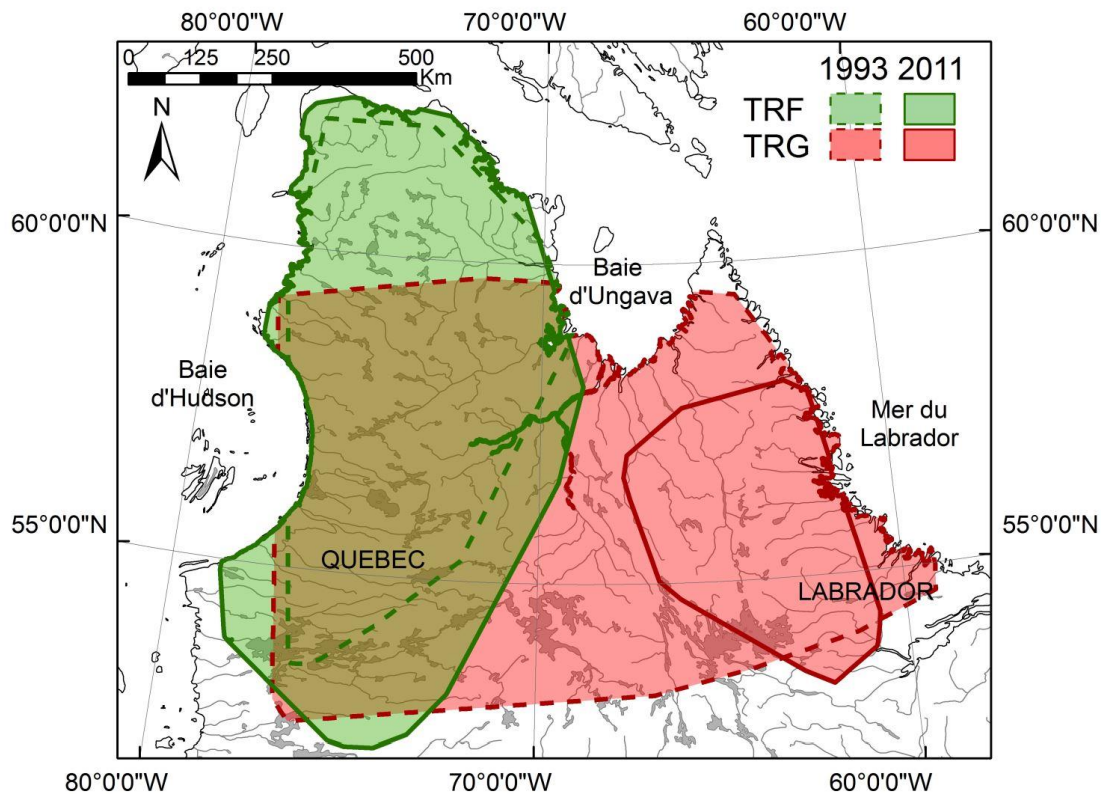


Figure 6-2 Aires de répartition annuelles des caribous des troupeaux de la rivière aux Feuilles (TRF; vert) et de la rivière George (TRG; rouge). Les traits pointillés représentent la situation en 1993, tandis que les traits pleins représentent celle de 2011. Figure tirée de Le Corre (2016).

À sa découverte en 1975, la taille du TRF a été estimée à 56 000 individus (Le Hénaff 1976; Fig. 6-3). Il a par la suite connu une forte croissance jusqu'en 2001, lorsqu'il a été estimé à plus de 628 000 individus. Après avoir connu une courte période de stabilité, le TRF a décliné depuis lors, atteignant moins de 200 000 têtes en 2016 ($199\,000 \pm 15\,920$; MFFP, données non publiées). Il est important de mentionner que l'inventaire du TRF de 2001 est considéré comme imprécis en raison de divers problèmes techniques rencontrés lors de l'inventaire (Couturier et al. 2004). Par mesure de précaution, la borne inférieure de l'intervalle de confiance (628 000) est donc utilisée. Un exercice de modélisation démographique récemment réalisé semble d'ailleurs justifier l'utilisation de cette valeur (Rasiulis 2015), plutôt que la moyenne initialement estimée à près de 1 200 000 individus (Couturier et al. 2004).

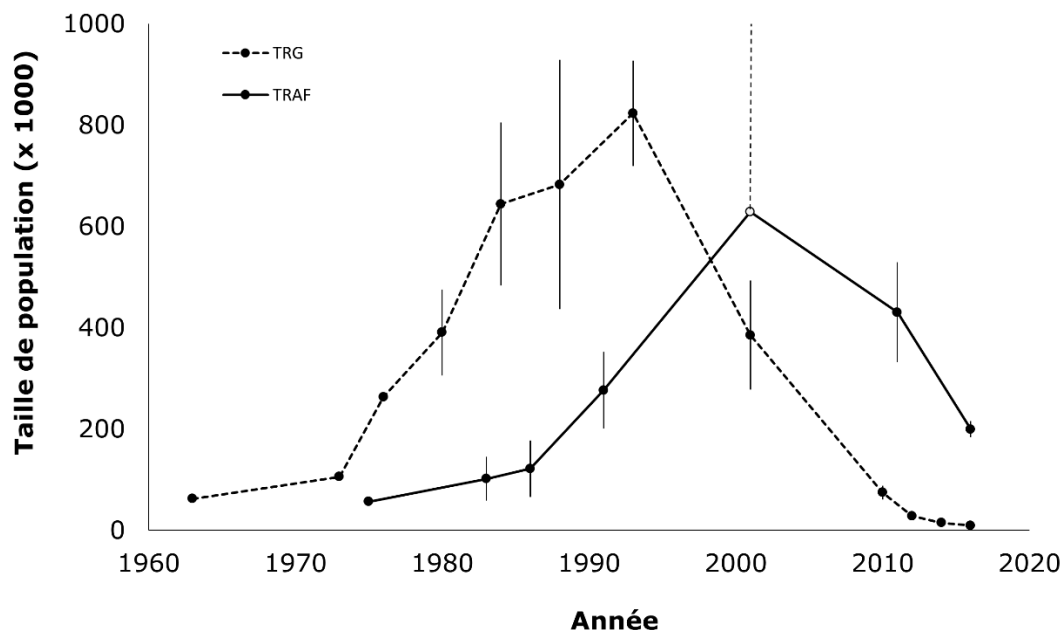


Figure 6-3 Taille des troupeaux de la rivière aux Feuilles (TRF) et de la rivière George (TRG) évaluée à partir des inventaires du gouvernement du Québec entre 1963 et 2016. L'intervalle de confiance (IC) n'est pas disponible pour les estimations antérieures à 1980, et ce, pour les deux troupeaux. Il est à noter que les IC pour le TRG en 2012, 2014 et 2016 sont trop petits pour être visibles sur la figure. L'estimation du TRF de 2001 (point blanc) correspond à la limite inférieure de l'IC (628 000 caribous).

Les grandes fluctuations de la population des deux troupeaux ont entraîné des changements majeurs dans l'utilisation du territoire, en particulier pour le TRG. L'aire de répartition annuelle du TRG s'étendait de la mer du Labrador à la côte de la baie d'Hudson en 1993 (Fig. 6-2) alors que l'effectif du troupeau était à un sommet (Fig. 6-3). En 2011, celle-ci était largement restreinte au Labrador et chevauchait seulement une mince bande à l'est du territoire québécois. Ce changement est principalement dû à une contraction de l'aire d'hivernage (Le Corre 2016). L'aire de répartition annuelle du TRF s'est quant à elle étendue entre 1993 et 2011 (Fig. 6-2), concordant avec une phase de croissance du troupeau (Fig. 6-3) et une augmentation de la distance parcourue lors de la migration (Taillon et al. 2016).

Alors que les deux troupeaux de caribous migrants du Nunavik étaient en contact sur leurs lieux d'hivernage dans les années 1990, leur aire de répartition est distincte depuis 2008 (Taillon et al. 2016). Bien que cette situation limite maintenant les échanges, il n'en demeure pas moins que les individus des TRG et TRF ne diffèrent pas génétiquement (Boulet et al. 2007,

Yannic et al. 2016). Certains indicateurs biologiques diffèrent cependant entre les deux troupes (Couturier et al. 2004, Taillon et al. 2012a), suggérant qu'il existe des inégalités dans la qualité des habitats utilisés par ceux-ci.

6.1.1.2 État des connaissances sur la biologie de l'espèce

Une importante quantité d'information sur la situation biologique de l'espèce peut être déduite grâce au suivi télémétrique à long terme du troupeau de la rivière aux Feuilles mené par le gouvernement du Québec depuis les années 1990. À ce suivi se sont ajoutés des travaux sur le terrain qui permettent maintenant de suivre l'évolution de la taille du troupeau et de la localisation de ses aires de répartition saisonnières, du taux de survie des individus, de la structure de la population, du recrutement, de la condition physique des femelles et des faons, des maladies et parasites affectant le caribou migrateur et de la productivité du troupeau. Dans le cadre de ce rapport, nous ferons un bref survol de certains éléments clés de la biologie de l'espèce que nous avons voulu mettre en relief, sans en faire une liste exhaustive. Le lecteur désireux d'avoir plus de détails peut se référer au rapport de Taillon et al. (2016).

Des études récentes montrent que des différences existent entre les deux troupes, notamment en ce qui a trait à la condition physique des individus. En effet, les faons et les femelles du TRG ont en moyenne une masse corporelle plus importante que ceux du TRF (Taillon et al. 2012b). Un meilleur accès à de la nourriture de qualité dans l'aire d'estivage ou un taux de déplacements saisonniers moins important pourraient en partie expliquer la différence entre les deux troupes (Hinkes et al. 2005, Couturier et al. 2010, Taillon 2013, Taillon et al. 2016). En effet, depuis le début des années 2000, la migration automnale d'une grande partie des individus du TRF s'est déplacée vers le sud, augmentant du même coup les taux de déplacements quotidiens (Couturier et al. 2010) et la longueur des migrations (Taillon et al. 2016).

Le suivi annuel du TRF nous permet de tirer certaines conclusions sur les causes probables de son récent déclin. Les taux de survie des caribous adultes de ce troupeau sont demeurés dans les limites jugées favorables à la stabilité démographique d'un troupeau entre 2008 et 2012 (Gaillard et Yoccoz 2003, Adamczewski et al. 2009, Boulanger et al. 2011, Taillon et al. 2012a). En 2013-2014 par contre, les taux de survie des femelles et des mâles ont été plus faibles. Bien que le recrutement (c'est-à-dire la proportion de faons dans la population à l'automne) soit demeuré relativement stable depuis 1994, celui-ci a enregistré trois années de faibles valeurs depuis le début du déclin du

TRF (2004, 2007 et 2014; Taillon et al. 2016). Le faible taux de survie des adultes en 2013-2014 conjugué au maigre recrutement de 2014 pourraient expliquer en partie le déclin observé du TRF (Taillon et al. 2016).

Bien que peu de données soient disponibles afin d'évaluer la productivité des femelles du TRF, il semble tout de même que le taux de gestation soit relativement faible pour les femelles de ce troupeau (Taillon et al. 2016). La plus faible masse corporelle moyenne des femelles du TRF pourrait en partie expliquer ce résultat (Couturier et al. 2009, Taillon et al. 2012b), parce que la probabilité qu'une femelle soit gestante augmente avec sa masse et son pourcentage de gras corporels (Pachkowski 2012). Cette productivité relativement faible s'ajoute donc aux deux facteurs présentés dans le précédent paragraphe pour expliquer une partie du déclin du TRF.

Un autre facteur important pour le maintien de la population à long terme est le nombre de grands mâles, puisque ce sont eux qui participent le plus activement à la reproduction et qui fécondent la majorité des femelles (Roed et al. 2002). Le TRF compte une très faible proportion de ces grands mâles; en moyenne, seulement 8% de la population font partie de cette catégorie depuis 2001. La proportion des mâles (toutes catégories confondues) se situait autour de 34 ± 4 par 100 femelles adultes entre 2004 et 2014, ce qui est inférieur à la moyenne pour les hardes de caribous migrants (= entre 40 et 70 mâles pour 100 femelles; Bergerud et al. 2008).

6.1.2 Le loup gris et l'ours noir : principaux prédateurs du caribou migrant

Au Nunavik, les principaux prédateurs du caribou migrant sont le loup gris (*Canis lupus*) et l'ours noir (*Ursus americanus*; Crête et al. 1990, Miller 2003; Fig. 6-4). Grand carnivore de la toundra, le loup est un prédateur efficace des faons et des caribous adultes, mais chasse également le lièvre et certaines espèces aviaires pour compléter sa diète. L'ours noir est quant à lui une espèce omnivore et opportuniste s'alimentant d'une grande diversité d'espèces végétales et animales, notamment plusieurs arthropodes (Lesmerises et al. 2015). Lorsqu'il s'attaque au caribou, il cible davantage les faons, mais réussit à capturer des adultes lorsqu'il arrive à les surprendre (Taillon et al. 2016).

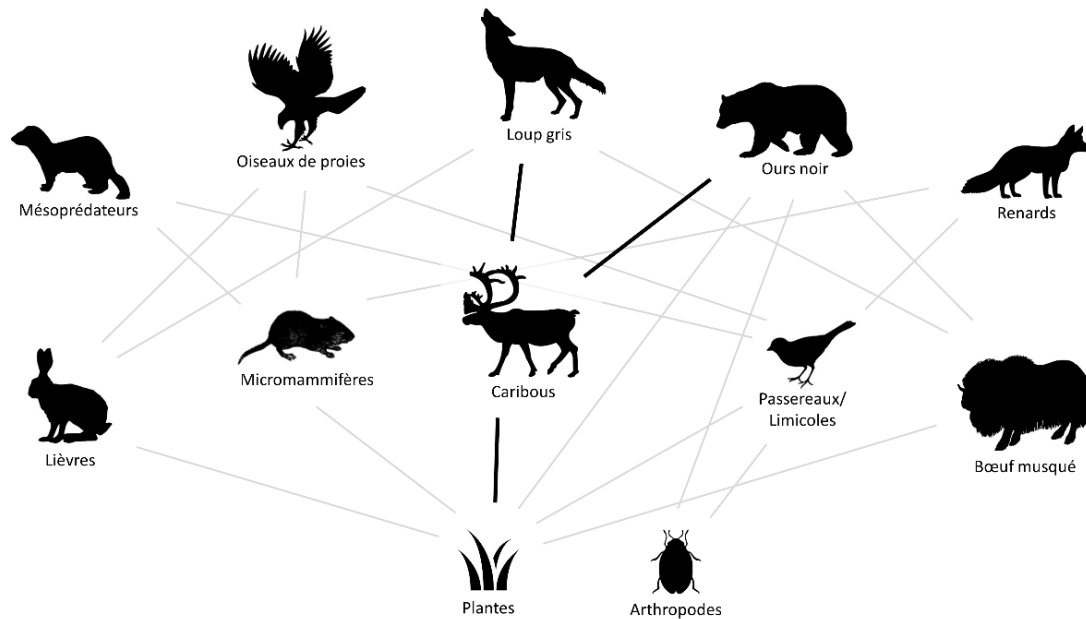


Figure 6-4 Représentation simplifiée du réseau trophique du Nunavik, Québec. Les liens prédateurs-proies sont représentés par une ligne reliant deux espèces ou groupes d'espèces. Les lignes plus foncées unissent le caribou migrateur à ses principaux prédateurs ainsi que sa source de nourriture.

