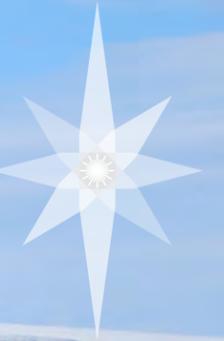


CHAPITRE 3

Dynamique des écosystèmes terrestres et réponse aux changements

Sentinelle
Nord





Sentinelles Nord est rendu possible grâce à un soutien financier majeur du Fonds d'excellence en recherche Apogée Canada.

Canada



Le programme est aussi partiellement soutenu par le Fonds de recherche du Québec.

Québec
Fonds de recherche – Nature et technologies
Fonds de recherche – Santé
Fonds de recherche – Société et culture

Ce document doit être cité comme suit :

Sentinelles Nord. (2023). Des molécules aux réseaux trophiques: dynamique des écosystèmes terrestres du Nord en réponse aux changements environnementaux. Compendium de recherche 2017-2022. Environnement, Santé, Innovation. Sentinelles Nord, Université Laval, Québec, Québec, Canada. ISBN: 978-1-7380285-8-0 (PDF). URL: hdl.handle.net/20.500.11794/123783

Dans le contexte de l'accélération des changements climatiques et du développement socio-économique dans les régions arctiques et subarctiques, le programme de recherche Sentinelles Nord de l'Université Laval contribue à générer les connaissances nécessaires pour améliorer notre compréhension de l'environnement nordique en changement et de son impact sur les humains et leur santé. Le programme favorise la convergence des expertises en ingénierie, en sciences naturelles, en sciences sociales et en sciences de la santé afin de catalyser la découverte scientifique et l'innovation technologique en appui à la santé et au développement durable dans le Nord.

Ce compendium présente une sélection de résultats du programme de recherche Sentinelles Nord, depuis son lancement en 2017 jusqu'à la fin de sa première phase en 2022. Les résultats sont issus de projets de recherche innovants et de publications originales évaluées par des pairs, qui ont été intégrés dans cinq chapitres interdisciplinaires traitant des principaux enjeux nordiques. Malgré l'ampleur et la complexité de ces enjeux, chaque chapitre du compendium vise à apporter de nouvelles perspectives grâce au processus d'intégration et à combler les lacunes fondamentales dans nos connaissances sur le Nord en changement.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction
7

Chimio-diversité nordique : une
signature moléculaire distinctive
11

Le verdissement : des répercussions
multiples dans un environnement
interconnecté
13

Des communautés animales
en pleine mutation
15

De nouvelles technologies pour étudier
les lemmings : un pas de plus pour mieux
comprendre une espèce clé de l'Arctique
17

Prédire les interactions,
la vulnérabilité et la résilience des
écosystèmes grâce à de nouvelles
approches de modélisation
19

Enjeux pour la conservation des
ressources et de la biodiversité
21

Références
31



Des molécules aux réseaux trophiques : dynamique des écosystèmes terrestres du Nord en réponse aux changements environnementaux

Introduction

Les écosystèmes terrestres arctiques et subarctiques font face à d'importantes transformations écologiques en réponse aux changements climatiques. Des comparaisons répétées de photographies aériennes et des analyses de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI, un indicateur de la production primaire) obtenues à partir d'images satellites révèlent un verdissement généralisé, mais hétérogène, de l'Arctique et du subarctique (AMAP, 2021), ce qui a des répercussions sur d'autres composantes biotiques et abiotiques du paysage. Les conséquences de ces changements ne sont pas uniformes entre les espèces et les écosystèmes, ce qui peut perturber les interactions trophiques. Dans ce contexte, il devient nécessaire d'accroître notre compréhension des effets des changements climatiques à chaque niveau d'organisation, du moléculome à l'écosystème, ainsi qu'entre les différents écosystèmes.

Les conditions difficiles des environnements arctique et subarctique imposent des contraintes uniques aux organismes qui les habitent comme les micro-organismes, les lichens, les mousses et d'autres espèces végétales. Parmi les adaptations biochimiques uniques qu'ils ont mises au point pour se protéger contre les basses températures, les vents forts, les sols pauvres en nutriments et les rayons UV intenses se trouvent des molécules bioactives ayant des applications pharmaceutiques (Tian et coll., 2017; [Carpentier et coll., 2017](#); [Bérubé et coll., 2019](#); [Séguin et coll., 2023](#)). Le moléculome, c'est-à-dire l'ensemble des composés phytochimiques produits par une plante, n'a été décrit que pour une très faible proportion des espèces présentes dans le Nord canadien (N. Voyer, communication personnelle), et il est urgent d'élargir ce travail à mesure que les changements climatiques modifient les patrons de croissance et de répartition des espèces.



Caractérisé par une végétation à croissance faible et lente (Payette et coll., 2018), le biome de la toundra est vulnérable au changement. Les lichens, en particulier, sont menacés par l'expansion rapide des arbustes érigés. Le bouleau glanduleux (*Betula glandulosa*) et d'autres espèces arbustives ont une croissance accélérée dans la toundra en raison de l'augmentation des températures, des changements dans la dynamique de la neige, du dégel du pergélisol, des perturbations et du broutage par les herbivores (Mekonnen et coll., 2021). Cette tendance au verdissement, aussi appelée arbustation, se produit au détriment des lichens à croissance lente (Chagnon et Boudreau, 2019) et peut affecter les espèces animales qui utilisent à la fois le lichen et le bouleau glanduleux comme source de nourriture à différents moments de l'année (Béland, 2022). La croissance accélérée des espèces arbustives modifie également les caractéristiques du paysage, par exemple en modifiant l'albédo et en créant une voûte qui influe sur la température du sol, l'épaisseur du pergélisol, l'hydrologie et l'habitat de nombreuses espèces animales (Pelletier et coll., 2018; Young et coll., 2020; Domine et coll., 2022).

Bien que les changements climatiques aient une incidence sur les espèces, ils en ont également sur le réseau de liens trophiques qu'entretiennent ces dernières au sein d'un écosystème. L'un des défis auxquels les écologues font face aujourd'hui est de comprendre la manière dont les communautés se réorganiseront à la suite de la réponse individuelle de chaque espèce aux changements climatiques (Woodward et coll., 2010). Un découplage spatial ou temporel peut séparer des espèces qui interagissaient auparavant (Schleuning et coll., 2020), tandis que des interactions peuvent apparaître en raison de nouvelles cooccurrences spatiales (Gilman et coll., 2010). Dans le Haut-Arctique canadien, par exemple, plusieurs vertébrés de la toundra ont peu réagi au réchauffement climatique comparativement aux plantes et aux arthropodes (Gauthier et coll., 2013). Certaines espèces migrent plus rapidement que d'autres (Svenning et coll., 2014), ce qui rompt la cohérence des réseaux d'interaction. Les interactions trophiques peuvent également modifier les effets de perturbations comme les changements climatiques et propager ceux-ci à des groupes d'organismes qui n'auraient pas été touchés autrement (Labadie et coll., 2021). Par conséquent, davantage d'études intégrant de multiples niveaux trophiques et dynamiques temporelles sont nécessaires pour améliorer notre compréhension de la répartition des espèces et de la façon dont elles réagiront aux changements (Woodward et coll., 2010).

