



Les changements climatiques attendus et leurs impacts potentiels sur l'écologie routière au Québec

Valérie Bourduas Crouhen, Robert Siron, Hélène Côté, Travis Logan and Isabelle Charron

Volume 143, Number 1, Winter 2019

Colloque sur l'écologie routière et l'adaptation aux changements climatiques : de la recherche aux actions concrètes

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1054113ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1054113ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

La Société Provancher d'histoire naturelle du Canada

ISSN

1929-3208 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Bourduas Crouhen, V., Siron, R., Côté, H., Logan, T. & Charron, I. (2019). Les changements climatiques attendus et leurs impacts potentiels sur l'écologie routière au Québec. *Le Naturaliste canadien*, 143(1), 18–24. <https://doi.org/10.7202/1054113ar>

Article abstract

Climate change will have a significant impact on road ecology in Québec (Canada). Increases in temperature, precipitation and freeze/thaw cycles, and the decrease in snow cover will cause a cascade of events affecting the road network and surrounding ecosystems. This article presents an overview of the available literature illustrating these changes and their potential impacts, as well as possible adaptation measures. Amongst these impacts are the proliferation of invasive alien species along roadsides, habitat fragmentation, and an acceleration of road degradation caused by thawing permafrost. The way in which the road network and surrounding ecosystems are planned, designed, built and maintained needs to take into account the potential impacts of climate change. This requires relying on observations of past climate, and future climate projections. Informed and integrated decision-making is essential to adapt to the serious consequences of climate change.

Les changements climatiques attendus et leurs impacts potentiels sur l'écologie routière au Québec

Valérie Bourduas Crouhen, Robert Siron, Hélène Côté, Travis Logan et Isabelle Charron

Résumé

Les changements climatiques auront des répercussions importantes sur l'écologie routière au Québec (Canada). L'augmentation de la température, des précipitations, des périodes de gel et de dégel ainsi que la diminution du couvert de neige sont susceptibles d'engendrer des cascades d'événements sur le système routier et les écosystèmes environnants. L'objectif de cet article est de présenter un portrait de la littérature disponible afin d'illustrer ces changements au Québec, leurs impacts potentiels ainsi que les mesures d'adaptation possibles. Parmi les impacts potentiels des changements climatiques, on compte la prolifération d'espèces exotiques envahissantes en bordure des routes, la fragmentation des habitats ou, encore, une accélération de la dégradation des routes en raison du dégel du pergélisol. La façon de planifier, de concevoir, de construire et d'entretenir le réseau routier, y compris les écosystèmes qui l'entourent, doit donc tenir compte dès à présent de ces impacts potentiels. Cela nécessite de s'appuyer sur les observations du climat passé et sur les projections du climat futur. Une prise de décision éclairée et intégrée est primordiale afin de s'adapter aux conséquences graves des changements climatiques.

MOTS CLÉS: adaptation, changements climatiques, écosystèmes, impacts, écologie routière

Abstract

Climate change will have a significant impact on road ecology in Québec (Canada). Increases in temperature, precipitation and freeze/thaw cycles, and the decrease in snow cover will cause a cascade of events affecting the road network and surrounding ecosystems. This article presents an overview of the available literature illustrating these changes and their potential impacts, as well as possible adaptation measures. Amongst these impacts are the proliferation of invasive alien species along roadsides, habitat fragmentation, and an acceleration of road degradation caused by thawing permafrost. The way in which the road network and surrounding ecosystems are planned, designed, built and maintained needs to take into account the potential impacts of climate change. This requires relying on observations of past climate, and future climate projections. Informed and integrated decision-making is essential to adapt to the serious consequences of climate change.

KEYWORDS: adaptation, climate change, ecosystems, impacts, road ecology

Introduction

Les changements climatiques sont dorénavant indéniables et leurs impacts sur les diverses régions du Québec sont multiples et d'ampleur variable. Il va sans dire que le nord du Québec est affecté différemment du sud ou, encore, de l'est de la province. Cette distinction est importante afin de bien s'adapter aux changements annoncés par les études sur le climat. Plus particulièrement, les gestionnaires du réseau routier québécois, qui couvre un immense territoire, doivent se préparer à faire face à ces changements climatiques. Avec ses 185 000 km de routes gérées par le ministère des Transports (y compris 4 700 ponts et viaducs, 1 200 km de chemins d'accès aux ressources et 3 600 chemins de mine), le réseau routier est un moteur de l'économie québécoise (Gouvernement du Québec, 2018). Il traverse plusieurs types d'écosystèmes et niches bioclimatiques qui sont aussi modifiés par le climat. C'est pourquoi ces éléments sont traités comme un tout sous la thématique de l'écologie routière. L'écologie routière est la science qui étudie les interactions entre les routes (conception, construction, utilisation et entretien) et les écosystèmes qu'elles

traversent, dans le but d'éviter ou d'atténuer les impacts sur ces derniers (Lelièvre, 2018).

Cet article présente une brève synthèse de la littérature disponible sur les vulnérabilités et les impacts potentiels des changements climatiques au Québec ainsi que sur les mesures d'adaptation possibles pour gérer adéquatement les routes et les écosystèmes environnants.