La pression de prédation sur le caribou est un facteur peu étudié de la dynamique de population des troupeaux du Nunavik. Il en est cependant un aspect primordial, surtout dans un contexte de fort déclin des effectifs de caribous (Wittmer et al. 2005, Bergerud et al. 2008). Des efforts conjoints du MFFP et de la Chaire de recherche Caribou Ungava (Université Laval) ont récemment été mis en branle afin de mieux comprendre la dynamique de population de ces prédateurs et d'évaluer la part du caribou dans leur régime alimentaire. Ces informations devront être intégrées aux données présentées dans ce chapitre afin de dresser un portrait plus global de la situation du caribou migrateur et pour en faire une gestion durable.

6.1.3 Objectifs de l'étude

En tant qu'espèce clé des écosystèmes arctiques et subarctiques, une modification de la répartition du caribou migrateur pourrait avoir des conséquences biologiques, sociales et économiques importantes au Nunavik. Nous proposons donc de mieux cerner les changements potentiels dans la dynamique de population de cette espèce emblématique du nord du Québec, ainsi que de ses principaux prédateurs. Spécifiquement, nous proposons :

- i) de modéliser la répartition actuelle (1981-2010) du caribou migrateur, de l'ours noir et du loup gris au Nunavik,
- ii) de modéliser la répartition potentielle future de ces espèces dans les horizons 2041-2070 et 2071-2100 pour cette même région,
- iii) de présenter des scénarios potentiels d'abondance du caribou migrateur jusqu'en 2100 et
- iv) de synthétiser les résultats existants sur la dynamique des populations de caribou migrateur dans un contexte de changements climatiques.

Dans ce rapport, nous nous attarderons tout particulièrement au troupeau de la rivière aux Feuilles, et ce, pour plusieurs raisons : (1) parce qu'il est le plus abondant, (2) parce qu'il soutient la chasse de subsistance d'une majorité de communautés inuites au Nunavik, (3) parce qu'il soutient à lui seul la chasse sportive depuis 2012 (MFFP) et (4) parce que le troupeau de la rivière George se maintient très largement hors des frontières du Québec depuis près d'une décennie (S. Côté, communication personnelle, 2016). Ainsi, les efforts de modélisation de niche climatique et l'élaboration des scénarios potentiels d'abondance seront limités au troupeau de la rivière aux Feuilles.

Il est à noter que comme le caribou est une espèce migratrice et que des réajustements de son aire de répartition pourraient causer des impacts sur certaines activités saisonnières telles que la chasse, les cartes de répartitions actuelles et potentielles futures de cette espèce seront réalisées pour chacune des saisons.

6.2 Méthodologie

Une approche de modélisation de niche climatique a été utilisée afin de répondre aux deux premiers objectifs du chapitre. Ce type de modélisation permet d'exprimer sous forme mathématique les relations qui unissent la répartition actuelle d'une espèce et les conditions climatiques dans lesquelles elle croit. Il permet par la suite de projeter dans le temps la répartition potentielle de l'espèce, en substituant les conditions actuelles à celles projetées par des scénarios climatiques (Pearson et Dawson 2003). Le détail de la méthodologie utilisée est présenté à la section 6.2.2 *Modélisation de niche climatique*. Plusieurs informations techniques ont été fournies afin de justifier notre approche, mais la compréhension de toutes ses subtilités n'est pas nécessaire puisque les résultats ont été interprétés pour le lecteur.

Les troisième et quatrième objectifs seront remplis en donnant un avis éclairé sur la situation future potentielle du caribou migrateur au Nunavik, avis documenté et étayé grâce à une revue de littérature exhaustive.

6.2.1 Données utilisées

6.2.1.1 Données biologiques

Les données relatives au caribou migrateur du troupeau de la rivière aux Feuilles proviennent d'un suivi télémétrique initié en 1994 par le gouvernement du Québec et dont les bases de données sont gérées par le MFFP. Au total, 384 individus ont été équipés d'un émetteur satellitaire entre juin 1991 et juillet 2016, conduisant à la collecte de 423 947 localisations géoréférencées (Taillon et al. 2016). Afin de dresser un tableau complet de l'impact potentiel des changements climatiques sur la répartition du caribou migrateur, nous avons quantifié ces impacts pour chacune des quatre saisons. Le découpage des saisons fut identique à celui retenu dans les travaux de modélisation de Sharma et al. (2009) et est défini comme suit :

- Hiver : janvier, février, mars et avril ;
- Printemps : mai et juin ;
- Été : juillet et août ;
- Automne : septembre, octobre, novembre et décembre.

Afin de diminuer l'autocorrélation spatiale, nous avons reporté, pour chacune des quatre saisons, les localisations géoréférencées sur une grille climatique de 10 km x 10 km de résolution, telle que défini dans la section 6.2.1.2. Ainsi, le caribou migrateur était considéré présent dans une cellule si au moins une

localisation géoréférencée se retrouvait à l'intérieur de celle-ci. Si aucune des 423 947 localisations ne s'y trouvait, le cervidé était considéré absent de la cellule.

Contrairement au caribou migrateur, la distribution spatiale et la quantité d'informations géoréférencées disponibles pour ses deux prédateurs rendent inadéquate l'utilisation de données d'observation pour l'effort de modélisation entrepris. Nous avons donc utilisé les cartes de répartition du loup gris et de l'ours noir disponibles sur la base de données de l'*International Union for Conservation of Nature* (IUCN 2016). Pour chacune des deux espèces, nous avons obtenu un polygone représentant leur aire de répartition, polygone tracé grâce à l'avis d'experts (loup gris : Mech et Boitani 2010, ours noir : Garshelis et al. 2016). Ces polygones ont ensuite été reportés sur la même grille climatique que celle utilisée pour le caribou migrateur. Les prédateurs étaient considérés présents dans toutes les cellules incluses dans leur polygone de répartition respectif, tandis qu'ils étaient considérés absents de toutes les autres.

6.2.1.2 Données climatiques

Période de référence (1981-2010)

La réanalyse CFSR a été retenue comme source de données pour le climat de référence, car elle est appropriée pour les analyses liant la faune au climat dans les régions où, comme le Nord québécois, les stations météorologiques sont en faible nombre (Charron 2015). Les grilles climatiques de cette réanalyse ont une résolution horizontale de 0,3° et nous ont permis d'obtenir, pour l'ensemble de la période considérée et pour chacune des mailles, les valeurs mensuelles de trois variables climatiques de base : (1) la température minimale de l'air, (2) la température maximale de l'air et (3) les précipitations totales. Afin d'obtenir une résolution plus fine (0,08333333°, soit 10 km x 10 km), les données de la réanalyse CFSR ont été interpolées par la méthode des voisins naturels, méthode d'interpolation simple, mais tridimensionnelle, prenant en compte l'altitude.

Une vingtaine de variables bioclimatiques ont ensuite été dérivées à partir des trois variables de base, nous permettant ainsi de décrire différents gradients climatiques, tels que les tendances annuelles, les saisonnalités et les facteurs environnementaux limitants pour les espèces. Afin d'éviter un surajustement des modèles de niche tout en maximisant la couverture des principaux axes climatiques et la pertinence biologique, seules six variables ont été retenues

pour les analyses subséquentes. L'ensemble de ces variables, présentées au tableau 6-1, constituait le meilleur compromis et permettait de conserver un maximum d'informations climatiques susceptibles d'expliquer la répartition des espèces d'intérêt.

Tableau 6-1 Variables bioclimatiques utilisées pour modéliser la répartition du troupeau de caribous migrateurs de la rivière aux Feuilles au Nunavik, Québec. Ces variables ont été dérivées à partir de trois variables de base : la température minimale et maximale de l'air et les précipitations totales.

Variables bioclimatiques	Unité de mesure	Définition et signification
Écart diurne moyen des températures	Degrés Celsius	Moyenne des écarts mensuels des températures.
Saisonnalité des températures	Degrés Celsius	Mesure de la variation des températures mensuelles au cours de l'année. Plus la valeur est grande, plus les températures fluctueront.
Température moyenne du trimestre le plus humide	Degrés Celsius	Mesure de la température moyenne au cours de la saison humide.
Précipitations du mois le plus humide	Millimètres	Cette information peut être utile lorsque la répartition de l'espèce est influencée par les conditions extrêmes de précipitation.
Saisonnalité des précipitations	-	Mesure de la variation des précipitations mensuelles au cours de l'année. Plus la valeur est grande, plus les précipitations fluctueront.
Degrés-jours de croissance	Degrés Celsius	Mesure qui représente l'accumulation de chaleur servant à estimer la durée d'un développement biologique. Nous avons utilisé 5 °C comme limite inférieure.

Horizons futurs (2041-2070 et 2071-2100)

Dans le cadre de cette section du rapport, nous nous sommes restreints à dix des quinze simulations climatiques listées dans le tableau 2-4, certaines des séries n'étant pas prêtes lors de la réalisation des analyses pour ce chapitre (voir * au bas du tableau 2-4). Bien que le RCP 8.5 soit moins représenté que dans les résultats présentés au chapitre 2, cet ensemble nous offre une bonne couverture de l'incertitude présente dans les changements projetés.

Après un post-traitement que nous ne détaillerons pas ici, nous avons obtenu les valeurs futures pour chacune des six variables bioclimatiques retenues (tableau 6-1), et ce, pour chacune des dix simulations climatiques. Nous avons ensuite construit deux horizons futurs : 2041-2070 et 2071-2100. Ainsi, les modèles de niche seront projetés dans le futur sous dix scénarios de changements climatiques pour chacun de ces deux horizons temporels futurs.

6.2.2 Modélisation de niche climatique

La modélisation de niche climatique suit quatre grandes étapes que nous détaillerons plus bas : (1) choisir les algorithmes qui relieront la répartition de l'espèce aux variables climatiques, (2) traduire, en termes mathématiques, la relation entre la répartition de l'espèce et le climat de la période de référence, (3) évaluer la performance du modèle mathématique et (4) projeter l'enveloppe climatique potentielle de l'espèce, sous chacun des scénarios climatiques retenus. Un schéma conceptuel est présenté à la figure 6-5.

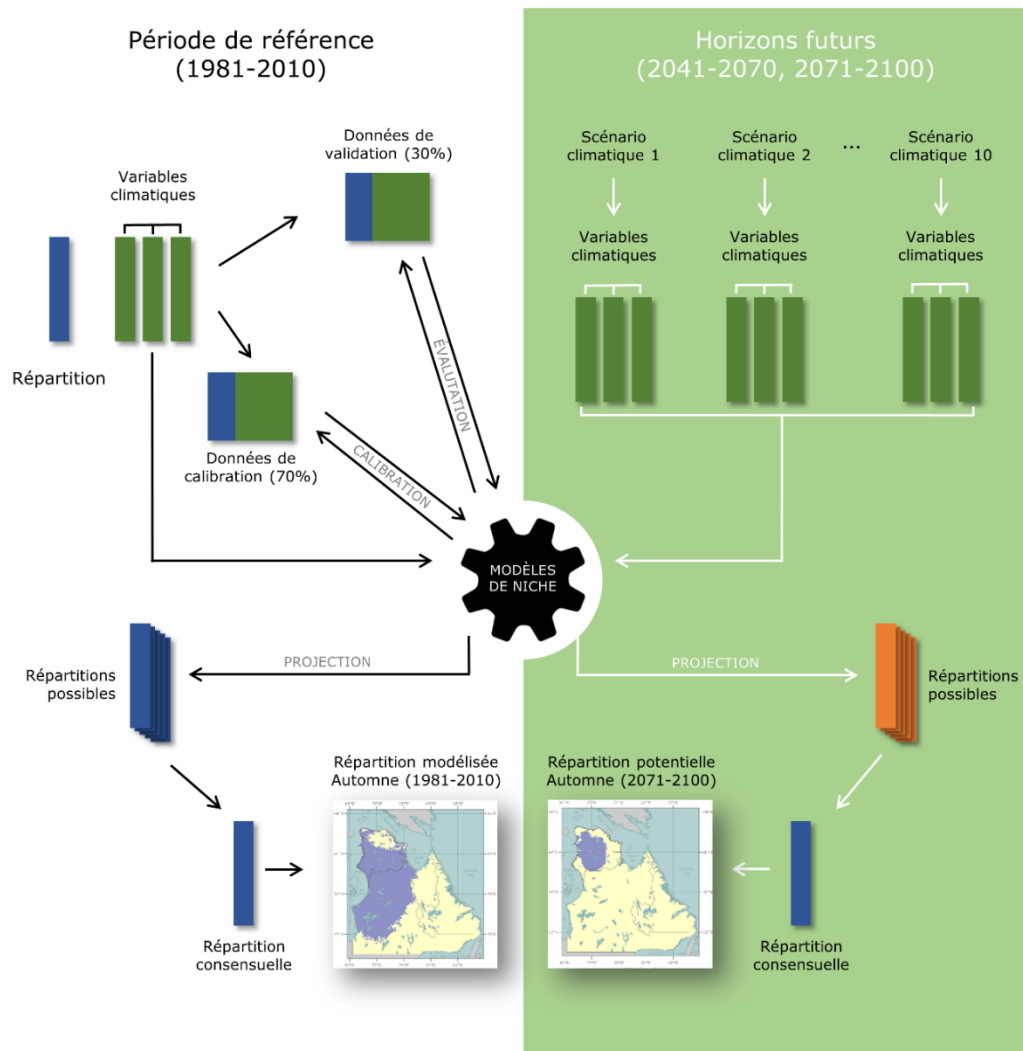


Figure 6-5 Schématisation des étapes nécessaires à l'élaboration d'un modèle de niche climatique et à la projection de la répartition potentielle future d'une espèce. Les étapes pour la modélisation future doivent être répétées pour chacun des scénarios climatiques (10), pour chacun des horizons (2) ainsi que pour chacune des saisons (4). Le schéma a été modifié à partir de celui présenté dans Berteaux et al. 2014.