Grâce à la modélisation, les équipes de recherche peuvent appliquer les connaissances qu'elles acquièrent sur les populations végétales et animales à des questions urgentes concernant la vulnérabilité et la résilience des écosystèmes arctiques et subarctiques. Les modèles peuvent prédire la stabilité globale d'un écosystème (Brose et coll., 2019) ou les effets que différents scénarios de changements climatiques auront sur la répartition des espèces (Bourderbala et coll., 2023). Les modèles doivent inclure la variation saisonnière pour prévoir les changements futurs (Tonkin et coll., 2017), en particulier dans les réseaux trophiques de l'Arctique où les espèces migratrices jouent un rôle important (Hutchison et coll., 2020). Cependant, à mesure que la complexité d'un modèle augmente pour mieux représenter les réalités des écosystèmes du monde réel, les défis mathématiques s'accroissent. Des scientifiques de diverses disciplines, notamment de la physique et des mathématiques, se sont joints à des écologues pour trouver des solutions, comme l'utilisation de la théorie spectrale des graphes qui permet de réduire la complexité des modèles (Laurence et coll., 2019) ou prévoir les changements dans des systèmes complexes en utilisant l'apprentissage profond et les réseaux neuronaux (Laurence et coll., 2020).

Qu'il s'agisse du verdissement de la toundra (Mekonnen et coll., 2021) ou des changements au sein des réseaux trophiques (Labadie et coll., 2021), la transformation des écosystèmes terrestres arctiques et subarctiques causée par les changements climatiques est visible et s'accélère. Les travaux des équipes de recherche de Sentinelle Nord décrits dans ce chapitre examinent ces effets à différentes échelles d'organisation, des molécules à la dynamique des populations et au réseau d'interactions entre les espèces. Par-dessus tout, cette recherche vise à relever les défis urgents de la conservation et de l'utilisation des ressources en évaluant les méthodes actuelles de surveillance de la biodiversité et des populations fauniques (LeTourneux et coll., 2022; Terrigeol et al., 2022; Bolduc et coll., 2023), en élaborant des outils novateurs (Bolduc et coll., 2022), ainsi qu'en travaillant conjointement avec les collectivités du Nord, dont bon nombre dépendent d'activités de récolte traditionnelles (p. ex., Séguin et coll., 2023; Letourneux et coll., 2021; Bates et coll., 2021). Pour faire face aux défis des changements climatiques et de la perte de biodiversité, une compréhension approfondie et intégrée de ces écosystèmes terrestres est nécessaire, à l'instar de l'approche interdisciplinaire mise de l'avant par Sentinelle Nord.

🔍 MOTS CLÉS :

Réseaux trophiques, Arbustation, Moléculome, Modélisation, Migration, Toundra, Dynamique des populations





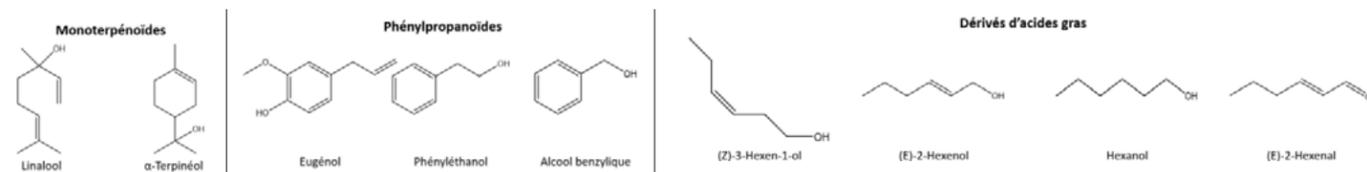
1. Chimio-diversité nordique : une signature moléculaire distinctive

Sélection de faits saillants de la recherche

Les espèces végétales qui colonisent les environnements arctiques et subarctiques sont porteurs d'une chimio-diversité unique encore méconnue qui pourrait révéler des molécules aux propriétés médicinales d'intérêt. Cette chimio-diversité est toutefois menacée par les changements climatiques, dont les effets entraînent une modification de la répartition des espèces végétales et de leurs milieux.

1.1 La toute première investigation phytochimique de la fraction volatile du bouleau glanduleux (*Betula glandulosa*) a été récemment réalisée, révélant une composition moléculaire comportant à la fois des terpénoïdes, des dérivés d'acides gras et de phénylpropanoïdes (Figure 1.1), mais également une composition en métabolites volatils différente de ses conspécifiques du genre *Betula*. Cette espèce arbustive étant une source de nourriture importante pour de nombreux herbivores et un élément structurant du paysage, une meilleure connaissance de sa composition moléculaire est nécessaire afin de comprendre certains éléments de son rôle fonctionnel dans l'écosystème (Séguin et coll., 2021).

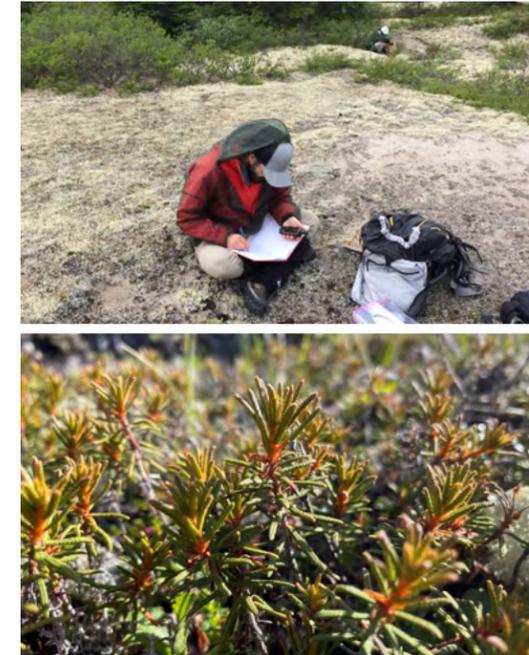
Figure 1.1
Structures des métabolites principaux des extraits volatils de *Betula glandulosa*.
© Jean-Christophe Séguin



1.2 Deux nouveaux dibenzofuranes et 11 autres métabolites lichéniques ont été isolés et identifiés grâce aux investigations phytochimiques réalisées sur le lichen *Stereocaulon paschale*. Certains de ces métabolites ont montré une activité antibactérienne prometteuse contre les bactéries pathogènes buccales *Porphyromonas gingivalis* et *Streptococcus mutans* (Carpentier et coll., 2017).