Modéliser le climat pour comprendre le futur

Les projections du climat futur sont réalisées grâce à des modèles climatiques et nous renseignent sur l'évolution possible

Tous les auteurs sont affiliés au consortium Ouranos. Valérie Bourduas Crouhen est spécialiste en vulnérabilités, impacts et adaptation; Robert Siron est coordonnateur en écosystèmes et biodiversité et co-coordonnateur pour l'environnement nordique; Hélène Côté est spécialiste en analyses et en simulations climatiques; Travis Logan est spécialiste en scénarios et services climatiques; Isabelle Charron est responsable du transfert de connaissances.

bc.valerie@ouranos.ca

d'indicateurs du climat pour des horizons aussi lointains que 2100. Les modèles climatiques simulent le système climatique dans le temps. Ils sont constitués d'équations mathématiques, traduisant les principes de la physique et de la chimie, et reproduisent les principaux phénomènes météorologiques, hydrologiques, cryogéniques, lithographiques, océanographiques et biologiques (Ouranos, 2015). Deux principales catégories de modèles sont régulièrement utilisées : les modèles globaux du climat (MGC), dont l'étendue de la grille de calcul couvre l'ensemble du globe, et les modèles régionaux du climat (MRC) qui couvrent seulement une partie du globe, comme c'est le cas pour le modèle régional canadien de climat (MRCC5) qui en est à sa cinquième version (Ouranos, 2015). Dans le cadre d'études de vulnérabilité, d'impacts et d'adaptation aux changements climatiques, il est important d'utiliser plusieurs modèles climatiques, puisque chaque modèle, et type de modèle (MGC ou MRC), a ses forces et ses faiblesses et peut donner des résultats différents; un ensemble composé de plusieurs modèles donne donc des résultats plus fiables (Ouranos, 2015). Afin d'assurer la qualité et le partage des simulations des divers modèles à travers les institutions internationales de recherches, le projet *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) a été initié en 1995. Le projet est maintenant à la cinquième version de cet ensemble de simulations climatiques; c'est pourquoi les données climatiques sont souvent attachées à l'abréviation CMIP5.

En plus des éléments composant le système climatique, les modèles climatiques doivent prendre en compte les concentrations des divers gaz à effet de serre (GES) et des particules fines en suspension dans l'atmosphère appelées aérosols. Pour définir la valeur future de ces concentrations, on utilise des scénarios d'émissions qui décrivent différents futurs plausibles en ce qui a trait aux émissions de GES et d'aérosols. Les scénarios d'émissions dépendent de facteurs démographiques, socioéconomiques et des décisions politiques prises aux échelles locale et internationale. De ce fait, ils sont incertains au point où tenter de choisir le scénario le plus probable est, à ce jour, hasardeux. C'est pourquoi on utilise généralement plusieurs scénarios d'émissions dans l'élaboration de simulations climatiques. Les scénarios utilisés sont ceux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) appelés *Representative Concentration Pathways* (RCP) (van Vuuren et collab., 2011). Les scénarios présentés sont ceux qui permettent d'illustrer ce qui risque de se produire si les dirigeants suivent un scénario plus près de l'Accord de Paris (RCP 4.5 – scénario optimiste), ou s'ils maintiennent le *statu quo* quant aux émissions de GES (RCP 8.5 – scénario pessimiste). Enfin, l'ampleur du changement climatique pour une variable d'intérêt est estimée en calculant la différence entre les statistiques climatiques (comme les moyennes) sur une période future et celles d'une période passée de référence en fonction d'un scénario d'émission. D'une étude à l'autre, la période de référence peut varier en fonction de la disponibilité des données.

Aperçu des changements projetés

Les changements climatiques modifieront plusieurs aspects du système climatique. Les variables climatiques

présentées ici ont été choisies en fonction de leur pertinence pour le système routier et son environnement : la température, les précipitations totales, la neige, les événements de gel et de dégel ainsi que la durée de la saison de gel.

Température

Au sud du Québec et dans la région du golfe du Saint-Laurent, les températures annuelles projetées, selon un scénario de fortes émissions (RCP 8.5), augmenteront d'environ 2 à 4 °C pour la période 2041-2070 et de 4 à 7 °C pour la période 2071-2100, comparativement à la période de référence de 1971-2000. Au centre et dans le nord du Québec, pour la même période de référence, les hausses projetées sont d'environ 3 à 6 °C pour 2041-2070 et de 5 à 10 °C pour 2071-2100 (figure 1). De plus, selon les projections, les températures extrêmes maximales en été augmenteront plus que les températures moyennes estivales. De la même manière, les températures extrêmes minimales en hiver augmenteront plus que les températures moyennes hivernales (Ouranos, 2015).

Précipitations totales

Partout au Québec, les modèles climatiques s'accordent sur des hausses hivernales et printanières des précipitations totales pour la période 2041-2070 en comparaison avec la période 1971-2000, selon le scénario RCP 8.5. Par contre, les projections estivales et automnales sont moins uniformes et présentent des baisses ou des augmentations selon les régions (Ouranos, 2015).