Étape 1 : Le choix des algorithmes

Plusieurs algorithmes nous permettant d'établir un lien mathématique entre la répartition d'une espèce et un ensemble de variables climatiques existent, et chacun d'eux peut être classé dans l'une des trois grandes familles suivantes: les approches de régression, de classification et d'apprentissage. Comme aucun algorithme n'est systématiquement meilleur qu'un autre, il est recommandé de répéter les analyses en utilisant plusieurs méthodes, pour ensuite en tirer le résultat le plus consensuel (Pearson et al. 2006). Dans le cadre de notre étude, nous avons sélectionné 7 algorithmes, répartis de la façon suivante : deux méthodes de régression (modèle linéaire généralisé et modèle additif généralisé), deux approches de classification (analyse factorielle discriminante et arbre de classification) et trois techniques d'apprentissage automatique, ou *machine learning* (forêts aléatoires, réseaux de neurones artificiels et *generalized boosted models*). Chacune de ces méthodes sera donc utilisée pour calibrer les modèles de niche du caribou migrateur et ce, pour les 4 saisons.

Étape 2 : Traduire la relation répartition-climat en termes mathématiques

Cette traduction, qui est également appelé calibration du modèle de niche, consiste à décrire mathématiquement les liens qui unissent la répartition d'une espèce aux conditions climatiques en vigueur dans une période de référence. Elle permet ainsi de pondérer, sous forme de coefficients ou de déterminants, l'influence de chaque variable environnementale sur la répartition de l'espèce.

Déterminées statistiquement, ces relations sont établies à partir du jeu de données initial, c'est-à-dire de l'ensemble des données climatiques et de répartition à l'échelle de l'aire d'étude. Cependant, une partie de ce jeu de données doit être mis de côté afin d'évaluer la performance du modèle de niche (voir l'étape suivante pour plus de détails). Cette séparation aléatoire du jeu de données initial est effectuée 10 fois, nous permettant de calibrer 70 modèles pour le caribou migrateur et ce, pour chaque saison (7 algorithmes x 10 jeux de données). À partir de ces 70 modèles calibrés, nous projetons la répartition potentielle du cervidé pour la période de référence, conduisant à 70 répartitions potentielles différentes. Nous résumons ensuite, pour chaque saison, l'information portée par les 70 répartitions possibles en utilisant une moyenne pondérée avec les métriques de performance des modèles (voir l'étape suivante pour plus de détails).

Étape 3 : Évaluer la performance du modèle mathématique

L'évaluation de la performance du modèle de niche est primordiale, car elle permet d'évaluer la fidélité avec laquelle celui-ci reproduit la répartition observée de l'espèce. Idéalement, cette évaluation se ferait avec des données indépendantes de celles ayant servi à sa calibration, mais celles-ci sont rarement disponibles. Comme dans le projet CC-Bio (Berteaux et al. 2014), nous utiliserons donc une technique alternative basée sur le rééchantillonnage, qui sépare aléatoirement le jeu de données initiales en deux parties : un jeu de calibration qui comprend 70% des données et un jeu de validation, comprenant le 30% restant. Tel que mentionnée à l'étape précédente, cette séparation aléatoire du jeu de données initial a été répétée dix fois.

Les performances prédictives du modèle sont ensuite quantifiées en comparant les répartitions modélisées pour la période de référence aux répartitions observées à l'aide de deux métriques : le *true skill statistic* (TSS) et le coefficient Kappa.

Étape 4 : Projeter l'enveloppe climatique potentielle

La dernière étape de la modélisation de niche climatique consiste à substituer les valeurs des variables climatiques de la période de référence par celles des différents scénarios climatiques retenus. Ainsi, nous avons projeté la répartition potentielle du caribou migrateur du TRF sous 10 scénarios de changements climatiques pour chacun des 70 modèles calibrés, produisant 700 répartitions futures potentielles pour un horizon temporel et une saison donnés. Comme pour la modélisation de la répartition actuelle de cette espèce, nous avons résumé l'information portée par les projections potentielles en utilisant une moyenne pondérée, mais en agrégeant l'information au niveau des scénarios de forçage radiatif (RCP 4.5 et 8.5). Ainsi, pour un horizon futur donné, deux projections potentielles moyennes ont été générées, une pour le scénario inférieur et une autre pour le scénario supérieur. Toutes les étapes de modélisation ont été réalisées grâce au logiciel libre d'accès R.

Les mêmes étapes ont été réalisées afin de modéliser la répartition de l'ours noir pour la période de référence ainsi que sur les deux horizons futurs. Cependant, les données de répartition ne sont pas issues des localisations télémétriques comme pour le caribou migrateur, mais bien du polygone représentant son aire de répartition, tel que mentionné dans la section 6.2.1.1. La répartition du loup gris pour la période de référence et les horizons futurs n'ont pu être modélisées, car cette espèce est présente sur l'ensemble du

territoire couvert par notre analyse. Nous supposons donc que cette espèce pourrait être présente sur l'ensemble du territoire jusqu'en 2100, aussi bien sous le scénario inférieur que sous le scénario supérieur.

6.2.3 Portée et limites d'interprétation de la modélisation de niche climatique

Bien qu'elle ne soit pas une science exacte, la modélisation écologique est un outil essentiel pour éclairer de nombreuses décisions, notamment en ce qui a trait à la conservation (Berteaux et al. 2014). Elle comporte plusieurs avantages : elle requière peu d'informations sur les espèces modélisées, est applicable à n'importe quelle espèce et permet une représentation visuelle concrète des effets potentiels des changements climatiques sur la biodiversité. En raison de la vaste étendue de son territoire, de la difficulté d'y accéder et du désir politique de développer son potentiel économique tout en assurant une conservation adéquate de ses écosystèmes, le Nunavik est tout à fait désigné pour ce type d'analyse.

Les modèles de niche climatique s'appuient toutefois sur certaines prémisses qu'il faut connaître et comprendre afin d'éviter les fausses interprétations. Tout d'abord, ils supposent que les espèces soient en équilibre avec les conditions climatiques de la période de référence, c'est-à-dire qu'elles occupent tous les habitats qui leur sont favorables et sont absentes de ceux qui leur sont défavorables (Guisan et Theurillat 2000). Cette prémisse n'est pas respectée dans certains cas, notamment pour les espèces introduites qui sont en phase de colonisation (par exemple, le bœuf musqué au Nunavik; voir la section 6.5.2 pour plus de détails). De plus, ces modèles supposent que les espèces n'évolueront pas durant la période couverte par projection (Berteaux et al. 2014). Ceci est généralement vrai, car la vitesse d'évolution de la plupart des espèces est suffisamment lente pour ne pas être problématique pour l'échelle temporelle considérée. Pour terminer, la répartition potentielle future prédite par la modélisation de niche climatique doit être interprétée comme étant l'ensemble des conditions climatiques qui seront favorables à une espèce donnée. Telle que nous l'avons utilisée, la modélisation de niche ne tient pas compte des capacités de dispersion des taxons, ni même des interactions biotiques qui pourront venir moduler la réponse de chaque espèce face aux changements des conditions climatiques. Des approches de modélisations plus près des réalités écologiques existent et d'autres sont en phase de conception, mais nous ne les utiliserons pas ici.

6.3 Modélisation des changements potentiels pour les horizons futurs

6.3.1 Répartitions actuelle et potentielle future du caribou migrateur du troupeau de la rivière aux Feuilles

La modélisation de la répartition du TRF pour la période de référence est représentée par saison à la figure 6-6, colonne de gauche, et concorde avec les résultats obtenus par Sharma et al. (2009). Les métriques de performance des différents modèles nous indiquent que ces derniers sont excellents pour toutes les saisons, sauf pour l'hiver où les performances sont considérées comme étant bonnes (tableau 6-2).

Les projections futures montrent toutefois quelques aberrations pour l'hiver et l'été, malgré la bonne performance des modèles. Ces aberrations, présentes dans les deux horizons futurs et qui se traduisent par une répartition disjointe du troupeau de la rivière aux Feuilles sont probablement dues au fait que plus d'une variable conditionne le climat favorable à l'espèce (voir le tableau 6-3 pour l'importance des différentes variables dans la modélisation). Ainsi, les conditions climatiques favorables à l'espèce pour ces saisons ne suivront pas l'évolution d'un gradient (une seule variable), mais celle d'une combinaison de gradients.

Tableau 6-2 Performance prédictive des modèles pour chacune des saisons selon deux métriques : le KAPPA et le *true skill statistic* (TSS). Les valeurs et métriques sont indiquées en gras lorsqu'elles atteignent le plus haut niveau de performance (> 0,80).

Saison	Métrique	Moyenne	Écart-type
Hiver	KAPPA	0,653	0,031
	TSS	0,717	0,029
Printemps	KAPPA	0,785	0,026
	TSS	0,837	0,017
Été	KAPPA	0,899	0,017
	TSS	0,927	0,013
Automne	KAPPA	0,816	0,027
	TSS	0,832	0,025

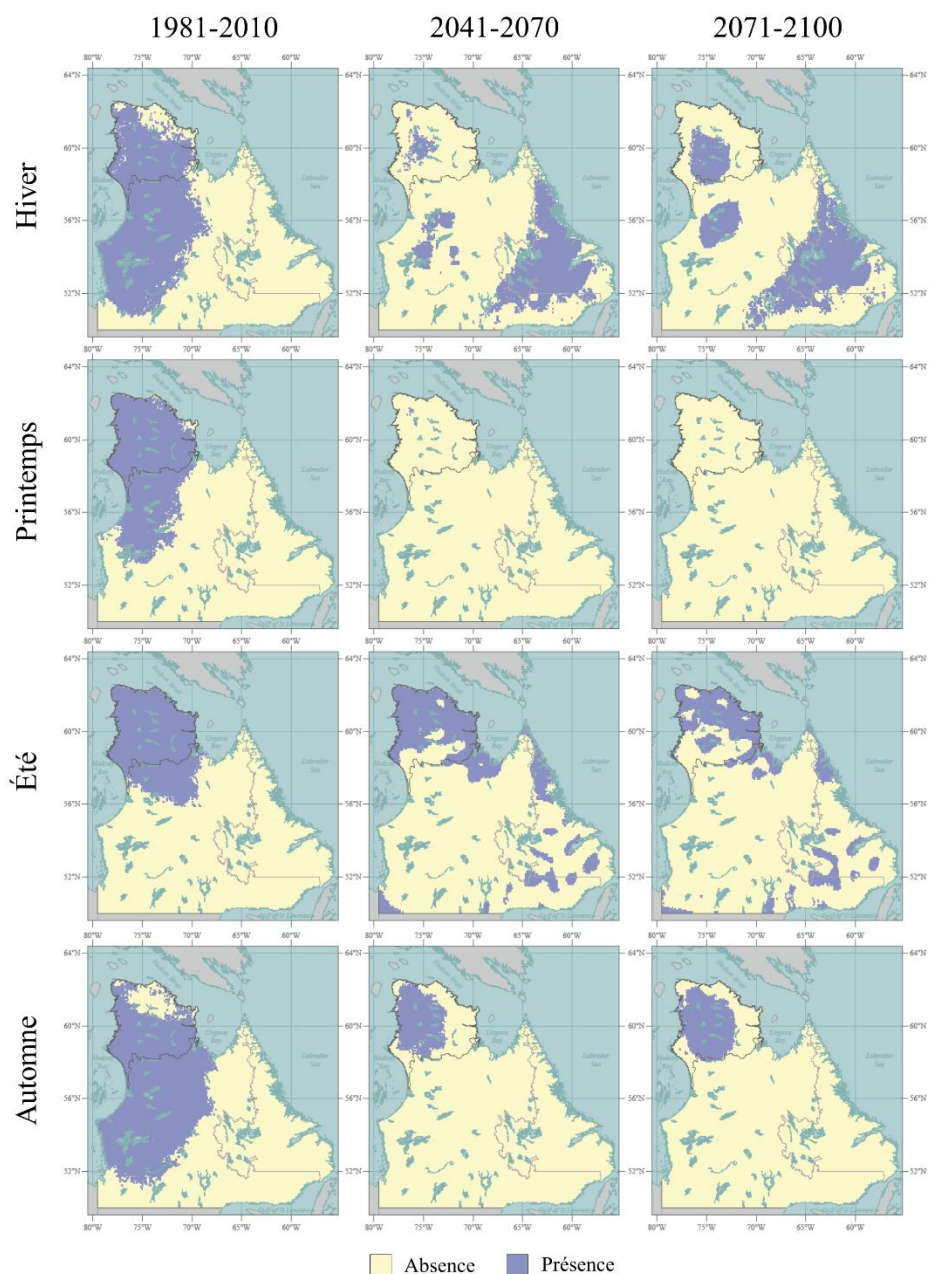


Figure 6-6 Modélisation de la répartition pour la période de référence (à gauche) et potentielle future du caribou du troupeau de la rivière aux Feuilles pour les horizons 2041-2070 (au centre) et 2071-2100 (à droite), en fonction de la saison. Les projections présentées ici sont basées sur les résultats obtenus en utilisant le scénario optimiste d'émission de gaz à effets de serre (RCP 4.5).

Ceci étant dit, l'exercice de modélisation nous suggère que l'enveloppe climatique favorable aux caribous migrants devrait être réduite en taille dans les prochaines décennies, et ce, pour toutes les saisons (Fig. 6-6, colonnes du centre et de droite). Ceci est contraire aux résultats obtenus par Sharma et al.

(2009), et pourrait s'expliquer par des différences méthodologiques entre nos deux études : les périodes de référence ne sont pas les mêmes (1981-2010 vs 1961-1990) et l'élaboration de nos modèles ne s'est faite qu'à l'aide de variables climatiques, et non pas par une combinaison de variables climatiques et environnementales. La forte contraction de l'enveloppe climatique favorable à l'espèce au printemps et à l'automne (Fig. 6-6) suggère que ces périodes critiques pourraient devenir plus contraignantes au courant du 21^e siècle pour le caribou migrateur du TRF. Déjà connue comme un facteur limitant pour ce dernier (Le Corre 2016), la fonte des neiges de plus en plus hâtive au printemps pourrait devenir une embuche importante lors de la migration printanière. Nonobstant les aberrations, l'enveloppe des conditions climatiques favorables à l'espèce en été migre vers le nord jusqu'en 2100, ce qui pourrait exercer une pression supplémentaire sur l'effectif du troupeau de la rivière aux Feuilles. En hiver, les projections futures suggèrent que les conditions climatiques favorables au caribou migrateur du TRF se déplaceront vers l'est de la province et qu'une très faible proportion de l'aire actuellement occupée sera propice à cette espèce dans les deux horizons futurs considérés.