1.3 La synthèse chimique de mortiamides naturelles d'un champignon appartenant au genre *Mortierella* a dévoilé une activité prometteuse de ces molécules contre le parasite *Plasmodium falciparum*, responsable de 50 % des cas de malaria. Ces résultats sont particulièrement intéressants en raison de la résistance accrue de *Plasmodium sp.* aux médicaments actuellement utilisés. Les travaux se poursuivent pour préparer des analogues de la mortiamide D, afin d'accroître son efficacité contre *P. falciparum* (Bérubé et coll., 2019).

1.4 Une molécule aux propriétés antiparasitaires a été isolée dans des extraits d'huiles essentielles de feuilles du petit thé du Labrador (*Rhododendron subarcticum*) au Nunavik. Cette molécule pourrait s'avérer utile contre les infections parasitaires, notamment la malaria (Séguin et coll., 2023). De plus, l'analyse des variations saisonnières et géographiques de l'ensemble moléculaire de cette espèce permettra de déterminer les meilleures périodes et sites de cueillette afin de maximiser les bénéfices pour la santé.



L'impact de la latitude sur la diversité bactérienne des lichens

La diversité bactérienne des lichens nordiques est aussi passée sous la loupe d'une équipe de recherche. Cette dernière a montré que les cladonies étoilées (*Cladonia stellaris*) retrouvées dans les pessières à lichens nordiques présentent une diversité et une quantité de bactéries significativement plus élevées que celles retrouvées dans les pessières méridionales, et qu'une seule de ces bactéries (*Methylorosula polaris*) était commune aux deux régions. Ces différences importantes entre les communautés bactériennes des deux environnements restent largement incomprises pour l'instant, mais pourraient être reliées aux différents processus de colonisation ou à une présence plus importante de bactéries dans les sols nordiques (Alonso-Garcia et coll., 2022).



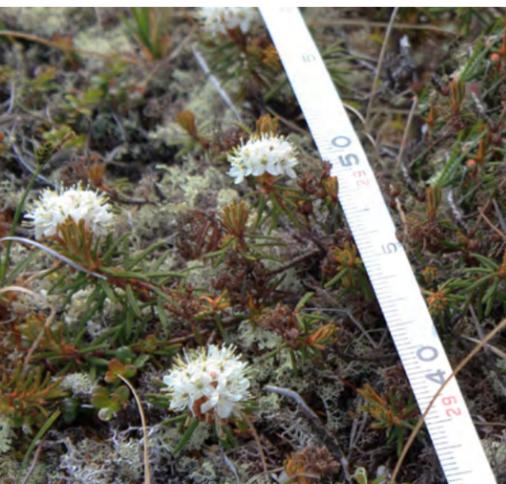
2. Le verdissement: des répercussions multiples dans un environnement interconnecté

Sélection de faits saillants de la recherche

L'expansion de la strate arbustive, ou arbustation, entraîne une restructuration majeure des communautés végétales, notamment en raison de la présence d'une voûte formée par ces arbustes qui modifie localement les conditions biotiques et abiotiques. Cette transformation du paysage a des effets à diverses échelles, sur différentes espèces ainsi que sur le fonctionnement des écosystèmes arctiques et subarctiques.

2.1 Dans l'écotone forêt boréale-toundra, la présence d'un couvert arbustif a eu un effet négatif sur l'abondance et la richesse spécifique des lichens. En entraînant la modification de la répartition des différentes espèces lichéniques dans le paysage, l'arbustation pourrait donc causer une modification de l'albédo de surface, un important régulateur du climat (Chagnon et Boudreau, 2019).

2.2 Grand herbivore à l'importance écologique et culturelle sans équivoque, le caribou migrateur (*Rangifer tarandus*) sera affecté par les changements observés et prévus des communautés végétales de ses aires d'estivage et d'hivernage. La diminution du couvert lichénique au profit des arbustes est néfaste pour le cervidé qui dépend de cette ressource pour son alimentation hivernale (Chagnon et Boudreau, 2019), mais peut se traduire également par une plus grande quantité et une meilleure qualité de certaines ressources alimentaires estivales, tel le bouleau glanduleux ou les *Carex* sp.



2.3 L'utilisation de colliers-caméras installés sur 60 caribous migrateurs femelles a montré que ces dernières s'alimentent dans les milieux humides au début de la saison estivale (juin et juillet), alors qu'elles utilisent plutôt les zones arbustives en août. Les 65 000 vidéos analysées ont également montré que les lichens, les bouleaux, les saules et les champignons sont préférentiellement consommés. Ces résultats permettront d'orienter des actions futures dans les plans de gestion et de conservation de cette espèce en déclin (Béland, 2022).

2.4 Dans la vallée Tasiapik au Nunavik, la croissance en hauteur du couvert végétal a favorisé la recharge des aquifères souterrains. Un couvert végétal plus haut prodigue davantage d'ombre et permet un piégeage plus efficace de la neige, résultant ainsi en une plus grande accumulation de neige et en une fonte sur une période plus longue. Ces résultats suggèrent qu'avec l'accélération des changements climatiques et le dégel du pergélisol associé, la croissance végétale favorisera la réalimentation des aquifères souterrains et accroîtra la présence des eaux souterraines dans les régions froides (Young et coll., 2020).

2.5 L'effet du couvert arbustif sur la régulation thermique du pergélisol est complexe et varie en fonction de la saison. Il a été démontré que le réseau de branches d'arbustes permet d'établir des ponts thermiques entre le sol et l'atmosphère lorsque ce réseau est sous couvert de neige. Ainsi, ces ponts thermiques peuvent refroidir le sol en hiver et le réchauffer au printemps, lorsque les branches absorbent le rayonnement solaire et transfèrent la chaleur vers le sol (Figure 2.5). Ces résultats démontrent la nécessité d'inclure les processus liés aux ponts thermiques dans les modèles climatiques afin de mieux prévoir les émissions de gaz à effet de serre associés au dégel du pergélisol (Domine et coll., 2022).