Neige

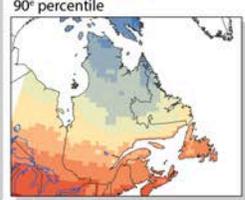
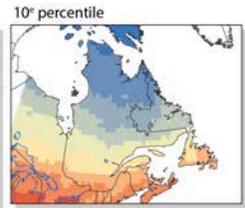
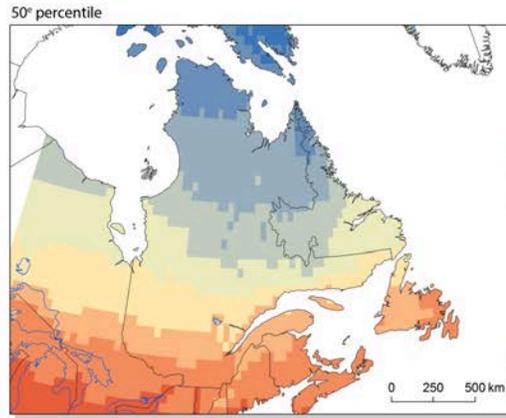
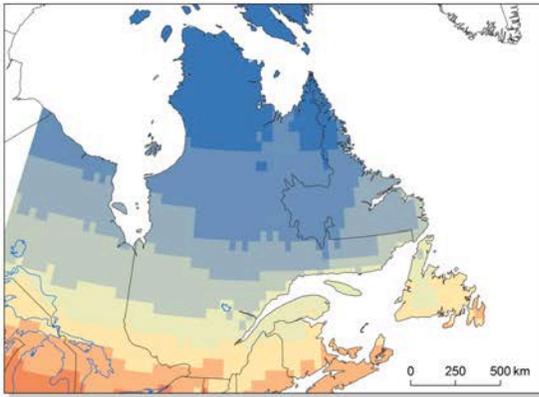
Au Québec, les températures tendent à se réchauffer et les précipitations tendent à augmenter durant la saison froide. La façon dont le couvert de neige réagira aux tendances de ces 2 variables variera selon les régions en fonction de l'altitude, du régime climatique, du type de surface et de la végétation. On peut s'attendre à une diminution de la neige au sol sur presque tout le territoire du Québec pour la période 2041-2070 (figure 2). Les changements du couvert de neige seront particulièrement importants dans le sud du Québec. L'enneigement pour cette région atteindrait dorénavant son maximum en février plutôt qu'en mars, mais avec une accumulation moindre que ce que l'on a connu dans la période 1971-2000 (Ouranos, 2015).

Cycle gel-dégel

Un épisode de gel-dégel est une journée où la température moyenne quotidienne oscille sous et au-dessus de 0 °C en 24 heures. Ces événements entraînent des redoux. Selon les projections, il y aura un déplacement de la saisonnalité des événements. Le nombre d'épisodes de gel-dégel durant les mois d'hiver (décembre-janvier-février) augmenteront, tandis que les épisodes de l'automne et du printemps seront nettement moins nombreux (Logan, 2016). Pour le sud du Québec, le RCP 8.5 prévoit 6 événements de plus durant la saison hivernale pour 2041-2070, et 9 événements de plus pour 2071-2100, par rapport à la période 1976-2005 selon la médiane de 11 scénarios climatiques (Logan, 2016).

Observations : 1971 à 2000 (CRU TS 3.21)

Horizon 2050 : RCP 8.5



Température à 2 m (°C) : ANN

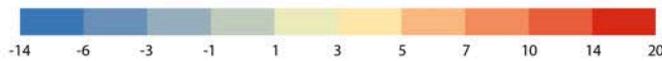
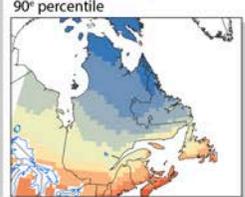
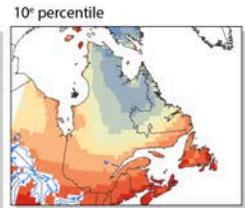
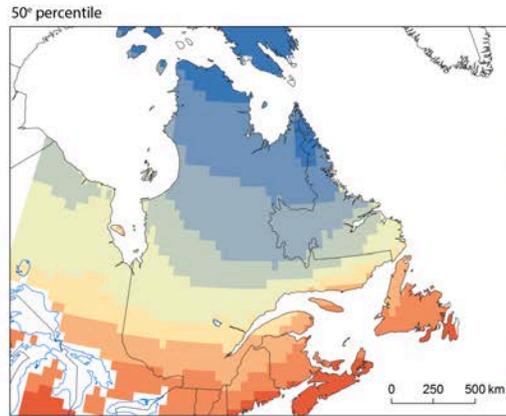
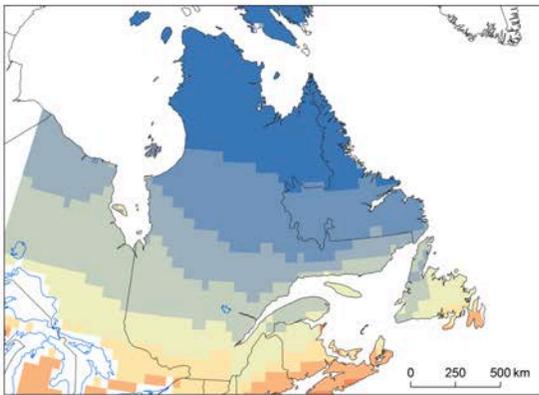


Figure 1. Températures moyennes annuelles observées pour la période 1971-2000 (panneau de gauche) et projetées pour l'horizon 2050 (2041-2070) (panneaux du centre et de droite). La moyenne observée est calculée à partir des données du *Climatic Research Unit* (Harris et collab., 2014). Les cartes des projections futures présentent la médiane de l'ensemble ainsi que les 10^e et 90^e percentiles de 29 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits en utilisant des simulations du *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5) et le RCP 8.5 (Ouranos, 2015).