Nous rappelons que l'exercice de modélisation réalisé ici nous informe sur l'ensemble des conditions climatiques qui seront favorables à une espèce donnée dans un climat futur, basé sur les corrélations entre la répartition géographique de cette dernière et des conditions climatiques dans la période de référence. La modélisation de niche suggère donc que l'enveloppe climatique favorable au caribou migrateur du TRF sera réduite en taille pour toutes les saisons pour les horizons 2041-2070 et 2071-2100, mais dresse un portrait incomplet de la répartition réelle du troupeau dans les prochaines décennies. Pour ce faire, un ensemble de facteurs environnementaux et biologiques doivent être considérés, tel que la disponibilité future des ressources et des interactions du caribou avec d'autres espèces. L'aire occupée par une espèce grégaire comme le caribou migrateur dépend également de l'abondance du troupeau, aspect que nous aborderont dans la prochaine section.

Tableau 6-3 Importance des différentes variables climatiques pour la modélisation de niche de chacune des saisons. Plus l'importance d'une variable climatique s'approche de 1, plus le poids de cette dernière sera important dans la modélisation de l'aire de répartition du caribou migrateur de la rivière aux Feuilles. La saisonnalité fait référence à la variation des précipitations et des températures mensuelles au cours de l'année. Plus la valeur est grande, plus les précipitations ou les températures fluctueront. L'écart diurne moyen des températures correspond à la moyenne des écarts mensuels des températures, tandis que les degrés-jours de croissance sont une mesure représentant l'accumulation de chaleur servant à estimer la durée d'un développement biologique.

Saison	Variable climatique	Importance	Écart-type
Hiver	Précipitations du mois le plus humide	0,127	0,077
	Saisonnalité des précipitations	0,637	0,125
	Écart diurne moyen des températures	0,120	0,107
	Degrés-jours de croissance	0,431	0,105
	Saisonnalité des températures	0,269	0,172
	Température moyenne du trimestre le plus humide	0,091	0,063
Printemps	Précipitations du mois le plus humide	0,054	0,057
	Saisonnalité des précipitations	0,749	0,163
	Écart diurne moyen des températures	0,127	0,105
	Degrés-jours de croissance	0,113	0,109
	Saisonnalité des températures	0,123	0,082
	Température moyenne du trimestre le plus humide	0,059	0,048
Été	Précipitations du mois le plus humide	0,310	0,179
	Saisonnalité des précipitations	0,336	0,113
	Écart diurne moyen des températures	0,018	0,024
	Degrés-jours de croissance	0,208	0,211
	Saisonnalité des températures	0,080	0,061
	Température moyenne du trimestre le plus humide	0,041	0,027
Automne	Précipitations du mois le plus humide	0,046	0,017
	Saisonnalité des précipitations	0,614	0,130
	Écart diurne moyen des températures	0,069	0,050
	Degrés-jours de croissance	0,160	0,037
	Saisonnalité des températures	0,130	0,073
	Température moyenne du trimestre le plus humide	0,113	0,077

6.3.2 Abondance potentielle future du caribou migrateur du TRF : présentation de différents scénarios possibles

Les scénarios présentés ici illustrent trois situations arbitraires, mais non moins réalistes de l'abondance du caribou migrateur du TRF jusqu'en 2100 (Fig. 6-7): les deux premiers sont basés sur la prémisse que les effectifs varieraient selon un cycle naturel de 60 et 80 ans, respectivement, tandis que le troisième est basé sur une régulation hypothétique de l'abondance par la récolte pendant la croissance du cycle de 60 ans. Ainsi, le scénario « 60 ans » prédit que le TRF retournerait à un maximum d'abondance à l'horizon 2041-2070, tandis que ses effectifs seraient en décroissance à l'horizon 2071-2100. Le scénario « 80 ans » prédit que le TRF se maintiendrait à un minimum d'abondance durant la période 2041-2070, tandis qu'il se trouverait dans une période de forte abondance à l'horizon 2071-2100. Le scénario « récolte » permettrait quant à

lui une certaine stabilisation de l'abondance du troupeau à partir de l'horizon 2041-2070.

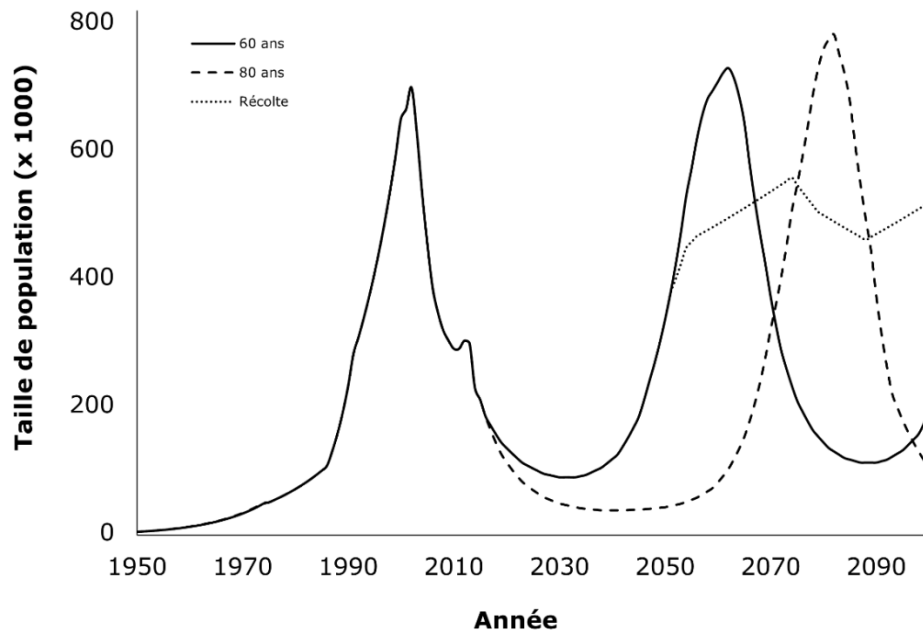


Figure 6-7 Scénarios potentiels d'abondance du troupeau de caribous migrants de la rivière aux Feuilles. Les scénarios 60 et 80 ans correspondent à la longueur des cycles d'abondance, tandis que le scénario récolte correspond à une régulation hypothétique de l'abondance par la récolte pendant la période de croissance du cycle de 60 ans.

Ces variations dans la taille du troupeau de la rivière aux Feuilles entraîneront vraisemblablement une variation de la superficie occupée par son aire de répartition annuelle, et ce, indépendamment des conditions climatiques (Bergerud et al. 2008). Le lien très fort entre taille de population et superficie de l'aire de répartition chez ce grand ongulé grégaire souligne la difficulté de modéliser adéquatement l'utilisation future du territoire pour de grands troupeaux migrants (Sharma et al. 2009).

Il est important de souligner que les scénarios présentés sont basés sur des cycles naturels d'abondance, applicables à des populations ayant une régulation de type densité-dépendante. Ils ne tiennent pas compte des facteurs biotiques et abiotiques qui pourraient changer au cours des prochaines décennies. Il faut donc les interpréter comme un outil de référence, à partir duquel la trajectoire pourrait être modulée par différentes variables environnementales ou interactions biotiques telles que la prédation et la

compétition. Ils représentent néanmoins l'hypothèse dominante qui stipule que les effectifs des troupeaux de caribous migrateurs suivraient des cycles de quelques décennies et que la dégradation des habitats d'estivage serait l'un des facteurs expliquant ces variations naturelles (Messier et al. 1988, Taillon et al. 2016).

6.3.3 Répartitions actuelle et potentielle future du loup gris et de l'ours noir

6.3.3.1 Le loup gris

Espèce polyvalente, le loup gris est présent dans l'ensemble du monde circumpolaire où il n'a pas été chassé jusqu'à son extinction. Au Québec, on le retrouve sur tout le territoire au nord du fleuve St-Laurent et est donc présent partout au Nunavik. Tel que mentionné dans la section 6.2.2., la modélisation de niche prévoit que l'ensemble du territoire que couvre le Nunavik profitera de conditions climatiques favorables à cette espèce jusqu'en 2100, peu importe le scénario considéré (optimiste ou pessimiste). Les résultats cartographiques ne seront donc pas présentés ici.

Peu d'informations sont disponibles sur la dynamique de population du loup gris au Nunavik, rendant des prédictions sur l'abondance de cette espèce dans un climat futur ardues. Cependant, le loup est connu pour sa capacité à suivre le caribou lors de sa migration (MFFP et Caribou Ungava, données non publiées), lui permettant ainsi de maintenir une accessibilité à une source de nourriture tout au long de l'année. De plus, l'arrivée d'une nouvelle proie dans l'écosystème (le bœuf musqué; voir la section 6.5.2 pour plus de détails) pourrait être bénéfique à la population de loup du Nunavik, en favorisant notamment une meilleure survie des individus. Les effets positifs de l'arrivée du bœuf musqué demeurent encore incertains, car sa population est à ce jour relativement faible. Cependant, l'augmentation importante de celle-ci depuis son introduction (Jean et al. 2006) ainsi que la grande abondance de jeunes laissent croire que la population de bœuf musqué du Nunavik demeurera en croissance dans les prochaines décennies. Des études sont en cours afin de déterminer l'importance relative des différentes espèces consommées par le loup (M. Bonin et S. Côté, communication personnelle, 2017). Les résultats obtenus nous permettront de mieux comprendre l'apport du bœuf musqué dans l'alimentation du loup ainsi que de prédire de façon plus juste l'influence d'une augmentation probable de la population de ce bovidé sur la croissance de cet important prédateur du caribou.

6.3.3.2 *L'ours noir*

Dans la période de référence (1981-2010), l'ours noir est présent dans la moitié méridionale du Nunavik (Fig. 6-8). La modélisation de niche climatique prédit que l'enveloppe des conditions favorables à la présence de cette espèce se déplacera vers le nord, et atteindra la pointe septentrionale du Québec à l'horizon 2071-2100 sous le scénario pessimiste (RCP 8.5; Fig. 6-8). Contrairement à ce qui est généralement observé, cet exercice de modélisation semble sous-estimer la migration nordique de l'ours noir au Nunavik et cela, même en ne considérant que le scénario pessimiste. En effet, les habitants des villages nordiques font de plus en plus mention de la présence de cette espèce dans la péninsule de l'Ungava. Des entrevues réalisées entre 2007 et 2009 recensent des observations d'ours noir jusqu'à Kangiqsujuaq, village situé au 61^e parallèle nord (Cuerrier et al. 2015), tandis que cette espèce aurait atteint le village de Salluit situé sur pointe de la péninsule depuis environ 5 ans (S.D. Côté, communication personnelle, 2017). En raison du peu d'informations sur la répartition de cette espèce au Nunavik, notre exercice de modélisation s'est basé sur l'information géographique disponible par l'entremise de l'IUCN (2016). Quoique très utile, cette information demeure une représentation grossière de la répartition de l'espèce et peut sous-estimer son aire de répartition réelle, à plus forte raison dans une région subissant de grands changements dans son régime climatique comme le Nunavik.

Cependant, le déplacement vers le nord de l'aire de répartition potentielle de l'ours noir prédit par la modélisation de niche climatique ainsi que l'observation de plus en plus fréquente de cette espèce aux confins nordiques du Québec suggèrent tous deux que cette espèce devrait coloniser davantage cette région dans les décennies à venir. Des observations de tanières dans la péninsule de l'Ungava suggèrent que l'ours noir y passe maintenant l'hiver, faisant passer le statut de cette espèce de simple visiteur estival à une espèce résidente (Taillon et al. 2016). De plus, les mentions de plus en plus fréquentes suggèrent que la population d'ours noirs serait en croissance au Nunavik, phénomène qui devrait s'accroître ou du moins se maintenir avec le changement des conditions climatiques projetées pour la région dans les prochaines décennies (voir chapitre 2 sur les scénarios climatiques).

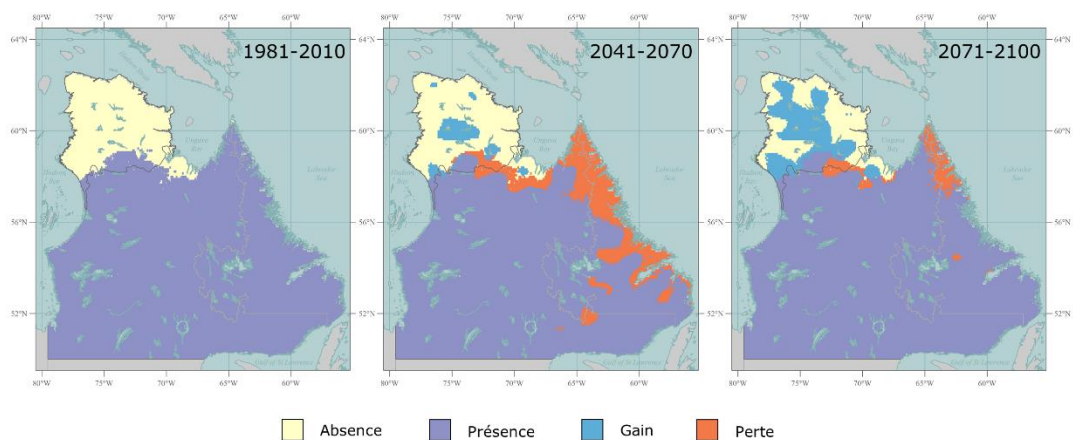


Figure 6-8 Modélisation de la répartition actuelle (1981-2010) et potentielle future (2041-2070 et 2071-2100) de l'ours noir au Québec nordique, sous le scénario pessimiste (RCP 8.5). Les gains (bleu) et les pertes (orange) dans l'aire de répartition de l'ours noir pour les horizons futurs sont exprimés en fonction de la période de référence.

6.4 Impacts indirects des changements climatiques sur la répartition et l'abondance potentielles du caribou migrateur

La répartition et l'abondance des espèces animales et végétales sont intimement liées aux conditions climatiques, et le caribou migrateur n'y fait pas exception. Nous présentons ici quelques impacts directs et indirects des changements possibles que connaîtra le Nunavik au cours du 21^e siècle sur cet ongulé.

6.4.1 Disponibilité des ressources estivales

Certaines espèces consommées par le caribou migrateur dans son aire d'estivage ont récemment profité d'un adoucissement des conditions climatiques (Ropars et al. 2015), permettant de ce fait à l'ongulé de consommer une ressource estivale plus abondante. C'est notamment le cas du bouleau glanduleux, dont l'expansion a été observée dans les dernières décennies au Nunavik (TRG : Tremblay et al. 2012, TRF : Ropars et Boudreau 2012), mais également celui de diverses espèces arbustives à l'échelle circumpolaire (Myers-Smith et al. 2011; voir également la section 5.3.3 *La toundra et les arbustes* pour plus de détails). Les avantages qu'en retireront les caribous dépendront cependant de certaines conditions : (1) que l'allongement de la saison de croissance ne se traduise pas par une désynchronisation entre le maximum de production végétale et l'arrivée du caribou migrateur sur son aire d'estivage, (2) que la meilleure performance des espèces végétales consommées par le caribou se produise effectivement dans les habitats utilisés par ce dernier et (3), que les effets négatifs du broutement et du piétinement ne viennent pas masquer les effets positifs d'une augmentation de la température pour ces espèces végétales.