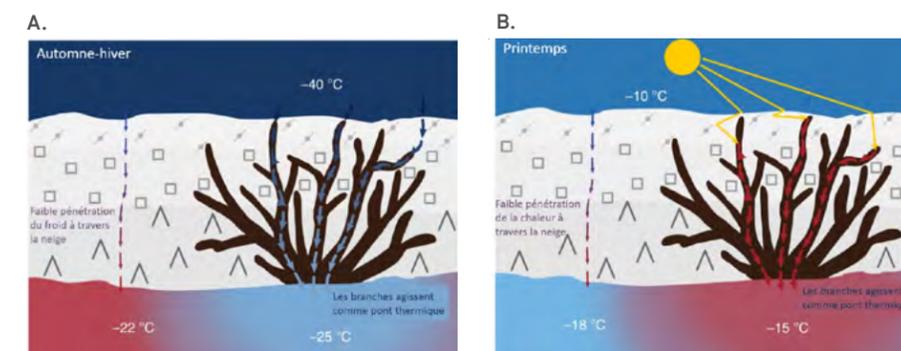


Figure 2.5 Les branches des arbustes agissent comme pont thermique à travers la neige en hiver (a) et au printemps (b). Figure tirée de Domine et coll., 2022, un article sous licence CC BY 4.0.



3. Des communautés animales en pleine mutation

Les écosystèmes nordiques sont sensibles aux changements environnementaux, car l'augmentation des températures, l'expansion de la strate arbustive et l'arrivée d'espèces boréales entraînent des modifications des interactions entre les espèces. En effet, la densification et la meilleure croissance en hauteur des espèces arbustives augmentent la quantité de nourriture disponible pour les herbivores et multiplient les habitats disponibles, tandis que l'arrivée d'espèces boréales module les interactions qu'entretiennent les espèces existantes sur place. Ensemble, ces changements entraînent des répercussions parfois inattendues.

3.1 Une équipe de recherche a démontré que les relations trophiques, qu'elles soient ascendantes (*bottom-up*) ou descendantes (*top down*), régulent les patrons de diversité fonctionnelle et phylogénétique des herbivores vertébrés de l'Arctique circumpolaire (Speed et coll., 2019). Ces résultats suggèrent donc que les interactions trophiques déterminent la diversité fonctionnelle et phylogénétique tout aussi bien que les facteurs climatiques.

Sélection de faits saillants
de la recherche

«La boréalisation de l'Arctique, définie comme le déplacement vers le nord des espèces et des communautés de cette région, devient de plus en plus évidente. Par exemple, on a observé que la répartition des espèces boréales, notamment l'orignal, le castor, le renard roux et de nombreuses espèces d'oiseaux boréaux, s'étend maintenant dans la toundra arctique»

Traduction libre Speed et coll., 2021

3.2 Les interactions indirectes au sein d'un réseau trophique peuvent être déterminantes pour la dynamique de ce dernier. Bien que ces interactions indirectes soient plus difficiles à quantifier, une étude a montré que les effets en cascade de l'action d'un insecte défoliateur dans les écosystèmes boréaux peuvent ultimement augmenter le taux de mortalité du caribou forestier, en particulier lorsque les activités humaines perturbent davantage le système (Figure 3.2). De tels résultats sont particulièrement importants dans le contexte d'une accélération des changements environnementaux et des perturbations anthropiques (Labadie et coll., 2021).

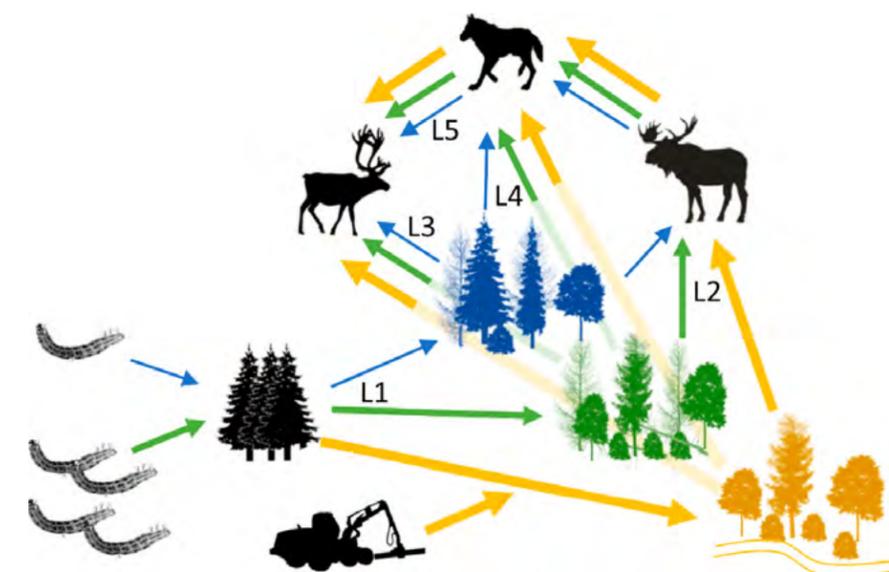


Figure 3.2
Interactions trophiques illustrant les effets indirects d'un insecte défoliateur dans les premiers stades d'une épidémie (flèches bleues) et dans un stade plus avancé (flèches vertes). Les flèches jaunes représentent l'amplification des effets engendrée par les activités de coupe de récupération. Figure tirée de Labadie et coll., 2021, un article sous licence PNAS.



4. De nouvelles technologies pour étudier les lemmings: un pas de plus pour mieux comprendre une espèce clé de l'Arctique

Sélection de faits saillants de la recherche

L'étude des espèces animales de l'Arctique est souvent complexe en raison des conditions climatiques rigoureuses et de la difficulté d'accès aux sites d'études. Ceci est particulièrement vrai pour les lemmings, ces micromammifères consommés par un large éventail de prédateurs. Toute modification de leur abondance et de leur répartition peut influencer sur l'ensemble du réseau trophique qu'ils soutiennent. Le développement de nouvelles technologies est parfois nécessaire pour comprendre la dynamique de population et les comportements de ces animaux fouisseurs, particulièrement durant l'hiver arctique.

4.1 Des colliers photosensibles ultra-légers (1,59 g) ont été conçus pour enregistrer les variations lumineuses lors des déplacements des lemmings, permettant ainsi d'inférer le temps passé dans les terriers. L'utilisation de cette technologie s'avère prometteuse pour l'étude du comportement des petits mammifères grâce à la miniaturisation de l'équipement (Bolduc et coll., 2022).