Observations : 1999 à 2010 (IMS)

Horizon 2050 : RCP 8.5



Durée de l'enneigement (jours)

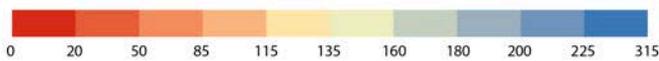


Figure 2. Durée de l'enneigement observée pour la période 1999-2010 (panneau de gauche) et projetée pour l'horizon 2050 (2041-2070) (panneaux du centre et de droite). La moyenne observée est calculée à partir des données du *Ice Mapping System* à une résolution de 24 km (IMS 24) (National Ice Center, 2008). Les cartes des projections futures présentent la médiane de l'ensemble ainsi que les 10^e et 90^e percentiles de 19 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits en utilisant des simulations du *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5) et le RCP 8.5 (Ouranos, 2015).

Saison de gel

La saison de gel est le nombre de jours entre le premier et le dernier jour de gel. Les projections montrent une forte réduction du nombre annuel de jours de gel. Ainsi, la saison de gel aura tendance à raccourcir, particulièrement dans le nord et au centre du Québec. Le premier gel sera donc plus tardif à l'automne et le dernier gel, plus hâtif au printemps (Ouranos, 2015).

À l'inverse, la saison sans gel et la saison de croissance s'allongeront. Pour le sud du Québec, selon la médiane de 11 scénarios climatiques RCP 8.5, la saison de croissance sera plus longue d'environ 27 jours en 2041-2070 et d'environ 50 jours en 2071-2100, par rapport à la période 1976-2005 (Logan, 2016).

Exemples des impacts potentiels des changements climatiques sur le réseau routier

Les changements climatiques auront des impacts sur la gestion et l'entretien du système routier (Doré et collab., 2014) en plus de conséquences sur les écosystèmes avoisinants, et ce, partout au Québec. Ils influenceront directement la durée de vie et l'usure du réseau routier (tableau 1), mais des modifications aux paysages environnants pourraient également survenir.

Espèces exotiques envahissantes

L'augmentation des températures et des précipitations, en plus de l'allongement de la saison sans gel et de croissance, vont favoriser l'arrivée et la prolifération d'espèces exotiques envahissantes (Smith et collab., 2012). C'est le cas notamment du roseau commun (*Phragmites australis*) et de la renouée japonaise (*Fallopia japonica*), des espèces implantées aux abords des autoroutes du sud de la province et le long du fleuve Saint-Laurent (Groeneveld et collab., 2014; Groupe Phragmites, 2012).

En présence de conditions climatiques plus favorables à la reproduction de ces plantes, les fossés de drainage des routes représentent des voies importantes de dissémination des espèces (Brisson et collab., 2010; Groeneveld et collab., 2014; Groupe Phragmites, 2012; Lelong et collab., 2009; Tougas-Tellier et collab., 2013). Il y a alors un risque de formation de communauté végétale monospécifique au détriment d'une biodiversité plus grande (Mal et Narine, 2004). Il est donc important d'en tenir compte, notamment dans le cas de travaux d'aménagement et d'entretien le long des routes et autoroutes, qui sont susceptibles de perturber les sols et les

habitats naturels et de laisser, ainsi, un terrain dénudé propice aux plantes envahissantes (Tougas-Tellier et collab., 2013).

Fragmentation des habitats

La fragmentation des écosystèmes dans le sud du Québec, résultant des effets cumulatifs du réseau routier, de l'urbanisation et de l'agriculture intensive en combinaison avec la hausse des températures, est susceptible de dégrader les habitats propices à la faune en bordure des routes (Gonzalez et collab., 2013). Cette perte de connectivité écologique, qui a déjà des conséquences négatives importantes pour certaines espèces, pourrait être exacerbée par des changements dans la répartition des espèces au Québec et dans leur capacité à se déplacer en fonction des modifications que subiront leurs niches bioclimatiques (Berteaux et collab., 2014; Gonzalez et collab., 2013).

Exploitation des ressources forestières

Le raccourcissement des hivers ainsi que la réduction du couvert de neige auront des impacts sur l'exploitation de la forêt boréale (Gauthier et collab., 2014). En effet, le transport du bois sur les chemins forestiers, en hiver, pourrait être compromis avec des hivers plus courts, mais également en raison des changements dans le régime des précipitations qui pourraient limiter l'accès aux ressources (Gauthier et collab., 2014). De plus, durant l'été, les travaux en forêts seront limités par les risques de feux de forêt qui sont appelés à augmenter dans le futur à cause des changements climatiques. Ces feux affecteront autant les routes que leur environnement avoisinant et engendreront des risques accrus pour la sécurité publique (Gauthier et collab., 2014).

Tableau 1. Synthèse de certains effets anticipés des changements climatiques sur les chaussées (adapté de Ouranos, 2015).

Causes	Impacts possibles sur les chaussées	Impacts possibles sur les milieux naturels adjacents à la chaussée
Augmentation de la température dans les régions froides et augmentation du nombre de redoux hivernaux	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de l'indice de gel en hiver. • Diminution de la profondeur de gel qui entraîne moins de détérioration des chaussées due au soulèvement par le gel. • Diminution de la fissuration thermique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dégradation du pergélisol et de la stabilité du sol dans le nord du Québec.
	<ul style="list-style-type: none"> • Possible augmentation des dommages dus au dégel partiel des fondations (ornéage ainsi que fissuration et affaiblissement des chaussées). 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des dommages par les chemins forestiers en raison des redoux plus fréquents.
Augmentation des températures chaudes extrêmes	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des ornières de fluage. 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la présence d'espèces envahissantes. • Possibilité de sécheresse et de feux de forêt.
Modification du régime des précipitations	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation du niveau de la nappe phréatique provoquant un affaiblissement des couches structurales et diminution de la durée de vie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lessivage plus fréquent des surfaces routières entraînant une contamination des écosystèmes adjacents.
Augmentation de la fréquence et de l'intensité des pluies extrêmes	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la teneur en eau dans les sols des chaussées immédiatement après les pluies. • Augmentation de la teneur en eau dans les sols des chaussées et réduction de leur rigidité. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de la connectivité potentielle des habitats rendant le passage des animaux plus difficile (zones inondées).