À leur arrivée sur leur aire d'estivage, les caribous migrants sont en déficit protéique en raison de leur régime alimentaire hivernal dominé par les lichens (Gerhart et al. 1996). Ils doivent donc compter sur la consommation de feuilles nouvellement produites, riches en protéines, pour retrouver une balance protéique positive. Ceci est particulièrement vrai pour les femelles qui allaitent, car leur faon dépend uniquement du lait maternel pour combler leurs besoins caloriques (Cebrian et al. 2008, Taillon et al. 2013). Comme la qualité des feuilles décroît rapidement avec la maturation des plantes (Saucier 2014) et qu'un devancement de la période de croissance est à prévoir avec les

changements climatiques, il est primordial pour le caribou migrateur de maintenir une synchronie entre son arrivée sur son aire d'estivage et le maximum de production végétale. Une étude récente semble démontrer que les caribous migrants des deux troupeaux du Nunavik ont une certaine flexibilité quant à la date de début de leur migration printanière (Le Corre 2016), comme c'est le cas pour plusieurs autres espèces migratrices (Tottrup et al. 2006, Monteith et al. 2011, Altwegg et al. 2012). Comme le début de la saison de croissance végétale devrait devenir de plus en plus hâtif au courant du 21^e siècle, cette flexibilité devra se maintenir chez le caribou migrateur afin d'éviter une désynchronie.

Même s'il s'agit d'un phénomène circumpolaire, l'expansion du couvert arbustif est hétérogène à l'échelle du paysage (Tape et al. 2006, Ropars et Boudreau 2012). Il est donc probable que le caribou migrateur ne profite pas pleinement de cette reprise végétale. Cette dernière semble d'ailleurs être maximale à l'écotone forêt boréale-toundra (McManus et al. 2012), région où des études dendrochronologiques ont démontré que de larges pans ont été peu fréquentés par le caribou migrateur du TRF dans les dernières décennies (Morneau et Payette 1998, A. Truchon-Savard et S. Boudreau, communication personnelle, 2017). Par contre, une importante arbustification dans l'aire d'estivage historique du TRG pourrait permettre aux caribous de ce troupeau de profiter de ressources abondantes dans les prochaines années. Le broutement et le piétinement des caribous migrants peuvent aussi limiter la croissance des espèces arbustives consommées, comme le suggère de nombreuses études en Europe (p. ex. Olofsson et al. 2009) et en Amérique du Nord (p. ex. Zamin et Grogan 2013). L'effet positif d'un adoucissement des températures estivales en termes de croissance végétal pourrait donc être tempéré par une augmentation des contraintes causées par une augmentation de l'herbivore. Pour une discussion plus détaillée des deux points abordés dans ce dernier paragraphe, prière de vous référer à la section 5.3.5 *Les grands herbivores : modérateurs de la réponse arbustive?*

6.4.2 Neige et patrons de dégel et d'englacement des cours d'eau

La ressource alimentaire principale du caribou migrateur sur son aire d'hivernage est le lichen, qu'il soit terricole ou arboricole (Messier et Huot 1985). Les changements prévus dans le régime climatique du Nunavik pourraient entraîner une plus grande récurrence des redoux hivernaux, des événements de pluie sur neige et des épisodes de verglas dans les prochaines décennies. En créant une couche de neige compacte qui la rend difficile à

creuser, tous ces phénomènes climatiques pourraient limiter l'accès du caribou migrateur à sa principale source de nourriture hivernale (Messier et Huot 1985). Le dégel hâtif et l'englacement tardif des cours d'eau prévus dans les prochaines décennies modifieront vraisemblablement les trajets et la phénologie migratoires du caribou. De plus, les conditions rencontrées lors de la migration pourraient engendrer des coûts de déplacement supplémentaires, notamment dans le cas d'une fonte hâtive de la neige au sol (Le Corre 2016). Déjà en carence protéique au printemps, les femelles pourraient donc subir de forts préjudices en termes de condition physique, influençant potentiellement leur survie, leur productivité et la survie des faons.

6.4.3 Prévalence des insectes piqueurs et parasites

La prévalence des insectes piqueurs et des parasites du caribou migrateur pourrait augmenter avec les changements climatiques (Witter et al. 2012a, 2012b, Simard et al. 2016). Plusieurs communautés inuites font d'ailleurs déjà mention d'une augmentation du nombre d'insectes piqueurs au Nunavik (Communities of Ivujivik, Puvirnituq and Kangiqsujaq 2005). En se regroupant en grandes hardes, le caribou migrateur diminue le harcèlement fait par les moustiques (Diptera, Culicidae) et les mouches noires (Diptera, Simuliidae), les principaux insectes piqueurs de la région (Toupin et al. 1996, Bergerud et al. 2008). Mais, malgré cette stratégie, l'augmentation du nombre d'insectes et l'allongement de la saison d'infestation et de dérangement (Witter et al. 2012a, 2012b) pourraient avoir un effet négatif sur la condition physique du caribou et sur la survie de faons, notamment en réduisant le temps passé en alimentation.

Bien que les effets des espèces parasites ne soient généralement pas délétères pour le caribou migrateur (Fréchette 1986), ce dernier pourrait être davantage susceptible aux nouvelles espèces pour lesquelles il n'a pas encore développé de défense immunitaire (Taillon et al. 2016). L'adoucissement des températures ainsi que la progression nordique de l'aire de répartition de l'orignal et du cerf de Virginie pourraient en effet permettre à de nouvelles espèces parasites de gagner les régions occupées par le caribou migrateur. Parmi ces espèces, le ver des méninges (*Parelaphostrongylus tenuis*) et le prion responsable de la maladie débilante chronique chez les cervidés, ont des effets mortels chez leurs hôtes (Taillon et al. 2016) et pourraient devenir une menace pour le caribou migrateur.

6.5 Autres facteurs influençant la répartition et l'abondance futures du caribou migrateur

6.5.1 Activités humaines

L'expansion des zones occupées par l'homme ainsi que les activités industrielles qui en découlent ont été ciblées comme l'une des principales menaces à la pérennité des populations de caribous migrants (Festa-Bianchet et al. 2011). Parmi ces derniers, les femelles adultes et les faons sont particulièrement sensibles au dérangement par les activités anthropiques, surtout sur l'aire de mise bas (Wolfe et al. 2000). Les autorités québécoises ont vu l'importance de protéger ces régions, mais l'efficacité de cette mesure demeure mitigée en raison du déplacement annuel important de l'aire utilisée par les femelles pour mettre leur faon au monde (Taillon et al. 2012a). Dans le cadre du Plan Nord, il devient primordial de protéger les zones sensibles pour le caribou migrateur afin d'en assurer sa pérennité. Les sites miniers, hydroélectriques et autres devraient donc être aménagés afin de minimiser leurs impacts sur cette espèce migratrice.

Grâce à l'accès à des engins motorisés performants et à l'utilisation d'appareils de repérage et de télécommunication, les chasses de subsistance et sportive sont devenues plus faciles et plus efficaces au cours des dernières années (Adamczewski et al. 2009, Nesbitt et Adamczewski 2009). Il est à noter cependant que la chasse sportive au caribou migrateur du troupeau de la rivière George est fermée depuis 2012, et que celle du TRF le sera également à partir du 1^{er} février 2018 (MFFP, communiqué de presse, 21 décembre 2016). Malgré ces restrictions, une chasse de subsistance plus efficace et une population inuite en croissance (Institut de la statistique du Québec 2016) demeurent des menaces supplémentaires pour les populations de caribous migrants, et doivent être prises en compte dans les plans de gestion.

6.5.2 Le bœuf musqué : une réelle menace pour le caribou?

Historiquement absent du Nunavik (Jean et al. 2006), le bœuf musqué (*Ovibos moschatus*) a été introduit en 1967 dans le but d'en faire l'élevage, puis relâché progressivement entre 1973 et 1978 (Le Hénaff 1986). Initialement confiné aux environs des villages nordiques de Kuujuaq et de Tasiujaq, le bœuf musqué colonise maintenant l'essentiel de la côte de la péninsule de l'Ungava et les rives de la rivière aux Mélézes, chevauchant ainsi l'aire de répartition du caribou migrateur du TRF (Fig. 6-9; MFFP, données non

publiées). Les 55 bœufs musqués initialement relâchés semblent s'être particulièrement bien adaptés aux conditions du Nunavik : la population du bovidé a atteint 533 individus en 1991, puis 1400 en 2003 (Jean et al. 2006). Aucun inventaire officiel n'a été fait depuis, mais tout porte à croire que la population de bœuf musqué au Nunavik continue à croître.

Bien que nous détenions très peu d'information sur les interactions entre le caribou migrateur et le bœuf musqué au Nunavik, l'arrivée récente de ce dernier soulève des craintes au sein des communautés inuites. Celles-ci s'inquiètent du fait que le bovidé pourrait évincer le caribou migrateur de certains secteurs sensibles (Comité conjoint de chasse, de pêche et de piégeage 2012). L'expansion récente du bœuf musqué pourrait effectivement entraîner un plus grand chevauchement des aires de répartition de ces deux grands herbivores (Fig. 6-9). De plus, des observations sur le terrain suggèrent que le taux de recrutement chez le bœuf musqué pourrait permettre à cette population de maintenir une bonne croissance dans les prochaines décennies (S.D. Côté, communication personnelle, 2016), corroborant le potentiel d'accroissement élevé du bovidé rapporté par Jean et Rivard (2005). Grand herbivore particulièrement bien adapté aux conditions climatiques rigoureuses de l'Arctique, le bœuf musqué devrait cependant lui aussi subir les contre coups du réchauffement climatique à venir. La modélisation de niche ne sera pas ici un outil approprié afin de prédire l'étendue des conditions favorables au bovidé, car l'une de ses prémices est enfreinte dans ce cas de figure : introduit il y a seulement quelques dizaines d'années, le bœuf musqué pourrait ne pas occuper toutes les niches qui lui sont favorables. Cette situation mènerait à une sous-estimation de l'étendue de son enveloppe climatique actuelle et potentielle future.

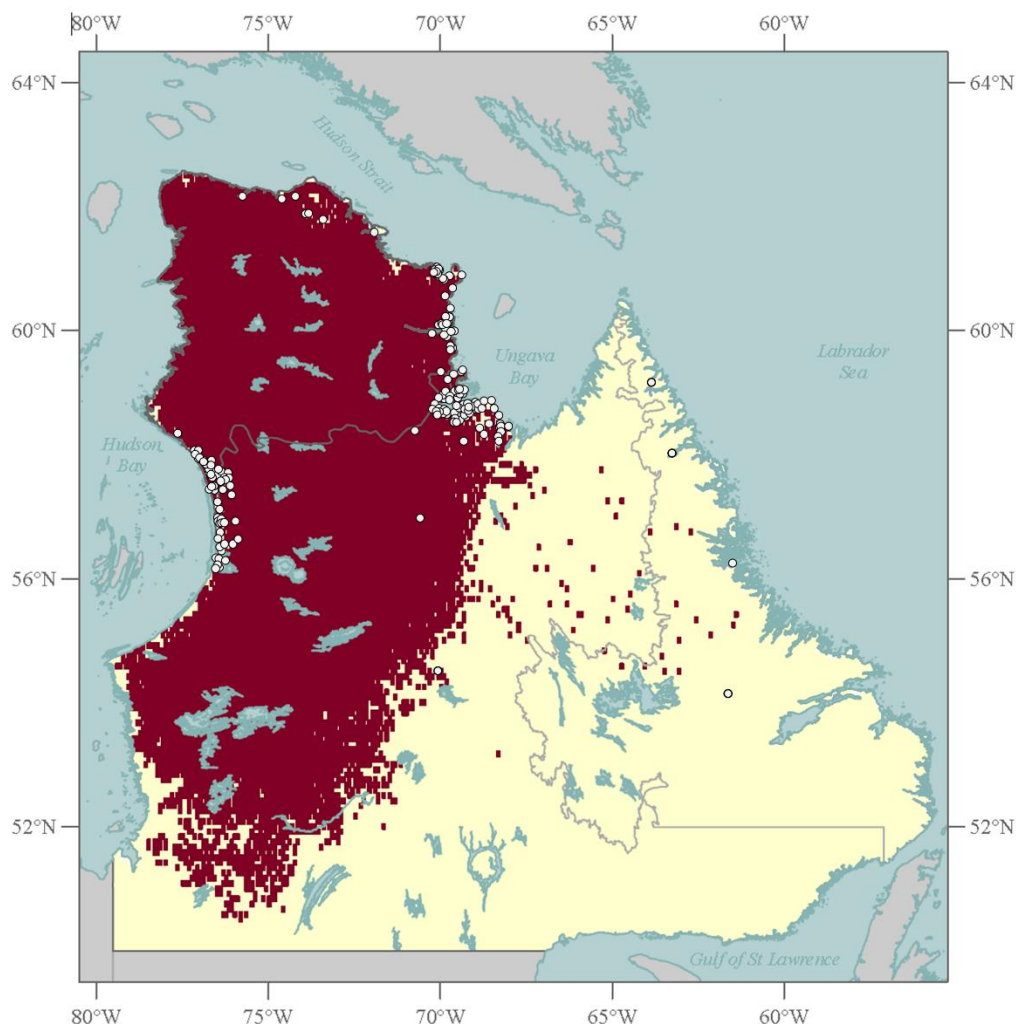


Figure 6-9 Chevauchement entre les aires de répartition du bœuf musqué et du caribou migrateur du troupeau de la rivière aux Feuilles. Les rectangles rouges correspondent aux localisations annuelles du caribou migrateur reportées sur une grille de 10 km x 10 km, tandis que les cercles blancs correspondent à des données d'observation de groupes de bœufs musqués (nombre d'individus par groupes, lorsqu'indiqué : 1 à 60). Toutes les données sont issues du suivi télémétrique effectué par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs en cours depuis 1994 pour le caribou migrateur, tandis que les données d'observations du bœuf musqué proviennent de différentes sources, mais sont colligées par le même ministère.