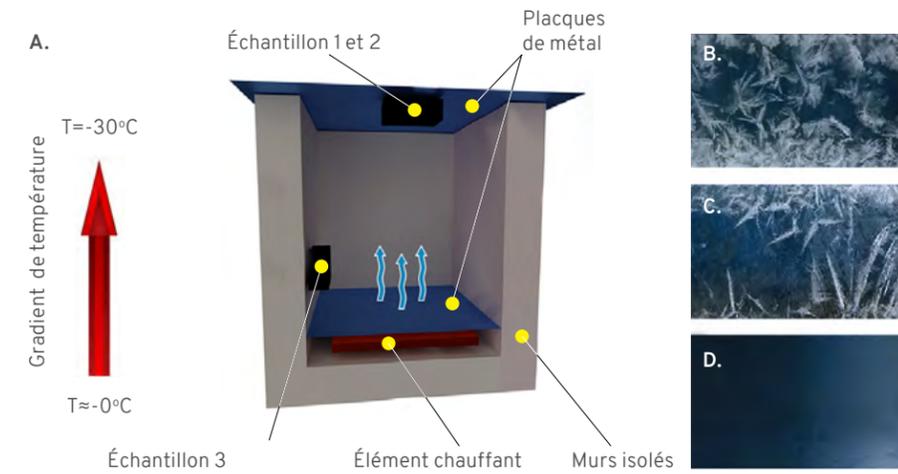


Figure 4.2 La formation de givre a été évitée en plaçant l'échantillon de verre sur la paroi latérale dans un montage expérimental où les températures étaient inférieures au point de congélation. Une schématisation du montage (a) montre que le givre se forme sur des verres sans (b) et avec (c) revêtement lorsque ceux-ci se trouvent sur le dessus du montage. Un verre sans revêtement fixé sur la paroi (d) n'affiche que peu de givre. Figure adaptée de Pusenkova et coll., 2021, un article sous licence CC BY 4.0.

4.2 Afin de mieux comprendre la reproduction des lemmings en saison hivernale, une équipe a conçu des caméras capables de fonctionner à des températures pouvant varier entre -20°C et +20°C à l'aide d'un système autonome en énergie. Des adaptations des paramètres de la caméra ont permis de surmonter les problèmes de formation de givre sur la lentille (Figure 4.2) et d'effectuer une mise au point automatique dans un large éventail de températures (Pusenkova et Galstian, 2020; Pusenkova et coll., 2021).

4.3 La première séquence complète d'activité des lemmings en saison hivernale en laboratoire, puis en milieu naturel sur l'île Bylot, a été réalisée grâce à un système de caméra autonome à faible puissance nommé ArcÇav. Parmi les images inédites obtenues, la présence de jeunes lemmings permet de mieux circonscrire le moment de la reproduction hivernale de ces micromammifères (Kalhor et coll., 2021).



Système ArcÇav



5. Prédire les interactions, la vulnérabilité et la résilience des écosystèmes grâce à de nouvelles approches de modélisation

Sélection de faits saillants
de la recherche

Les répercussions des changements climatiques ne sont pas uniformes d'un écosystème à l'autre, ni même entre les nombreux groupes taxonomiques d'un même écosystème. L'hétérogénéité des réponses de ces taxons a le potentiel de perturber les interactions trophiques, notamment en découplant les périodes de forte abondance des ressources de celles de forte demande de nourriture par les consommateurs. De nouvelles approches de modélisation sont nécessaires afin de mieux appréhender les effets des changements climatiques à l'échelle de l'écosystème, tant sur les interactions biotiques que sur le fonctionnement des écosystèmes.

5.1 À l'échelle régionale, les répercussions directes et indirectes des changements climatiques ont eu des effets sur les assemblages de plus de 100 espèces d'oiseaux et de coléoptères en forêt boréale, et l'ampleur de ces effets augmentait lorsque l'on considérait l'effet combiné des deux types de répercussions. De même, cette étude suggère que l'effet sur le maintien de la biodiversité sera plus prononcé aux plus hautes latitudes ([Bouderbala et coll., 2023](#)).



5.2 Un modèle multi-saisonnier de la dynamique prédateur-proie a été élaboré et paramétré avec des données empiriques récoltées sur l'île Bylot. Ce modèle est capable de prendre en considération les équilibres multiples d'un réseau alimentaire simplifié de la toundra. En mettant en lumière des interactions indirectes non détectées par un modèle estival, ce nouveau modèle a permis de démontrer l'importance d'intégrer la saisonnalité dans la compréhension des réseaux trophiques ([Hutchison et coll., 2020](#)).

5.3 La structure des réseaux trophiques peut nous informer sur la capacité de la communauté à faire face à une perturbation. Cependant, colliger l'ensemble des relations qu'entretiennent les espèces d'une communauté est une tâche ardue. Afin d'outrepasser ces difficultés, un modèle a été élaboré en se basant sur les caractéristiques des prédateurs qui permettront de mieux comprendre et prévoir les différences dans la structure des réseaux trophiques, la stabilité des communautés et le fonctionnement des écosystèmes ([Brose et coll., 2019](#)).

5.4 La science des réseaux complexes permet de fournir une représentation mathématique complète de systèmes complexes, comme les écosystèmes. Une équipe de recherche a élaboré une méthode qui s'appuie sur la théorie spectrale des graphes afin de réduire la complexité du réseau et ainsi de prédire les états globaux des systèmes. Cette approche présente un intérêt à la fois fondamental et pratique pour la détection des transitions critiques ([Laurence et coll., 2019](#)).

5.5 Une approche de réseau neuronal graphique, empruntée au paradigme de l'apprentissage profond, a été élaborée pour détecter des perturbations dans un réseau complexe, ouvrant ainsi la voie à l'étude de la résilience des systèmes complexes du monde réel ([Laurence et coll., 2020](#)).



6. Enjeux pour la conservation des ressources et de la biodiversité

Sélection de faits saillants
de la recherche

Dans un contexte où les pressions climatiques et anthropiques s'accroissent, il devient primordial de revoir les pratiques de suivi de l'état de santé des écosystèmes et de suggérer de nouvelles approches.

6.1 Les espèces indicatrices sont couramment utilisées pour estimer la richesse spécifique à l'échelle locale. Une équipe de recherche a toutefois montré que cette technique s'avérerait peu utile pour la surveillance et l'estimation de la biodiversité sur de vastes échelles spatiales. Dans la forêt boréale de l'est du Canada par exemple, 57 espèces indicatrices seraient nécessaires pour prévoir la richesse de la faune aviaire, démontrant ainsi la nécessité d'utiliser de nouvelles pratiques pour suivre la biodiversité (Terrigeol et coll., 2022).

6.2 Des colliers sont fréquemment utilisés pour suivre certaines espèces animales. Une étude à long terme a cependant révélé que l'effet cumulé des colliers et de la pression de chasse rend la grande oie des neiges (*Anser caerulescens atlanticus*) plus vulnérable à de multiples sources de mortalité (LeTourneux et coll., 2022). Depuis 2021, ces dispositifs ne sont plus utilisés pour cette espèce, ce qui pose de nouveaux défis pour assurer un suivi de cette population surabondante (P. Legagneux, communication personnelle).

6.3 Le contexte particulier du confinement à grande échelle dans les mois suivant la pandémie mondiale de COVID-19 a permis de mettre en lumière le rôle des activités anthropiques, qu'il soit négatif ou bénéfique, sur la conservation des ressources et de la biodiversité (Bates et coll., 2021). Pendant ce confinement, la pression de chasse à l'oie des neiges a diminué de 54% par rapport à l'année précédente, permettant ainsi aux oies de s'alimenter sans être perturbées et d'accumuler des réserves plus importantes (LeTourneux et coll., 2021).