Vulnérabilité des infrastructures routières

Au nord du Québec, en raison de la hausse des températures, le dégel du pergélisol et des routes de glace entraîne de graves problèmes d'entretien pour le système routier, mais également une modification importante des habitats et de l'intégrité des écosystèmes adjacents, les écosystèmes nordiques étant déjà très vulnérables aux changements climatiques (Allard et Pollard, 2011; Allard et collab., 2013; Berteaux et collab., 2017).

Partout au Québec, les changements dans les régimes de précipitations pourraient augmenter la contamination des milieux naturels adjacents aux routes en raison du lessivage plus fréquent des résidus, tels que de l'huile ou de l'essence, laissés par le passage des véhicules (Ogden et Innes, 2007).

Dans la région du golfe du Saint-Laurent, une partie du patrimoine bâti et des infrastructures routières côtières est menacée par l'érosion et la submersion marine, en raison de l'augmentation des températures qui joue un rôle important dans la réduction de la présence de glace sur la côte (Savard et collab., 2008; Senneville et collab., 2014). Cela permet alors aux vagues de déferler avec plus d'énergie lors de tempêtes et augmente les dommages aux infrastructures de transport terrestre et maritime, comme les routes côtières, les ports et de nombreux bâtiments commerciaux, en accélérant l'érosion des berges friables et la destruction des écosystèmes côtiers (Circé et collab., 2016; Savard et collab., 2008).

Mesures d'adaptation envisageables

Afin de contrer les impacts potentiels des changements climatiques, il faut s'adapter aux conditions futures anticipées. L'adaptation aux changements climatiques, contrairement à l'adaptation biologique des espèces, est un domaine de recherche qui étudie comment les systèmes existants, naturels et humains, feront face aux changements climatiques et comment prendre en considération les changements climatiques dans le développement durable de la société (Ouranos, 2015). L'adaptation permet la mise en œuvre de mesures qui préviendront ou réduiront les conséquences potentielles des changements climatiques. C'est un processus itératif qui permet des ajustements dans le temps pour composer avec un climat en évolution rapide (Ouranos, 2015). Pour l'écologie routière, des stratégies concertées dans le domaine de l'aménagement du territoire pourraient contribuer à diminuer les vulnérabilités du système routier et de son environnement avoisinant. Pour ce faire, des comportements préventifs doivent être adoptés pour s'assurer que les usagers du réseau routier soient prêts à faire face aux aléas climatiques (Doré et collab., 2014).

En fonction des impacts mentionnés précédemment, certaines mesures d'adaptation sont d'ailleurs déjà mises en œuvre. Par exemple, pour faire face à l'expansion des espèces exotiques envahissantes, des outils ont été développés combinant les modèles climatiques et écologiques pour

assurer le suivi des populations et limiter les possibilités de propagation (de Blois et collab., 2013; Tougas-Tellier et collab., 2013). Plusieurs guides de bonnes pratiques existent et proposent des moyens permettant d'éviter la propagation des espèces exotiques envahissantes d'un milieu à l'autre. Ces bonnes pratiques sont, par exemple, de ne pas laisser des terres dénudées à la suite des interventions en bordure de route, puisqu'elles favorisent l'envahissement potentiel, particulièrement en milieux humides (Tougas-Tellier et collab., 2013). La plantation d'espèces indigènes à croissance rapide avec une certaine diversité fonctionnelle peut contrer l'expansion des espèces envahissantes (Byun et collab., 2018).

Dans le cadre de la mise en œuvre de mesures d'adaptation aux changements climatiques, il faut éviter le piège de la maladaptation. Ce concept désigne la mise en place de mesures inadéquates qui augmentent directement la vulnérabilité à la variabilité et aux changements climatiques (Magnan, 2013; Noble et collab., 2014). Par exemple, lorsqu'une espèce exotique envahit un territoire en raison de températures plus clémentes au Québec, un traitement chimique pour contrer cette invasion éliminera l'espèce, mais dégradera également la qualité et la résilience de l'environnement et posera un risque pour la santé humaine, rendant ainsi le milieu toujours aussi vulnérable aux aléas climatiques (Tougas-Tellier et collab., 2013).

Pour minimiser la fragmentation des habitats, plusieurs outils existent pour appuyer la prise de décision et la planification du territoire en tenant compte des services écologiques provenant des écosystèmes, de leur valeur économique et de leur évolution avec les changements climatiques (Fournier et collab., 2013; Gonzalez et collab., 2013). Le respect des corridors écologiques lors de la conception des routes est une autre mesure bénéfique (Gonzalez et collab., 2013).

La conservation des milieux humides fait aussi partie des mesures à considérer. Ces écosystèmes procurent des services écologiques qui atténuent les impacts des changements climatiques, notamment sur le régime hydrologique, en régulant les crues et les inondations, de même que la rétention d'eau lors des périodes d'étiages (Biron et collab., 2013; Dupras et collab., 2013; Fournier et collab., 2013; Pellerin et Poulin, 2013). La protection des milieux humides contribue également à la connectivité des milieux et au renforcement de la résilience des écosystèmes en limitant les impacts des changements climatiques, dont ceux sur les routes et le milieu environnant.