Le bœuf musqué joue un rôle écologique similaire à celui du caribou : il partage les mêmes prédateurs et se nourrit, du moins en partie, des mêmes ressources. Les interactions potentielles entre les deux espèces pourraient donc être de deux types : une compétition directe pour les ressources et une compétition dite apparente. Aucune étude sur la compétition entre les espèces n'a été réalisée à ce jour au Nunavik, mais certaines études canadiennes

suggèrent que la compétition pour les ressources alimentaires estivales serait relativement faible entre les deux espèces, puisque leurs préférences d'habitat et de diète diffèrent (Wilkinson et al. 1976, White 1983). La situation pourrait cependant être différente pour les ressources hivernales, alors que la compétition entre les deux herbivores peut considérablement s'accroître lorsque la densité de population du bovidé augmente (Larter et Nagy 1995), ce qui pourrait être le cas localement au Nunavik.

La compétition apparente est une compétition indirecte, où une espèce a un effet négatif sur l'autre via l'effet positif qu'elle a sur l'abondance de leurs prédateurs communs (Holt 1977). En effet, l'augmentation du nombre de bœufs musqués pourrait avoir un effet positif sur la survie et le succès reproducteur des prédateurs, ce qui en retour permettrait une plus grande pression de prédation sur le caribou migrateur. Par contre, comme la population de caribous demeurera potentiellement supérieure à celle du bœuf musqué dans l'horizon considéré dans cette étude, tout porte à croire que la compétition apparente se ferait plutôt au détriment du bovidé. La situation pourrait cependant changer dans le cas où l'effectif du TRF continuerait de diminuer et que ceux des bœufs musqués et des autres proies potentielles du loup gris et de l'ours noir augmenteraient (Fig. 6-10).

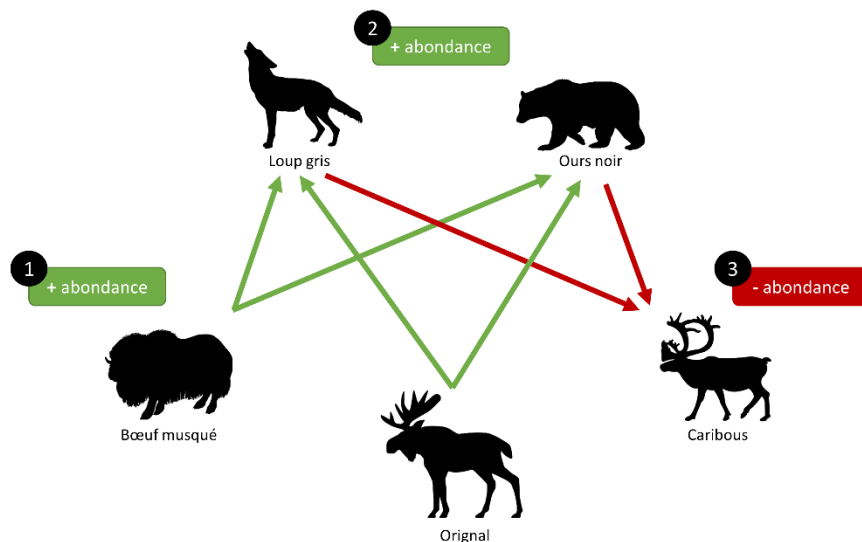


Figure 6-10 Résultat potentiel de la compétition apparente entre le bœuf musqué, l'orignal et le caribou migrateur. Une augmentation potentielle des populations de bœufs musqués et d'orignaux au Nunavik (1) pourraient permettre de soutenir de plus grandes populations de loups gris et d'ours noirs (2). De ce fait, la pression de prédation subie par le caribou pourrait elle aussi augmenter, réduisant ainsi ses effectifs (3).

Bien que la population de bœufs musqués au Nunavik soit relativement faible, un suivi de celle-ci et des possibles interactions avec le caribou migrateur demeure primordial pour une compréhension globale de la situation du cervidé au Nunavik.

6.5.3 La pression de prédation

Comme mentionné à la section 6.3.3, la modélisation de niche climatique ainsi que les observations sur le terrain laissent croire que les populations des prédateurs du caribou migrateur augmenteront (ours noir) ou demeureront présentes (loup gris) jusqu'au tournant du 21^e siècle. La présence du bœuf musqué, mais également l'arrivée potentielle de nouvelles espèces de proies pourraient permettre de maintenir les populations d'ours noir et de loup à des effectifs appréciables. En effet, certaines espèces de cervidés (p. ex. l'orignal) pourraient migrer vers le nord en raison de l'adoucissement des conditions climatiques et de la fragmentation de leur habitat dans le sud du Québec. Cette situation pourrait être accentuée dans le cas où les effets de la compétition apparente sur le caribou s'avèreraient négatifs (Fig. 6-10).

Pour terminer, les différentes menaces auxquelles font face les caribous migrants peuvent agir de façon synergique, imposant de ce fait des contraintes décuplées aux effectifs de ses populations (Wittmer et al. 2005). Par exemple, la présence d'infrastructures peut provoquer le déplacement des caribous vers des aires qui sont d'une part moins favorables en terme de ressources alimentaires, mais également plus à risque à la prédation (Cameron et al. 1992, Nellemann et Cameron 1996, Boulanger et al. 2004).

6.6 Impacts potentiels des changements d'abondance et de répartition du caribou migrateur

6.6.1 La qualité de l'habitat

Grand herbivore grégaire, le caribou migrateur a le potentiel de moduler la structure et la composition des communautés végétales des régions qui le supportent. Il peut, entre autres, détruire le couvert lichénique d'une région (Boudreau et Payette 2004), favoriser une plus grande diversité floristique localement et freiner la meilleure performance des arbustes induite par l'augmentation récente des températures (Zamin et Grogan 2013). Pour plus de détails sur les relations plantes-herbivores, veuillez vous référer à la section 5.3.3 *La toundra et les arbustes*.

L'impact qu'aura le caribou migrateur sur son habitat dans les prochaines décennies est fortement influencé par la taille des deux troupeaux du Nunavik. Le caribou a un impact sur son environnement par son broutement, mais également par le piétinement des centaines de milliers de sabots qui foulent le sol (Crête et Huot 1993, Couturier et al. 2004). À forte densité, le caribou migrateur peut dégrader son habitat d'estivage de façon telle qu'il peut entraîner une diminution de la condition physique des individus, de la fécondité des femelles et de la survie des faons (Crête et Huot 1993, Crête et al. 1996). C'est vraisemblablement ce qui s'est produit dans les années 1990 sur l'aire d'estivage du TRG, alors que la productivité végétale a été fortement réduite par la pression induite par le broutement et le piétinement (Campeau 2016). Avec la faible abondance actuelle des caribous de ce troupeau, l'adoucissement prévu des conditions climatiques favorisera vraisemblablement une forte reprise végétale, phénomène déjà bien enclenché à proximité de Kangiqsualujuaq (Tremblay et al. 2012). Cette reprise végétale pourrait permettre aux caribous migrants du TRG de profiter de bonnes conditions sur leur aire d'estivage dans les prochaines années et de renflouer les effectifs du troupeau. D'après les scénarios d'abondance potentielle présentés à la section 6.3.2, l'effectif du TRF devrait rester à son plus bas jusqu'au milieu du siècle, permettant ainsi au couvert végétal de profiter de l'augmentation des températures avec une pression de broutement et de piétinement limitée.

6.6.2 La sécurité alimentaire des Inuits

Loin d'être un enjeu limité aux pays du sud, la sécurité alimentaire est une préoccupation bien réelle chez les Inuits. Selon les enquêtes régionales sur la

santé au Nunavik réalisées en 2004, près d'une personne sur quatre mentionnait avoir manqué de nourriture dans le dernier mois (Allard et Lemay 2013). Chez ce peuple du nord, la sécurité alimentaire se décline en deux temps: celle associée à l'accessibilité aux aliments importés du sud du Québec ou d'ailleurs et celle associée à l'accessibilité à la nourriture traditionnelle. L'accessibilité aux ressources importées est limitée en raison de son prix (les Inuits paient les denrées alimentaires 50% plus cher; Robitaille et al. 2016) et de l'insécurité face à son importation (conditions climatiques limitant l'accès par avion, instabilité des pistes d'atterrissage en raison du dégel du pergélisol; Allard et Lemay 2013). De son côté, l'accessibilité à la nourriture traditionnelle est influencée par la disponibilité des espèces chassées et pêchées, par la facilité avec laquelle les chasseurs peuvent se déplacer sur le territoire pour accéder à la ressource, et par les changements climatiques qui affectent chacune de ces deux sphères (Furgal et al. 2002).

Parmi les espèces chassées, le caribou représente la principale source de nourriture terrestre et est consommé en moyenne deux fois par semaine dans les ménages du Nunavik (Blanchet et Rochette 2008). En 2004, le caribou était déjà ciblé comme une espèce qu'il devenait de plus en plus difficile de chasser dans certaines communautés, notamment parce que ces animaux se trouvaient maintenant plus loin des villages (Allard et Lemay 2013). La diminution actuellement observée chez les deux troupeaux du Nunavik ne devrait pas améliorer cette situation dans les prochaines décennies. De plus, même si les moyens techniques disponibles pour chasser ont permis d'en augmenter son efficacité (Adamczewski et al. 2009, Nesbitt et Adamczewski 2009), les Inuits soulignent que le caractère moins prévisible du climat limite les déplacements et augmente les risques d'accident (Furgal et al. 2002). Selon notre scénario d'abondance potentielle le plus optimiste (retour de la période d'abondance aux 60 ans), l'effectif du TRF devrait entrer en phase de croissance dans les années 2040 et augmenter rapidement par la suite. Malgré tout, ce scénario prévoit plus de 20 ans de faible abondance du caribou migrateur du TRF. Les changements potentiels d'utilisation du territoire par ce troupeau dans les prochaines décennies (Fig. 6-6) risquent également d'affecter les pratiques de chasse des Inuits. Ainsi, les chasseurs de certains villages pourraient devoir se déplacer davantage afin d'avoir accès aux caribous migrants.

La proportion de nourriture traditionnelle consommée par les Inuits est de l'ordre de 16%, mais peut atteindre près de 30% chez les personnes plus

âgées (Blanchet et Rochette 2008). Bien que cette proportion demeure relativement faible, la demande en nourriture traditionnelle pourrait augmenter dans les prochaines décennies. D'une part, sa consommation est encouragée en raison des effets négatifs probables de la nourriture du commerce sur la santé cardiovasculaire des Inuits (Allard et Lemay 2013). D'autre part, la population du Nunavik enregistre un taux d'accroissement annuel moyen nettement supérieur que celui du reste du Québec (19,5 pour mille, comparativement à 7,9 pour mille entre 2011 et 2015; Institut de la statistique du Québec 2016), augmentant de ce fait la demande absolue en nourriture. Cette pression sur les populations de caribous migrants s'ajoute à celles décrites dans les sections précédentes de ce chapitre.

6.7 Synthèse

Le caribou migrateur est une espèce clé du Nunavik, tant pour le rôle central qu'il joue dans les écosystèmes qui le supportent que pour l'importance culturelle et socioéconomique qu'il occupe chez les communautés autochtones du nord. Comme l'ensemble de la région circumpolaire, le Nunavik enregistre et continuera vraisemblablement d'enregistrer les changements climatiques les plus importants sur la planète. Dans une vision de conservation des écosystèmes naturels comme celle dont s'est doté le Québec, il devient primordial de mieux cerner les changements potentiels que subiront les troupeaux du Nunavik dans les prochaines décennies. Grâce à un exercice de modélisation de niche climatique et sur les connaissances déjà acquises, nous avons donc présenté les impacts potentiels des changements climatiques prévus sur la dynamique de population du caribou migrateur, particulièrement sur celui du troupeau de la rivière aux Feuilles (TRF).

Premièrement, nous avons montré que l'enveloppe des conditions climatiques favorables au caribou migrateur du TRF devrait diminuer au cours du 21^e siècle, et ce, pour toutes les saisons. Bien que ceci ne se traduise pas nécessairement par une diminution réelle de l'aire de répartition du troupeau, il suggère que les changements climatiques prévus induiront une pression négative sur les individus du TRF. De plus, la modélisation de niche climatique prédit que l'enveloppe des conditions favorables aux populations de prédateurs du caribou migrateur devrait se maintenir et même augmenter au cours de la période considérée. Les observations récentes effectuées par les habitants du nord et des scientifiques suggèrent également que la population d'au moins un de ces prédateurs, l'ours noir, est en croissance, ce qui suggère que la pression de prédation devrait augmenter au cours des prochaines décennies.

Deuxièmement, les scénarios potentiels d'abondance du troupeau de la rivière aux Feuilles suggèrent que ce dernier devrait revenir à une taille similaire à celle qu'il avait en 2001 (plus de 600 000 bêtes) à partir du milieu du siècle et décroître par la suite. Les fortes variations d'abondance du troupeau pourraient néanmoins être amoindries et même stabilisées par une régulation par la chasse sportive et de subsistance, permettant de ce fait aux Inuits de maintenir un accès constant à cette ressource. Les scénarios présentés ici sont tous basés sur l'hypothèse que les troupeaux de caribous migrants sont dans une phase de faible abondance d'un cycle naturel, hypothèse la plus largement acceptée actuellement. Le retour plus ou moins proche vers une phase de

croissance est donc fort probable, mais les changements engendrés par le réchauffement climatique en cours et à prévoir devraient moduler l'ampleur ou la durée ces cycles naturels.

Plusieurs facteurs directs et indirects des changements climatiques ont le potentiel d'influencer la taille des troupeaux de caribous et leur aire de répartition. Parmi ceux ayant le potentiel de les influencer négativement, notons par exemple la plus grande récurrence des événements de pluie sur neige ainsi que l'augmentation du harcèlement par les insectes piqueurs et parasites. L'effet positif le plus important du réchauffement climatique sera probablement l'expansion du couvert arbustif dans la région toundrique du Nunavik, dans laquelle l'une des espèces impliquées est consommée par caribou migrateur. Bien que la disponibilité des ressources sur les aires d'estivage soit un élément clé de la santé des troupeaux, l'effet net des changements climatiques sur cette espèce est difficile à prévoir de façon exacte.

Pour terminer, d'autres facteurs pourraient avoir un effet négatif sur les populations de caribous migrants, notamment les activités anthropiques et l'arrivée récente du bœuf musqué au Nunavik. Afin de gérer de façon durable les populations de ce grand cervidé et d'en assurer un accès constant aux communautés autochtones qui en font une chasse de subsistance, l'ensemble des facteurs affectant la dynamique du caribou migrateur et dont nous avons discuté dans ce chapitre doit être considéré. Certains aspects de la dynamique de population du caribou migrateur, tel que l'influence de la prédation, demeurent peu étudiés à ce jour et devront faire l'objet de recherches plus approfondies dans les prochaines années.