Projets de recherche cités dans ce chapitre

Les connaissances et les avancées technologiques présentées dans ce chapitre ont été générées par plusieurs équipes de recherche interdisciplinaires de Sentinelle Nord. Elles ont été recueillies dans le cadre des projets énumérés ci-dessous, auxquels ont participé, outre les chercheuses et chercheurs, plusieurs étudiantes et étudiants diplômés, stagiaires postdoctoraux, membres du corps professionnel, partenaires d'organisations nordiques et partenaires nationaux et internationaux des secteurs public et privé.

- **Analyse réseau des espèces parapluie : évaluer l'intégrité des écosystèmes du Nord**

Chercheur principal : Daniel Fortin (Dép. de biologie)

- **La résilience des réseaux complexes : identifier les indicateurs critiques pour une intervention ciblée**

Chercheurs principaux : Patrick Desrosiers (Dép. de physique, de génie physique et d'optique), Simon Hardy (Dép. de biochimie, microbiologie et bio-informatique)

- **Recherche interdisciplinaire pour comprendre l'évolution de la dynamique du réseau alimentaire et les menaces à la sécurité alimentaire dans la forêt boréale du Nord**

Chercheurs principaux : Daniel Fortin (Dép. de biologie), Jérôme Cimon-Morin (Dép. des sciences du bois et de la forêt)

- **Suivi environnemental et valorisation dans le Nord : des molécules aux microorganismes**

Chercheurs principaux : Jacques Corbeil (Dép. de médecine moléculaire)

- **Systèmes optiques innovants pour le suivi de la vie hivernale dans la cryosphère**

Chercheur principal : Gilles Gauthier (Dép. de biologie)

- **Un réseau de capteurs autonomes pour le suivi des animaux de l'Arctique et des changements environnementaux grâce à des approches informatiques avancées**

Chercheurs principaux : Pierre Legagneux (Dép. de biologie), Audrey Durand (Dép. d'informatique et de génie logiciel)

- **Chaire de recherche en modélisation mathématique des systèmes et réseaux complexes**

Titulaire : Antoine Allard (Dép. de physique, de génie physique et d'optique)

- **Chaire de recherche Sentinelle Nord sur l'impact des migrations animales sur les écosystèmes nordiques**

Titulaire : Pierre Legagneux (Dép. de biologie)

Projets de recherche
cités dans ce chapitre

Plusieurs résultats présentés dans ce chapitre sont également tirés de projets de recherche menés par des récipiendaires de bourses et stages postdoctoraux d'excellence Sentinelle Nord.

- **Abondance et diversité des espèces lichéniques au Nunavik en contexte de changements climatiques**
Catherine Chagnon (bourse de maîtrise)
- **Production et caractérisation d'huiles essentielles issues de la nordicité**
Jean-Christophe Séguin (bourse de maîtrise)
- **Simulation de la dynamique du pergélisol en considérant l'advection de la chaleur par l'écoulement de l'eau souterraine**
Philippe Fortier (bourse de maîtrise)
- **Development of the smart LC shutter for the adaptive camera for subnival observation of lemmings**
Anastasiia Pusenkova (bourse doctorale)
- **Influence de la prédation dans la répartition spatiotemporelle des espèces proies d'une communauté de vertébrés arctiques**
Frédéric Dulude-de Broin (bourse doctorale)
- **Impact de changements récents de règlements de chasse sur la dynamique de population de la grande oie des neiges**
Frédéric LeTourneux (bourse doctorale)

- **Impact des propriétés physiques de la neige sur les populations de lemmings**
Mathilde Poirier (bourse doctorale)
- **Impact of wildfires on the diversity of lichen-associated viruses in a changing North**
Marta Alonso-Garcia (stage postdoctoral)
- **Integrated modeling of the terrestrial water cycle in degrading permafrost environments**
Nathan Young (stage postdoctoral)

Sentinelle Nord a développé des partenariats avec des institutions internationales de premier plan pour mener des projets de recherche innovants et interdisciplinaires. Les projets de collaboration suivants ont contribué aux résultats de ce chapitre.

- **Caractérisation d'huiles essentielles et de nouveaux produits naturels issus de la nordicité**
Chercheurs principaux : Xavier Fernandez (Institut de chimie de Nice, Université Côte d'Azur), Normand Voyer (Dép. de chimie)



Projets de recherche Sentinelle Nord en cours

Plusieurs projets de recherche soutenus par Sentinelle Nord sont en cours dans le cadre de la deuxième phase du programme (2021-2025). Ces projets, énumérés ci-dessous, continuent de combler les lacunes fondamentales de nos connaissances scientifiques sur le Nord en changement.

- **Recherche interdisciplinaire pour comprendre l'évolution de la dynamique du réseau alimentaire et les menaces à la sécurité alimentaire dans la forêt boréale du Nord**

Chercheurs principaux : Daniel Fortin (Dép. de biologie), Jérôme Cimon-Morin (Dép. des sciences du bois et de la forêt)

- **Un réseau de capteurs autonomes pour le suivi des animaux de l'Arctique et des changements environnementaux grâce à des approches informatiques avancées**

Chercheurs principaux : Pierre Legagneux (Dép. de biologie), Audrey Durand (Dép. d'informatique et de génie logiciel)

- **L'écoéconomie des zones minières pour un Nord canadien durable (GENOSCAN)**

Chercheurs principaux : Véronic Landry (Dép. des sciences du bois et de la forêt), Damase Khasa (Dép. des sciences du bois et de la forêt)

- **Caractérisation des huiles essentielles issues de la nordicité**

Chercheurs principaux : Xavier Fernandez (Institut de chimie de Nice, Université Côte d'Azur), Normand Voyer (Dép. de chimie)
Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'Université Côte d'Azur

- **Impacts des changements climatiques et du brunissement des eaux sur l'habitat oxythermique des salmonidés et les émissions de gaz à effet de serre en régions arctiques**

Chercheur principal : Isabelle Laurion (Centre Eau Terre Environnement, Institut national de recherche scientifique)
Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'Institut nordique du Québec

- **Dynamique du territoire ancestral innu (Nitassinan) à travers l'étude morpho-sédimentaire et socio-culturelle du lac-réservoir Manicouagan**

Chercheur principal : Patrick Lajeunesse (Dép. de géographie)
Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'Institut nordique du Québec

- **Chaire de recherche en modélisation mathématique des systèmes et réseaux complexes**

Titulaire : Antoine Allard (Dép. de physique, de génie physique et d'optique)

- **Chaire de recherche Sentinelle Nord sur l'impact des migrations animales sur les écosystèmes nordiques**

Titulaire : Pierre Legagneux (Dép. de biologie)



Rédaction de l'introduction

Mary Thaler et Pascale Ropars

Recherche et rédaction des faits saillants scientifiques

Marie-France Gévry, Pascale Ropars et Sophie Gallais

Révisions et édition finale

Pascale Ropars, Aurélie Lévy et Sophie Gallais

Remerciements

Les membres des équipes de recherche suivants ont contribué à la révision des faits saillants scientifiques présentés dans ce chapitre :

Stéphane Boudreau, Steeve Côté, Florent Domine, Daniel Fortin, Marta Alonso-Garcia, Pierre Legagneux, Jean-Michel Lemieux et Normand Voyer.