En milieu forestier, une mesure d'adaptation pertinente serait de limiter la densité des routes permanentes et de réhabiliter les chemins forestiers temporaires à la suite de leur usage (Ogden et Innes, 2007). Ainsi, la plantation d'arbres dans ces chemins temporaires permettrait de favoriser la reprise de la production forestière, de limiter les terrains exposés aux aléas climatiques ainsi qu'au lessivage de sédiments et de limiter les invasions possibles d'espèces envahissantes (Ogden et Innes, 2007). Cependant, dans les endroits où les routes sont essentielles, il faut revoir les standards de construction afin de

s'assurer de limiter leurs impacts sur les cours d'eau, pour conserver l'habitat du poisson, et ce, en fonction des nouveaux régimes de précipitations et de crue (Ogden et Innes, 2007).

Au nord du Québec, des mesures de suivi du pergélisol ont été mises en place afin d'identifier les zones de dégel importantes et ainsi adapter le réseau routier en évitant ces zones plus vulnérables susceptibles à l'affaissement et aux glissements de terrain (L'Héroult et collab., 2013; Ogden et Innes, 2007). Cela a permis de proposer des techniques de construction adaptées pour les terrains aménageables, dont l'adaptation des remblais des routes, qui doivent être conçus pour minimiser l'accumulation de la neige et ainsi réduire son effet isolant sur le pergélisol (Lanouette et collab., 2015). Les travaux effectués au Nunavik indiquent que les pentes douces avec un meilleur drainage favorisent le déplacement de la neige tout en maximisant le refroidissement du pergélisol sous-jacent (Lanouette et collab., 2015). Ces connaissances ont notamment été utilisées pour les pistes d'atterrissage en combinaison avec de nouvelles technologies, comme la mesure de température linéairement distribuée à l'aide de fibre optique pour surveiller l'évolution de la température du sol et capter les premiers signes de dégradation du pergélisol, afin d'intervenir plus rapidement (Gouvernement du Québec, 2017; Roger et collab., 2015).

Pour les milieux côtiers, plusieurs mesures d'adaptation sont possibles afin de protéger les routes et les écosystèmes côtiers. Il peut s'agir, par exemple, de structures côtières rigides (mur et enrochement), mobiles (recharge de plage et dunes végétalisées) ou encore des options sans structure (concentrées sur les actifs à risque et non sur le milieu) (Circé et collab., 2016). Le calcul des coûts et des avantages de ces différentes mesures aide à choisir la solution d'adaptation la plus appropriée selon la situation (Circé et collab., 2016). Ce type de calcul démontre d'ailleurs qu'une structure rigide comme un mur n'est souvent pas la meilleure option d'adaptation (Circé et collab., 2016).

Conclusion

Dans un climat qui change rapidement, les mesures d'adaptation requièrent l'implication de tous les acteurs clés du secteur, autant gouvernementaux que locaux. Ces mesures doivent s'appuyer sur des projections climatiques solides et être mises en œuvre dans une perspective écosystémique, qui considère les besoins du réseau routier ainsi que la nécessité de préserver les milieux naturels qu'il traverse (Torres et collab., 2016), afin de maintenir les services écologiques cruciaux pour l'adaptation aux changements climatiques.

Remerciements

Nous remercions les réviseurs scientifiques et l'équipe du *Naturaliste canadien* pour leurs précieux commentaires dans l'élaboration de cet article. Une grande majorité des projets cités dans cet article ont été financés par Ouranos par le biais du programme Écosystèmes et Biodiversité en collaboration avec le Fonds vert du gouvernement du Québec ainsi que Ressources naturelles Canada. Les activités d'Ouranos sont financées par le ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation du Québec. ◀