6.8 Références

- Adamczewski, J.Z., Boulanger, J., Croft, B., Cluff, D., Elkin, B., Nishi, J., Kelly, A., D'Hont, A., Nicolson, C., 2009. *Decline in the Bathurst Caribou Herd 2006-2009: a technical evaluation of field data and modeling*. Government of Northwest Territories, Wildlife division, Yellowknife, 105p.
- Allard, M., Lemay, M., 2013. *Le Nunavik et le Nunatsiavut : de la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de modernisation*. ArcticNet Inc, Québec, Canada, 322 p.
- Altwegg, R., Broms, K., Erni, B., Barnard, P., Midgley, G.F., Underhill, L.G., 2012. Novel methods reveal shifts in migration phenology of barn swallows in South Africa. *Proceedings of the Royal Society B – Biological Sciences*, 279(1733), pp. 1485-1490.
- Bergerud, A.T., Luttich, S.N., Camps, L., 2008. *The return of caribou to Ungava*. Les Presses des Universités McGill et Queen, Montréal/Kingston, 586 p.
- Berteaux, D., Casajus, N., de Blois, S., 2014. *Changements climatiques et biodiversité du Québec : vers un nouveau patrimoine naturel*. Presses de l'Université du Québec, Québec, 170 p.
- Bhiry, N., Delwaide, A., Allard, M., Bégin, Y., Filion, L., Lavoie, M., Nozais, C., Payette, S., Pienitz, R., Saulnier-Talbot, E., Vincent, W.F., 2011. Environmental change in the Great Whale River region, Hudson Bay: Five decades of multidisciplinary research by Centre d'études nordiques (CEN). *Ecoscience*, 18(3), pp. 182-203.
- Blanchet, C., Rochette, L., 2008. *Nutrition and food consumption among the Inuit of Nunavik. Nunavik Inuit Health Survey 2004, Qanuippitaa? How are we?* Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) et Nunavik Regional Board of Health and Social Services (NRBHSS), Québec, 161 p.
- Boudreau, S., Payette, S., Morneau, C., Couturier, S., 2003. Recent decline of the George River Caribou herd as revealed by tree-ring analysis. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 35(2), pp. 187-195.

- Boudreau, S., Payette, S., 2004. Growth performance of *Cladina stellaris* following caribou disturbance in subarctic Quebec. *Ecoscience*, 11(3), pp. 347-355.
- Boulanger, J., Poole, K., Fournier, B., Wierzosowski, J., Gaines, T., Gunn, A., 2004. *Assessment of Bathurst caribou movements and distribution in the Slave Geological Province*. Department of Resources, Wildlife and Economic Development, Government of the Northwest Territories, Yellowknife, 108 p.
- Boulanger, J., Gunn, A., Adamczewski, J.Z., Croft, B., 2011. A data-driven demographic model to explore the decline of the Bathurst caribou herd. *Journal of Wildlife Management*, 75(4), pp. 883-896.
- Boulet, M., Couturier, S., Côté, S.D., Otto, R.D., Bernatchez, L., 2007. Integrative use of spatial, genetic, and demographic analyses for investigating genetic connectivity between migratory, montane, and sedentary caribou herds. *Molecular Ecology*, 16(20), pp. 4223-4240.
- Cameron, R.D., Reed, D.J., Dau, J.R., Smith, W.T., 1992. Redistribution of calving caribou in response to oil field development on the Arctic Slope of Alaska. *Arctic*, 45(4), pp. 338-342.
- Campeau, A.B., 2016. Changements de productivité primaire dans l'habitat du caribou migrateur : l'influence du climat et de la pression de broutement révélée à l'aide de la télédétection. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec.
- Cebrian, M.R., Kielland, K., Finstad, G., 2008. Forage quality and reindeer productivity: Multiplier effects amplified by climate change. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 40(1), pp. 48-54.
- Charron, I., 2015. *Élaboration du portrait climatique régional du Nunavik*, Ouranos, Montréal, 86 p.
- Comité conjoint de chasse, de pêche et de piégeage, 2012. *Délibérations et résumés de l'Atelier sur le caribou migrateur – Le déclin du caribou : inquiétudes partagées, solutions communes – Montréal, 11 au 13 septembre 2012*, document préparé par T. D. Rudolph et A. Bourbeau-Lemieux, Montréal, 93 p.
- Communities of Ivujivik, Puvirnituq and Kangiqsujuaq, Furgal, C., Nickels, S., Kativik Regional Government – Environment Department, 2005.

Unikkaaqatigiit: Putting the Human Face on Climate Change: Perspectives from Nunavik. Ottawa: Publication conjointe du Inuit Tapiriit Kanatimi, Nasivvik Centre for Inuit Health and Changing Environments à l'Université Laval et du Ajunnginiq Centre at the National Aboriginal Health Organization.

- Couturier, S., Jean, D., Otto, R., Rivard S., 2004. *Demography of the migratory tundra caribou (Rangifer tarandus) of the Nord-du-Québec region and Labrador*. Direction de l'aménagement de la faune du Nord-du-Québec et Direction de la recherche sur la faune, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Québec, 68 p.
- Couturier, S., Côté, S.D., Otto, R., Weladji, R.B., Huot J., 2009. Variation in calf body mass in migratory caribou: the role of habitat, climate, and movements. *Journal of Mammalogy*, 90(2), pp. 442-452.
- Couturier, S., Otto, R.D., Côté, S.D., Luther, G., Mahoney, S.P., 2010. Body size variations in caribou ecotypes and relationships with demography. *Journal of Wildlife Management*, 74(3), pp. 395-404.
- Couturier, S., Dale, A., Mitchell Foley, J., Snook, J., Wood, B., 2015. *First scientific data on herd size and population dynamics of the Torngat Mountains caribou herd*. Torngat Wildlife, Plants and Fisheries Secretariat, Happy Valley-Goose Bay, 54 p.
- Crête, M., Huot, J., Gauthier, L., 1990. Food selection during early lactation by caribou calving on the tundra in Quebec. *Arctic*, 43(1), pp. 60-65.
- Crête, M., Huot, J., 1993. Regulation of a large herd of migratory caribou: summer nutrition affects calf growth and body reserves of dams. *Canadian Journal of Zoology*, 71(11), pp. 2291-2296.
- Crête, M., Couturier, S., Hearn, B.J., Chubbs, T.E., 1996. Relative contribution of decreased productivity and survival to recent changes in the demographic trend of the Rivière George Caribou Herd. *Rangifer*, 9, pp. 27-36.
- Cuerrier, A., Brunet, N.D., Gérin-Lajoie, J., Downing, A., Lévesque, E., 2015. The study of Inuit knowledge of climate change in Nunavik, Quebec: a mixed methods approach. *Human Ecology*, 43(3), pp. 379-394.
- Équipe de rétablissement du caribou forestier du Québec, 2013. *Plan de rétablissement du caribou forestier (Rangifer tarandus caribou) au Québec*

- 2013-2023. Produit pour le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, Québec, Faune Québec, 110 p.
- Festa-Bianchet, M., Ray, J.C., Boutin, S., Côté, S.D., Gunn, A., 2011. Conservation of caribou (*Rangifer tarandus*) in Canada: an uncertain future. *Canadian Journal of Zoology*, 89(5), pp. 419-434.
- Fréchette, J.L., 1986. *Guide pratique des principaux parasites et maladies de la faune terrestre et ailée du Québec*. Distribution Pisciconsult inc., Saint Hyacinthe, 280 p.
- Furgal, C., Martin, D., Gosselin, P., 2002. Climate change and health in Nunavik and Labrador: Lessons from Inuit Knowledge *dans* Krupnik, I., Jolly, D., (éditeurs), *The earth is faster now: indigenous observations of Arctic environmental change*, pp. 266-299. Arctic Research Consortium of the United States en collaboration avec Arctic Studies Center, Smithsonian Institution, Fairbanks, Alaska.
- Gaillard, J.M., Yoccoz, N.G., 2003. Temporal variation in survival of mammals: a case of environmental canalization. *Ecology*, 84(12), pp. 3294-3306.
- Garshelis, D.L., Scheick, B.K., Doan-Crider, D.L., Beecham, J.J., Obbard, M.E., 2016. *Ursus americanus*. The IUCN red list of threatened species 2016: e.T41687A45034604. Disponible sur le site web : <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-3.RLTS.T41687A45034604.en> [2 mars 2017].
- Gerhart, K.L., White, R.G., Cameron, R.D., Russell, D.E., 1996. Body composition and nutrient reserves of arctic caribou. *Canadian Journal of Zoology*, 74(1), pp. 136-146.
- Giorgi, F., Jones, C., Asrar, G.R., 2009. Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *WMO Bulletin*, 58(3), pp. 175-183.
- Guisan, A., Theurillat, J.P., 2000. Equilibrium modelling of alpine plant distribution: how far can we go? *Phytocoenologia*, 30(3-4), pp. 353-384.
- Hinkes, M.T., Collins, G.H., Van Daele, L.J., Kovach, S.D., Aderman, A.R., Woolington, J.D., Seavoy, R.J., 2005. Influence of population growth on caribou herd identity, calving ground fidelity, and behavior. *Journal of Wildlife Management*, 69(3), pp. 1147-1162.

- Holt, R.D., 1977. Predation, apparent competition, and the structure of prey communities. *Theoretical Population Biology*, 12(2), pp. 197-229.
- Institut de la statistique du Québec, 2016. *Bulletin statistique régional, édition 2016 – Nord-du-Québec*. Disponible sur le site web : http://www.bdso.gouv.qc.ca/docs-ken/multimedia/PB01608FR_RA10_2016A00F00.pdf [20 février 2017].
- IUCN, 2016. The IUCN red list of threatened species. Disponible sur le site web: <http://www.iucnredlist.org/> [5 février 2017].
- Jean, D., Rivard, S., 2005. *Inventaire de la population de boeufs musqués (Ovibos moschatus) sur l'île Diana, près de Quaqtaq en juin 2005*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Secteur Faune Québec, Direction de l'aménagement de la faune du Nord-du-Québec, Chibougamau, 8 p.
- Jean, D., Rivard, S., Bélanger, M., 2006. Inventaire et structure de population du bœuf musqué (*Ovibos moschatus*) au sud-ouest de la baie d'Ungava (août 2003). *Naturaliste Canadian*, 130(2), pp. 42-48.
- Larter, N.C., Nagy, J.A., 1995. Evidence of overwinter growth in Peary Caribou, *Rangifer tarandus pearyi*, calves. *Canadian Field Naturalist*, 109(4), pp. 446-448.
- Le Corre, M.V., 2016. Influence du climat, de la disponibilité des ressources et de la taille des populations sur la phénologie et les patrons de migration du caribou migrateur, *Rangifer tarandus*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec.
- Le Hénaff, D., 1976. *Inventaire aérien des terrains de vèlage du caribou dans la région nord et au nord du territoire de la municipalité de la Baie James (mai-juin 1975)*. Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche, Québec, 28 p.
- Le Hénaff, D., 1986. *Bœuf musqué, plan tactique*. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la pêche, Direction de la Faune, Québec, 48 p.
- Lesmerises, R., Rebouillat, L., Dussault, C., St-Laurent, M.H., 2015. Linking GPS telemetry surveys and scat analyses helps explain variability in black bear foraging strategies. *Plos One*, 10(7), e0129857.

- Martynov, A., Laprise, R., Sushama, L., Winger, K., Separovic, L., Dugas, B., 2013. Reanalysis driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model version 5: Model performance evaluation. *Climate Dynamics*, 41(11), pp. 2973–3005.
- McManus, K.M., Morton, D.C., Masek, J.G., Wang, D.D., Sexton, J.O., Nagol, J.R., Ropars, P., Boudreau, S., 2012. Satellite-based evidence for shrub and graminoid tundra expansion in northern Quebec from 1986 to 2010. *Global Change Biology*, 18(7), pp. 2313-2323.
- Mech, L.D., Boitani, L. (IUCN SSC Wolf Specialist Group), 2010. *Canis lupus*. The IUCN red list of treated species 2010: e.T3746A10049204. Disponible sur le site web: <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2010-4.RLTS.T3746A10049204.en>. [2 mars 2017].
- Messier, F., Huot, J., 1985. *Connaissances sur le troupeau de caribous de la rivière George*. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Québec, 98 p.
- Messier, F., Huot, J., Le Henaff, D., Luttich, S., 1988. Demography of the George River caribou herd: evidence of population regulation by forage exploitation and range expansion. *Arctic*, 41(4), pp. 279-287.
- Miller, F.L., 2003. Caribou *dans* Feldhamer, G.A., Thompson B.C., Chapman, J.A. (éditeurs), *Wild mammals of North America – Biology, Management, and Conservation*, pp. 965-997. The Johns Hopkins University Press, Baltimore/Londres.
- Monteith, K.L., Bleich, V.C., Stephenson, T.R., Pierce, B.M., Conner, M.M., Klaver, R.W., Bowyer, R.T., 2011. Timing of seasonal migration in mule deer: effects of climate, plant phenology, and life-history characteristics. *Ecosphere*, 2(4), UNSP47.
- Morneau, C., Payette, S., 1998. A dendrochronological method to evaluate past caribou (*Rangifer tarandus* L.) activity. *Ecoscience*, 5(1), pp. 64-76.
- Myers-Smith, I.H., Forbes, B.C., Wilmking, M., Hallinger, M., Lantz, T., Blok, D., Tape, K.D., Macias-Fauria, M., Sass-Klaassen, U., Lévesque, E., Boudreau, S., Ropars, P., Hermanutz, L., Trant, A., Collier, L.S., Weijers, S., Rozema, J., Rayback, S.A., Schmidt, N.M., Schaepman-Strub, G., Wipf, S., Rixen, C., Ménard, C., Venn, S., Goetz, S., Andreu-Hayles, L., Elmendorf, S., Epstein, H.E., Welker, J., Grogan, P., Hik, D., 2011. Shrub

- expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities. *Environmental Research Letters*, 6(4), 045509.
- Nellemann, C., Cameron, R.D., 1998. Cumulative impacts of an evolving oil-field complex on the distribution of calving caribou. *Canadian Journal of Zoology*, 76(8), pp. 1425-1430.
- Nesbitt, L., Adamczewski, J.Z., 2009. *Decline and recovery of the Bathurst caribou herd: workshops Oct. 1 & 2 and 5 & 6 in Yellowknife*. Department of Environment and Natural Resources, Government of the Northwest Territories, Yellowknife, 35 p.
- Olofsson, J., Oksanen, L., Callaghan, T., Hulme, P.E., Oksanen, T., Suominen, O., 2009. Herbivores inhibit climate-driven shrub expansion on the tundra. *Global Change Biology*, 15(11), pp. 2681-2693.
- Payette, S., Boudreau, S., Morneau, C., Pitre, N., 2004. Long-term interactions between migratory caribou, wildfires and Nunavik hunters inferred from tree rings. *Ambio*, 33(8), pp. 482-486.
- Pearson, R.G., Dawson, T.P., 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Change Biology*, 12(5), pp. 361-371.
- Pearson, R.G., Thuiller, W., Araujo, M.B., Martinez-Meyer, E., Brotons, L., McClean, C., Miles, L., Segurado, P., Dawson, T.P., Lees, D.C., 2006. Model-based uncertainty in species-range prediction. *Journal of Biogeography*, 33(10), 1704-1711.
- Rasiulis, A., 2015. Survie et dynamique de population des caribous migrants du Québec- Labrador. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec.
- Robitaille, J., Guénard, E., Duhaime, G., 2016. *Coût de la vie au Nunavik, rapport de recherche*. Chaire de recherche du Canada sur la condition autochtone comparée, Université Laval, Québec, 72 p.
- Roed, K.H., Holand, O., Smith, M.E., Gjostein, H., Kumpula J., Nieminen, M., 2002. Reproductive success in reindeer males in a herd with varying sex ratio. *Molecular Ecology*, 11(7), pp. 1239-1243.
- Ropars, P., Boudreau, S., 2012. Shrub expansion at the forest-tundra ecotone: spatial heterogeneity linked to local topography. *Environmental Research Letters*, 7(1), 015501.