Nous remercions également Pierre Legagneux pour ses commentaires sur l'introduction.

Crédits photographiques

Index

Andreanne Beardsell/ArcticNet	Couverture, 19, 30
Gabriel Bergeron	17
Leslie Coates/ArcticNet	4
Pierre Coupel	29
Isabelle Dubois/ArcticNet	7
Frédéric Dulude-de-Broin	21, 22
Davood Kalhor	18
Pierre Legagneux	20, 30
Alexandre Paiement	14
Renaud Philippe	9, 10, 11, 12, 23, 37
René Richard	15, 30
Pascale Ropars	13
Normand Voyer	5, 12, 13, 27, 30



Références

Publications
issues de
Sentinelle Nord

- Alonso-Garcia, M., et Villarreal, A. J. C. (2022). Bacterial community of reindeer lichens differs between northern and southern lichen woodlands. *Canadian Journal of Forest Research*, 52(5), 662-673. <https://doi.org/10.1v021-0272>
- Ⓢ Bates, A. E., Primack, R. B., Biggar, B. S., Bird, T. J., Clinton, M. E., Command, R. J., ... Duarte, C. M. (2021). Global COVID-19 lockdown highlights humans as both threats and custodians of the environment. *Biological Conservation*, 263, 109175. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109175>
- Ⓢ Béland, S. (2022). *Sélection d'habitat estival des femelles caribou migrateur (Rangifer tarandus) à fine échelle spatiale à l'aide de colliers caméras* [Mémoire de maîtrise, Université Laval]. Corpus UL. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/104147>
- Ⓢ Bérubé, C., Gagnon, D., Borgia, A., Richard, D., et Voyer, N. (2019). Total synthesis and antimalarial activity of mortiamides A-D. *Chemical Communications*, 55(52), 7434-7437. <https://doi.org/10.1039/c9cc02864a>
- Ⓢ Bolduc, D., Fauteux, D., Gagnon, C. A., Gauthier, G., Bêty, J., et Legagneux, P. (2023). Testimonials to reconstruct past abundances of wildlife populations. *Basic and Applied Ecology*, 68, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2022.11.005>
- Ⓢ Bolduc, D., Fauteux, D., Bharucha, É., Trudeau, J.-M., et Legagneux, P. (2022). Ultra-light photosensor collars to monitor Arctic lemming activity. *Animal Biotelemetry*, 10(1), 31. <https://doi.org/10.1186/s40317-022-00302-1>
- Ⓢ Bouderbala, I., Labadie, G., Béland, J.-M., Boulanger, Y., Hébert, C., Desrosiers, P., Allard, A., et Fortin, D. (2023). Effects of global change on bird and beetle populations in boreal forest landscape: an assemblage dissimilarity analysis. *Diversity and Distributions*, 29(6), 757-773. <https://doi.org/10.1111/ddi.13697>
- Ⓢ Brose, U., Archambault, P., Barnes, A. D., Bersier, L.-F., Boy, T., Canning-Clode, J., ... Iles, A. C. (2019). Predator traits determine food-web architecture across ecosystems. *Nature Ecology et Evolution*, 3(6), 919-927. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0899-x>

Publications
issues de
Sentinelle Nord

- Ⓢ Carpentier, C., Queiroz, E. F., Marcourt, L., Wolfender, J.-L., Azelmat, J., Grenier, D., ... Voyer, N. (2017). Dibenzofurans and pseudodepsidones from the lichen *Stereocaulon paschale* collected in Northern Quebec. *Journal of Natural Products*, 80(1), 210-214. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.6b00831>
- Ⓢ Chagnon, C., et Boudreau, S. (2019). Shrub canopy induces a decline in lichen abundance and diversity in Nunavik (Québec, Canada). *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 51(1), 521-532. <https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1688751>
- Ⓢ Domine, F., Fourteau, K., Picard, G., Lackner, G., Sarrazin, D., et Poirier, M. (2022). Permafrost cooled in winter by thermal bridging through snow-covered shrub branches. *Nature Geoscience*, 15(7), 554-560. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00979-2>
- Ⓢ Hutchison, C. G., Guichard, F., Legagneux, P., Gauthier, G., Bêty, J., Berteaux, D., Fauteux, D. et Gravel, D. (2020). Seasonal food webs with migrations: Multi-season models reveal indirect species interactions in the Canadian Arctic tundra. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2181), 20190354. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0354>
- Ⓢ Kalhor, D., Poirier, M., Pusenkova, A., Maldague, X., Gauthier, G., et Galstian, T. (2021). A camera trap to reveal the obscure world of the Arctic subnivean ecology. *IEEE Sensors Journal*, 21(24), 28025-28036. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3122203>
- Ⓢ Labadie, G., McLoughlin, P. D., Hebblewhite, M., et Fortin, D. (2021). Insect-mediated apparent competition between mammals in a boreal food web. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(30), e2022892118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2022892118>
- Ⓢ Laurence, E., Doyon, N., Dubé, L. J., et Desrosiers, P. (2019). Spectral dimension reduction of complex dynamical networks. *Physical Review X*, 9(1), 011042. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.9.011042>

Ⓢ Libre accès

Le libre accès signifie l'accès en ligne gratuit aux résultats de la recherche.