Références

- ALLARD, M. et W. POLLARD, 2011. Permafrost and climate change in northern coastal Canada. Ouranos, Montréal, 19 p. Disponible en ligne à : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportAllard2011_EN.pdf.
- ALLARD, M., M. LEMAY, C. BARRETTE, E. L'HÉRAULT et D. SARRAZIN, 2013. Le pergélisol et les changements climatiques au Nunavik et au Nunatsiavut : importance en matière d'infrastructures municipales et de transports. Dans : ALLARD M. et M. LEMAY (édit.). Le Nunavik et les Nunatsiavut : de la Science aux Politiques Publiques : Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation. ArcticNet, Québec, p. 175-199. Disponible en ligne à : http://www.arcticnet.ulaval.ca/pdf/media/iris_report_complete-fr.pdf.
- BERTEAUX, D., N. CASAJUS et S. DE BLOIS, 2014. Changements climatiques et biodiversité du Québec : vers un nouveau patrimoine naturel. Presses de l'Université du Québec, Québec, 240 p.
- BERTEAUX, D., G. GAUTHIER, F. DOMINE, R.A. IMS, S.F. LAMOUREUX, E. LÉVESQUE et N. YOCOZO, 2016. Effects of changing permafrost and snow conditions on tundra wildlife: critical places and times. *Arctic Science*, 3: 65-90. doi:10.1139/as-2016-0023.
- BIRON, P., T. BUFFIN-BÉLANGER, M. LAROQUE, S. DEMERS, T. OLSEN, M.-A. OUELLET, G. CHONÉ, C.-A. CLOUTIER et M. NEEDELMAN, 2013. Espace de liberté : un cadre de gestion intégrée pour la conservation des cours d'eau dans un contexte de changements climatiques. Ouranos, Montréal, 140 p. Disponible en ligne à : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportBironetal2013_FR.pdf.
- BRISSON, J., S. DE BLOIS et C. LAVOIE, 2010. Roadside as invasion pathway for common reed (*Phragmites australis*). *Invasive Plant Science and Management*, 3: 506-514. doi:10.1614/IPSM-09-050.1.
- BYUN, C., S. DE BLOIS et J. BRISSON, 2018. Management of invasive plants through ecological resistance. *Biological Invasions*, 20: 13-27. doi:10.1007/s10530-017-1529-7.
- CIRCÉ, M., L. DA SILVA, U. BOYER-VILLEMAIRE, G. DUFF, C. DESJARLAIS et F. MORNEAU, 2016. Analyse coûts-avantages d'options d'adaptation en zone côtière au Québec - Rapport synthèse. Ouranos, Montréal, 92 p. Disponible en ligne à : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/Rapport-Synthese_Qc.pdf.
- DE BLOIS, S., L. BOISVERT-MARSH, R. SCHMUCKI, C.-A. LOVAT, C. BYUN, P. GOMEZ-GARCIA, R. OTFINOWSKI, E. GROENEVELD et C. LAVOIE, 2013. Outils pour évaluer les risques d'invasion biologique dans un contexte de changements climatiques. Ouranos, Montréal, 80 p. Disponible en ligne à : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportdeBlois2013_FR.pdf.
- DORÉ, G., J.-P. BILODEAU, P.M. THIAM et F. DROLET PERRON, 2014. Impact des changements climatiques sur les chaussées des réseaux routiers québécois. Ouranos, Montréal, 63 p. Disponible en ligne à : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportDore2014_FR.pdf.
- DUPRAS, J., J.-P. REVÉRET et J. HE, 2013. L'évaluation économique des biens et services écosystémiques dans un contexte de changements climatiques. Ouranos, Montréal, 218 p. Disponible en ligne à : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportReveret2013_FR.pdf.
- FOURNIER, R., M. POULIN, J.-P. REVÉRET, A. ROUSSEAU et J. THÉAU, 2013. Outils d'analyses hydrologique, économique et spatiale des services écologiques procurés par les milieux humides des basses terres du Saint-Laurent : adaptations aux changements climatiques. Ouranos, Montréal, 114 p. Disponible en ligne à : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportFournier2013_FR.pdf.
- GAUTHIER, S., P. BERNIER, P.J. BURTON, J. EDWARDS, K. ISAAC, N. ISABEL, K. JAYEN, H. LE GOFF et E.A. NELSON, 2014. Climate change vulnerability and adaptation in the managed Canadian boreal forest. *Environmental Reviews*, 22: 256-285. doi:10.1139/er-2013-0064.