- Ropars, P., Lévesque, E., Boudreau, S., 2015. How do climate and topography influence the greening of the forest-tundra ecotone in northern Quebec? A dendrochronological analysis of *Betula glandulosa*. *Journal of Ecology*, 103(3), pp. 679-690.
- Saucier, V., 2014. Réponses du bouleau glanduleux au réchauffement climatique et au broutement par le caribou migrateur. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec.
- Separovic, L., Alexandru, A., Laprise, R., Martynov, A., Sushama, L., Winger, K., Tete, K., Valin, M., 2013. Present climate and climate change over North America as simulated by the fifth generation Canadian Regional Climate Model. *Climate Dynamics*, 41(11), pp. 3167–3201.
- Sharma, S., Couturier, S., Côté, S.D., 2009. Impacts of climate change on the seasonal distribution of migratory caribou. *Global Change Biology*, 15(10), pp. 2549–2562.
- Simard, A.A., Kutz, S., Ducrocq, J., Beckmen, K., Brodeur, V., Campbell, M., Croft, B., Cuyler, C., Davison, T., Elkin, B., Giroux, T., Kelly, A., Russell, D., Taillon, J., Veitch, A., Côté, S.D., 2016. Variation in the intensity and prevalence of macroparasites in migratory caribou: a quasi-circumpolar study. *Canadian Journal of Zoology*, 94(9), pp. 607-617.
- Taillon, J., Festa-Bianchet, M., Côté, S.D., 2012a. Shifting targets in the tundra: protection of migratory caribou calving grounds must account for spatial changes over time. *Biological Conservation*, 147(1), pp. 163-173.
- Taillon, J., Brodeur, V., Festa-Bianchet, M., Côté, S.D., 2012b. Is mother condition related to offspring condition in migratory caribou at calving and weaning? *Canadian Journal of Zoology*, 90(3), pp. 393-402.
- Taillon, J., 2013. Condition physique, allocation maternelle et utilisation spatio-temporelle des aires de mise bas du caribou migrateur, *Rangifer tarandus*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec.
- Taillon, J., Barboza, P.S., Côté, S.D., 2013. Nitrogen allocation to offspring and milk production in a capital breeder. *Ecology*, 94(8), pp. 1815-1827.
- Taillon, J., Brodeur, V., Rivard, S., 2016. État de la situation biologique du caribou migrateur, troupeau de la rivière aux Feuilles, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Disponible sur le site web :

<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/faune/etat-situation-caribou-riviere-Feuilles.pdf> [27 janvier 2017].

- Tape, K.D., Sturm, M., Racine, C., 2006. The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic. *Global Change Biology*, 12(4), pp. 686-702.
- Tottrup, A.P., Thorup, K., Coppack, T., Rainio, K., Lehikoinen, E., Rahbek, C., 2006. Long-term phenological changes in spring migration through Northern Europe: a comparative approach. *Journal of Ornithology*, 147(5), pp. 51-52.
- Toupin, B., Huot, J., Manseau, M., 1996. Effect of insect harassment on the behaviour of the Riviere George caribou. *Arctic*, 49(4), pp. 375-382.
- Tremblay, B., Levesque, E., Boudreau, S., 2012. Recent expansion of erect shrubs in the Low Arctic: evidence from Eastern Nunavik. *Environmental Research Letters*, 7(3), 035501.
- White, R.G., 1983. Foraging patterns and their multiplier effects on productivity of northern ungulates. *Oikos*, 40(3), pp. 377-384.
- Wilkinson, P.F., Shank, C.C., Penner, D.F., 1976. Muskox-caribou summer range relations on Banks Island, N.W.T. *Journal of Wildlife Management*, 40(1), pp. 151-162.
- Witter, L.A., Johnson, C.J., Croft, B., Gunn, A., Poirier, L.M., 2012a. Gauging climate change effects at local scales: weather-based indices to monitor insect harassment in caribou. *Ecological Applications*, 22(6), pp. 1838-1851.
- Witter, L.A., Johnson, C.J., Croft, B., Gunn, A., Gillingham, P., 2012b. Behavioural trade-offs in response to external stimuli: time allocation of an Arctic ungulate during varying intensities of harassment by parasitic flies. *Journal of Animal Ecology*, 81(1) pp. 284-295.
- Wittmer, H.U., Sinclair, A.R.E., McLellan, B.N., 2005. The role of predation in the decline and extirpation of woodland caribou. *Oecologia*, 144(2), pp. 257-267.
- Wolfe, S.A., Griffith, B., Gray Wolfe, C.A., 2000. Response of reindeer and caribou to human activities. *Polar Research*, 19(1), pp. 63-73.

- Yannic, G., St-Laurent, M.H., Ortego, J., Taillon, J., Beauchemin, A., Bernatchez, L., Dussault, C., Côté S.D., 2016. Integrating ecological and genetic structure to define management units for caribou in Eastern Canada. *Conservation Genetics*, 17(2), pp. 437-453.
- Zamin, T.J., Grogan, P., 2013. Caribou exclusion during a population low increases deciduous and evergreen shrub species biomass and nitrogen pools in low Arctic tundra. *Journal of Ecology*, 101(3), pp. 671-683.

Chapitre 7 Conclusion

Le présent projet avait pour objectif de mettre à jour le portrait climatique du Nunavik, ainsi que ses composantes hydroclimatiques et bioclimatiques pour supporter les études de vulnérabilités, d'impact et d'adaptation aux changements climatiques. Le rapport visait également à entreprendre des analyses d'impacts des changements climatiques sur la faune et la végétation du Nunavik. Les décideurs pourront ainsi développer et mettre en œuvre des mesures d'adaptation aux changements climatiques.

Dans le cadre du projet, le climat passé récent et le climat futur du Nunavik ont été caractérisés. Les bioclimats ont également été mis à jour. L'hydrologie reconstituée pour le passé récent et l'hydrologie future sont présentées; les résultats sont tirés du projet cQ2 réunissant Hydro-Québec (IREQ), la Direction de l'expertise hydrique (DEH, MDDELCC), Rio Tinto et Ouranos. Deux analyses d'impacts ont également été effectuées; l'une sur la grande faune du Nunavik et l'autre sur la végétation.

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet ont permis de montrer que le Nunavik connaîtra au cours des décennies des bouleversements majeurs en matière de climat. On assistera globalement à un réchauffement important du climat du Nunavik aux horizons 2046-2060 et 2076-2100, ce qui se traduira par une modification importante de plusieurs indicateurs liés aux températures. De même, les précipitations annuelles augmenteront à l'échelle de l'ensemble du territoire avec des augmentations plus marquées pendant les mois d'automne et d'hiver. La couverture de neige diminuera de façon globale entraînant une réduction de la durée du couvert de neige et de l'épaisseur maximale du couvert.

Pour ce qui est de l'hydrologie, le débit annuel moyen et le débit moyen de crue du passé récent varient grandement sur le territoire. Le début de la crue survient entre le 129^e et le 159^e jour de l'année. Les augmentations projetées pour le débit annuel moyen sont de l'ordre de 3 % à 47 % et de 2 % à 52 % pour le débit moyen de crue. Les variations projetées pour le début de la crue sont de l'ordre de -28.0 jours à +2.5 jours.

La nouvelle version de la carte des bioclimats du Nunavik contient sept bioclimats distincts, elle est similaire aux anciennes versions présentées. Les

bioclimats futurs se réchaufferont et s'humidifieront. Le spectre des bioclimats possibles est large : il contient 24 bioclimats distincts. Ceux-ci varient selon le scénario RCP, l'horizon temporel et le scénario étudié : moyen, supérieur ou inférieur.

Concernant l'évolution de la végétation, il est peu probable que la limite des arbres latitudinale remonte de façon significative. Les forêts du Haut-Boréal et les arbustes érigés de la toundra arctique s'étendront probablement. C'est davantage l'abondance relative et la productivité des espèces que la biodiversité qui risquent d'être affectées. Les forêts feuillues subarctiques seront les plus touchées parmi les écosystèmes exceptionnels du Nunavik.

Dans les prochaines décennies, l'enveloppe des conditions climatiques favorables au caribou migrateur et à ses prédateurs pourrait diminuer et augmenter, respectivement, conduisant à une pression de prédation plus importante. Les scénarios potentiels d'abondance prédisent un retour à de fortes abondances de caribous migrants au cours du siècle, mais ceci pourrait être modulé par les effets directs et indirects des changements climatiques.

7.1 Recommandations pour les études de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptation

Il appert que l'évolution du climat s'ajoute comme facteur justifiant la poursuite du développement de connaissances sur la dynamique des écosystèmes nordiques, leur taux de changement ainsi que leur diversité afin d'anticiper et d'évaluer les impacts cumulés de la combinaison des activités socio-économiques, des changements climatiques et du développement du territoire. Aussi, l'évolution des espèces indigènes et l'évaluation de leur potentiel à faire face à la compétition des espèces migrant vers le nord ou introduites et potentiellement mieux adaptées aux conditions climatiques changeantes devra être prise en compte pour appuyer les décisions de protection du territoire et de gestion des ressources.

Considérant l'importance des espèces aquatiques phares pour la sécurité alimentaire des peuples Cris et Inuits, des travaux de modélisation de la température des cours d'eau seraient pertinents afin de projeter les valeurs de température de l'eau dans un climat futur et de mieux en évaluer les impacts sur la faune aquatique.

7.2 Travaux futurs

Les résultats du projet ont permis de montrer que les projections de changements pour le Nunavik sont cohérentes, et ce autant pour les projections climatiques, hydrologiques et bioclimatiques. Plusieurs sources d'incertitude demeurent toutefois, notamment celles liées aux scénarios RCP et aux modèles climatiques régionaux et/ou globaux utilisés. Il sera pertinent de reprendre les analyses climatiques, hydrologiques et bioclimatiques dans le futur puisque de nouveaux scénarios RCP seront disponibles, puisque les modèles climatiques et hydrologiques se raffineront et le nombre de simulations climatiques tend à augmenter avec le temps. Par ailleurs, plusieurs simulations de modèles régionaux à plus haute résolution spatiale (≈ 12 km) seront disponibles sous peu. Elles devraient améliorer l'évaluation des indicateurs extrêmes (p. ex. RX1day et RX5day) qui sont plus sensibles à la résolution des modèles.

Ensuite, plusieurs ensembles et méthodes sont actuellement développés et devraient permettre d'améliorer la représentation du climat de référence. Des analyses supplémentaires seront éventuellement nécessaires afin de comparer ces nouveaux ensembles à ceux utilisés dans le cadre de cette étude afin d'identifier l'ensemble offrant la représentation la plus juste du climat de référence. Cet aspect est très important pour les indicateurs d'extrêmes (p. ex. RX1day) puisque les résultats ont montré que le climat de référence présentait des lacunes importantes pour la représentation spatiale de ces indicateurs.

Plusieurs décideurs des régions nordiques manifestent leur intérêt pour améliorer la caractérisation des événements violents sur le territoire notamment en ce qui concerne les vents. Considérant la performance des réanalyses dans les projets réalisés durant les dernières années, nous sommes d'avis que des avancées scientifiques pourraient aussi être obtenues sur les vents. Ces derniers sont notamment requis pour la planification des infrastructures en milieu côtier et terrestre ainsi que le transport maritime.

Dans le domaine boréal (pessière à lichens et toundra forestière), il serait intéressant d'axer de futures études sur les espèces arborescentes afin d'étudier la dynamique des forêts du Nunavik et de voir comment elles répondent aux changements climatiques au niveau de la croissance et de la capacité reproductrice. Des études devraient viser spécifiquement les espèces les plus limitées par le climat et qui s'y trouvent seulement en petites populations très isolées : *Abies balsamea*, *Pinus banksiana*, *Betula papyrifera*,

Populus tremuloides et *P. balsamifera*. Dans le domaine arctique, des parcelles de suivi à long terme devraient être installées en transects latitudinaux et longitudinaux dans une gamme variée d'habitats afin de suivre l'évolution de la végétation de toundra au niveau de la structure et de la composition spécifique au sein de milieux aux conditions écologiques diverses et contrastées.

Finalement, le caribou migrateur est une espèce clé du Nunavik, mais il demeure étroitement lié aux autres espèces animales et végétales qu'il côtoie. Afin de mieux prévoir les efforts de conservation dans cette région en pleine mutation, il devient primordial d'élever notre compréhension à l'échelle des écosystèmes et de l'ensemble de sa biodiversité.



**550, rue Sherbrooke Ouest, 19^e étage
Montréal, Québec, H3A 1B9, Canada**

Tél. : 514-282-6464

Fax : 514-282-7131

www.ouranos.ca

Ouranos est né de la vision commune du Gouvernement du Québec, d'Hydro-Québec et d'Environnement Canada, avec le soutien financier de Valorisation-Recherche-Québec en 2001. Intégrant un réseau de quelque 450 scientifiques et professionnels issus de différentes disciplines, le consortium se concentre sur deux grands thèmes : la science du climat et les vulnérabilités, les impacts et l'adaptation. Sa mission est l'acquisition et le développement de connaissances sur les changements climatiques et leurs impacts ainsi que sur les vulnérabilités socioéconomiques et environnementales, de façon à informer les décideurs sur l'évolution du climat et à les conseiller pour identifier, évaluer, promouvoir et mettre en œuvre des stratégies d'adaptation locales et régionales.