Publications
issues de
Sentinelle Nord

- Laurence, E., Murphy, C., St-Onge, G., Roy-Pomerleau, X., et Thibeault, V. (2020). Detecting structural perturbations from time series using deep learning models. *arXiv*, 2006.05232. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.05232>
- LeTourneux, F., Gauthier, G., Pradel, R., Lefebvre, J., et Legagneux, P. (2022). Evidence for synergistic cumulative impacts of marking and hunting in a wildlife species. *Journal of Applied Ecology*, 59(11), 2705-2715. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14268>
- LeTourneux, F., Grandmont, T., Dulude-de Broin, F., Martin, M.-C., Lefebvre, J., Kato, A., ... Legagneux, P. (2021). COVID19-induced reduction in human disturbance enhances fattening of an overabundant goose species. *Biological Conservation*, 255, 108968. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.108968>
- Pusenkova, A., et Galstian, T. (2020). Electrically tunable liquid crystal lens in extreme temperature conditions. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 703(1), 39-51. <https://doi.org/10.1080/15421406.2020.1743941>
- Pusenkova, A., Poirier, M., Kalhor, D., Galstian, T., Gauthier, G., et Maldague, X. (2021). Optical design challenges of subnivean camera trapping under extreme Arctic conditions. *Arctic Science*, 8(2), 313-328. <https://doi.org/10.1139/as-2021-0012>
- Séguin, J.-C., Fernandez, X., Boudreau, S., et Voyer, N. (2021). Chemical composition of the unexplored volatile fraction of *Betula glandulosa*, a prevalent shrub in Nunavik, Quebec. *Chemistry and Biodiversity*, 19(2), e202100871. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202100871>

Publications
issues de
Sentinelle Nord

- Séguin, J.-C., Gagnon, D., Bélanger, S., Richard, D., Fernandez, X., Boudreau, S., et Voyer, N. (2023). Chemical composition and antiplasmodial activity of the essential oil of *Rhododendron subarcticum* leaves from Nunavik, Québec, Canada. *ACS Omega*, 8(19), 16729-16737. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00235>
- Speed, J. D. M., Skjelbred, I. A., Barrio, I. C., Martin, M. D., Berteaux, D., Bueno, C. G., ... Soininen, E. M. (2019). Trophic interactions and abiotic factors drive functional and phylogenetic structure of vertebrate herbivore communities across the Arctic tundra biome. *Ecography*, 42(6), 1152-1163. <https://doi.org/10.1111/ecog.04347>
- Terrigeol, A., Ewane Ebouele, S., Darveau, M., Hébert, C., Rivest, L.-P., et Fortin, D. (2022). On the efficiency of indicator species for broad-scale monitoring of bird diversity across climate conditions. *Ecological Indicators*, 137, 108773. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108773>
- Young, N., Lemieux, J.-M., Delottier, H., Fortier, R., et Fortier, P. (2020). A conceptual model for anticipating the impact of landscape evolution on groundwater recharge in degrading permafrost environments. *Geophysical Research Letters*, 47(11), e2020GL087695. <https://doi.org/10.1029/2020GL087695>

Références
externes

- AMAP. (2021). *AMAP Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway. viii+148pp. <https://www.amap.no/documents/doc/amap-arctic-climate-change-update-2021-key-trends-and-impacts/3594>
- Gauthier, G., Bêty, J., Cadieux, M.-C., Legagneux, P., Doiron, M., Chevallier, C., Lai, S., Tarroux, A., et Berteaux, D. (2013). Long-term monitoring at multiple trophic levels suggests heterogeneity in responses to climate change in the Canadian Arctic tundra. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1624). <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0482>
- Gilman, S. E., Urban, M. C., Tewksbury, J., Gilchrist, G. W., et Holt, R. D. (2010). A framework for community interactions under climate change. *Trends in Ecology et Evolution*, 25(6), 325–331. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.03.002>
- Mekonnen, Z. A., Riley, W. J., Berner, L. T., Bouskill, N. J., Torn, M. S., Iwahana, G., Breen, A. L., Myers-Smith, I. H., Criado, M. G., Liu, Y., Euskirchen, E. S., Goetz, S. J., Mack, M. C., et Grant, R. F. (2021). Arctic tundra shrubification: A review of mechanisms and impacts on ecosystem carbon balance. *Environmental Research Letters*, 16(5), 053001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf28b>
- Payette, S., Pilon, V., et Frégeau, M. (2018). Origin of the southernmost Arctic tundra of continental North America. *Arctic Science*, 4(4), 794–812. <https://doi.org/10.1139/as-2018-0007>
- Pelletier, M., Allard, M., et Levesque, E. (2018). Ecosystem changes across a gradient of permafrost degradation in subarctic Québec (Tasiapik Valley, Nunavik, Canada). *Arctic Science*, 5(1), 1–26. <https://doi.org/10.1139/as-2016-0049>
- Schleuning, M., Neuschulz, E. L., Albrecht, J., Bender, I. M. A., Bowler, D. E., Dehling, D. M., Fritz, S. A., Hof, C., Mueller, T., Nowak, L., Sorensen, M. C., Böhning-Gaese, K., et Kissling, W. D. (2020). Trait-based assessments of climate-change impacts on interacting species. *Trends in Ecology et Evolution*, 35(4), 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.12.010>

Références
externes

- Speed, J. D. M., Chimal-Ballesteros, J. A., Martin, M. D., Barrio, I. C., Vuorinen, K. E. M., et Soininen, E. M. (2021). Will borealization of Arctic tundra herbivore communities be driven by climate warming or vegetation change? *Global Change Biology*, 27, 6568–6577. <https://doi.org/10.1111/gcb.15910>
- Svenning, J.-C., Gravel, D., Holt, R. D., Schurr, F. M., Thuiller, W., Münkemüller, T., Schiffers, K. H., Dullinger, S., Edwards, T. C., Hickler, T., Higgins, S. I., Nabel, J. E. M. S., Pagel, J., et Normand, S. (2014). The influence of interspecific interactions on species range expansion rates. *Ecography*, 37(12), 1198–1209. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00574.x>
- Tian, Y., Li, Y.-L., Zhao, F.-C., et Taglialatela-Scafati, O. (2017). Secondary metabolites from polar organisms. *Marine Drugs*, 15(3), 28. <https://doi.org/10.3390/md15030028>
- Tonkin, J. D., Bogan, M. T., Bonada, N., Rios-Touma, B., et Lytle, D. A. (2017). Seasonality and predictability shape temporal species diversity. *Ecology*, 98(5), 1201–1216. <https://doi.org/10.1002/ecy.1761>
- Woodward, G., Benstead, J. P., Beveridge, O. S., Blanchard, J., Brey, T., Brown, L. E., Cross, W. F., Friberg, N., Ings, T. C., Jacob, U., Jennings, S., Ledger, M. E., Milner, A. M., Montoya, J. M., O’Gorman, E., Olesen, J. M., Petchey, O. L., Pichler, D. E., Reuman, D. C., ... Yvon-Durocher, G. (2010). Ecological networks in a changing climate. *Advances in Ecological Research*, 42, 71–138. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381363-3.00002-2>

Licences
d'utilisation
des figures

La documentation relative à l'utilisation des figures présentées dans ce chapitre est disponible en suivant les hyperliens suivants : [CC BY 4.0](#) (Domine et coll., 2022; Pusenkova et coll., 2021); [licence PNAS](#) (Labadie et coll., 2021).