- GONZALEZ, A., C. ALBERT, B. RAYFIELD, M. DUMITRU, A. DABROWSKI, E.M. BENNETT, J. CARDILLE et M.J. LECHOWICZ, 2013. Corridors, biodiversité et services écologiques : un réseau écologique pour le maintien de la connectivité et une gestion résiliente aux changements climatiques dans l'ouest des Basses-Terres du Saint-Laurent. Ouranos, Montréal, 68 p. Disponible en ligne à : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportGonzalez2014_EN.pdf.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2017. Construction d'habitations au Nunavik : Guide de bonnes pratiques. Société d'habitation du Québec, Québec, 98 p. Disponible en ligne à : <http://www.habitation.gouv.qc.ca/fileadmin/internet/publications/0000024197.pdf>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2018. Information sur le réseau routier. Disponible en ligne à : <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/projets-infrastructures/info-reseau-routier/Pages/information-sur-le-reseau-routier.aspx>. [Visité le 2018-02-12].
- GROENEVELD, E., F.Ç. BELZILE et C. LAVOIE, 2014. Sexual reproduction of Japanese knotweed (*Fallopia japonica* S.L.) at its northern distribution limit: New evidence of the effect of climate warming on an invasive species. *American Journal of Botany*, 101 : 459-466. doi:10.3732/ajb.1300386.
- GROUPE PHRAGMITES, 2012. Le roseau envahisseur : la dynamique, l'impact et le contrôle d'une invasion d'envergure. *Le Naturaliste canadien*, 136 (3) : 33-39. doi:10.7202/1009238ar.
- HARRIS, I., P.D. JONES, T.J. OSBORN et D.H. LISTER, 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34 : 623-642. doi:10.1002/joc.3711.
- LANOUILLE, F., G. DORÉ, D. FORTIER et C. LEMIEUX, 2015. Influence of snow cover on the ground thermal regime along an embankment built on permafrost: In-situ measurements. 68^e Conférence Canadienne de Géotechnique et 7^e Conférence Canadienne sur le Pergélisol, 20 au 23 septembre 2015, Québec, 7 p. Disponible en ligne à : https://www.researchgate.net/publication/282611662_Influence_of_snow_cover_on_the_ground_thermal_regime_along_an_embankment_built_on_permafrost_in-situ_measurements.
- LELIÈVRE, M., 2018. Message des comités de direction et de programmation. *Le Naturaliste canadien*, 143 (1) : 3-4.
- LELONG, B., C. LAVOIE et M. THÉRIAULT, 2009. Quels sont les facteurs qui facilitent l'implantation du roseau commun (*Phragmites australis*) le long des routes du sud du Québec ? *Écoscience*, 16 : 224-237. doi:10.2980/16-2-3237.
- L'HÉRAULT, E., M. ALLARD, D. FORTIER, A. CARBONNEAU, J. DOYON-ROBITAILLE, M.-P. LACHANCE, M.-A. DUCHARME, K. LARRIVÉE, K. GRANDMONT et C. LEMIEUX, 2013. Production de cartes des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik. Ouranos, Montréal, 90 p. Disponible en ligne à : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportAllard2013_FR.pdf.
- LOGAN, T., 2016. Portrait des changements climatiques pour les zones urbaines du Québec. Ouranos, Montréal, 146 p. Disponible en ligne à : <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportLogan2016.pdf>.
- MAGNAN, A., 2013. Éviter la maladaptation au changement climatique. Institut du développement durable et des relations internationales, Policy Brief n° 8, 4 p. Disponible en ligne à : https://www.iddri.org/sites/default/files/import/publications/pb0813_am_maladaption.pdf.
- MAL, T.K. et L. NARINE, 2004. The biology of Canadian weeds. 129. *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. *Canadian Journal of Plant Science*, 84 : 365-396. doi:10.4141/P01-172.
- NATIONAL ICE CENTER, 2008. IMS daily Northern Hemisphere snow and ice analysis at 4 km and 24 km resolution. National Snow and Ice Data Center, Boulder, Colorado, USA. Disponible en ligne à : <http://nsidc.org/data/G02156>. [Visité le 2018-02-12].
- NOBLE, I.R., S. HUQ, Y.A. ANOKHIN, J. CARMIN, D. GOUDOU, F.P. LANSIGAN, B. OSMAN-ELASHA et A. VILLAMIZAR, 2014. Adaptation needs and options. Dans : FIELD, C.B., V.R. BARROS, D.J. DOKKEN, K.J. MACH, M.D. MASTRANDREA, T.E. BILIR, M. CHATTERJEE, K.L. EBI, Y.O. ESTRADA, R.C. GENOVA, B. GIRMA, E.S. KISSEL, A.N. LEVY, S. MACCRACKEN, P.R. MASTRANDREA et L. L. WHITE (édit.), *Climate change 2014 : Impacts, adaptation and vulnerability. Part A : Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA, Cambridge University Press, p. 833-868. Disponible en ligne à : <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.
- OGDEN, A.E. et J. INNES, 2007. Incorporating climate change adaptation considerations into forest management planning in the boreal forest. *International Forestry Review*, 9 : 713-733. doi:10.1505/ifer.9.3.713.
- OURANOS, 2015. Vers l'adaptation — Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec - Édition 2015. Ouranos, Montréal, 417 p. Disponible en ligne à : <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/SyntheseRapportfinal.pdf>.
- PELLERIN, S. et M. POULIN, 2013. Analyse de la situation des milieux humides au Québec et recommandations à des fins de conservation et de gestion durable. Centre de la biodiversité du Québec, Québec, 140 p. Disponible en ligne à : <http://www.mdelcc.gouv.qc.ca/eau/rives/Analyse-situation-milieux-humides-recommandations.pdf>.
- ROGER, J., M. ALLARD, D. SARRAZIN, E. L'HÉRAULT, G. DORÉ et A. GUIMOND, 2015. Evaluating the use of Distributed Temperature Sensing for permafrost monitoring in Salluit, Nunavik. Dans : 68th Canadian geotechnical conference and 7th Canadian permafrost conference. doi:10.13140/RG.2.1.4273.7365.
- SAVARD, J.-P., P. BERNATCHEZ, F. MORNEAU, F. SAUCIER, P. GACHON, S. SENNEVILLE, C. FRASER et Y. JOLIVET, 2008. Étude de la sensibilité des côtes et de la vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques : Synthèse des résultats. Ouranos, Montréal, 58 p. Disponible en ligne à : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportSavard2008_FR.pdf.
- SENNEVILLE, S., S. ST-ONGE DROUIN, D. DUMONT, M.-C. BIHAN-POUDEEC, Z. BELEMAALEM, M. CORRIVEAU, P. BERNATCHEZ, S. BÉLANGER, S. TOLSZCZUK-LECLERC et R. VILLENEUVE, 2014. Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques. ISMER-UQAR, Rimouski, 384 p. Disponible en ligne à : <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1147874.pdf>.
- SMITH, A.L., N. HEWITT, N. KLENK, D.R. BAZELY, N. YAN, S. WOOD, I. HENRIQUES, J.I. MACLELLAN et C. LIPSIG-MUMMÉ, 2012. Effects of climate change on the distribution of invasive alien species in Canada: a knowledge synthesis of range change projections in a warming world. *Environmental Reviews*, 20 : 1-16. doi:10.1139/a11-020.
- TORRES, A., J.A.G. JAEGER et J.C. ALONSO, 2016. Assessing large-scale wildlife responses to human infrastructure development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113 : 8472-8477. doi:10.1073/pnas.1522488113.
- TOUGAS-TELLIER, M.-A., J. MORIN, D. HATIN et C. LAVOIE, 2013. Impacts des changements climatiques sur l'expansion du roseau envahisseur dans les frayères du fleuve Saint-Laurent. Ouranos, Montréal, 56 p. Disponible en ligne à : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportLavoie2013_FR.pdf.
- VAN VUUREN, D.P., J. EDMONDS, M. KAINUMA, K. RIAHI, A. THOMSON, K. HIBBARD, G.C. HURTT, T. KRAM, V. KREY, J.-F. LAMARQUE, T. MASUI, M. MEINSHAUSEN, N. NAKICENOVIC, S.J. SMITH et S.K. ROSE, 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109 : 5-31. doi:10.1007/s10584-011-0148-z.