



COMPENDIUM  
DE RECHERCHE  
2017/22

**Ce document doit être cité comme suit:**

Sentinelles Nord. (2023). Compendium de recherche 2017-2022. Environnement, Santé, Innovation. Gallais, S., Ropars, P. et Lévesque, K. (Eds). Sentinelles Nord, Université Laval, Québec, Québec, Canada.

**Équipe éditoriale :** Sophie Gallais, Pascale Ropars et Keith Lévesque

**Produit et publié par :** Sentinelles Nord, Université Laval

**Droit d'auteur :** © 2023 Sentinelles Nord, Université Laval, Québec, Québec, Canada

La reproduction de cette publication à des fins non commerciales, notamment éducatives, est permise sans autorisation écrite préalable du (des) détenteur(s) des droits d'auteur à condition que la source soit dûment citée. La reproduction de cette publication à des fins commerciales, notamment en vue de la vente, est interdite sans autorisation écrite préalable du (des) détenteur(s) des droits d'auteur. Cette publication contient du matériel (par exemple, des photographies et des figures) dont l'utilisation doit être autorisée par les détenteurs des droits d'auteur originaux.

ISBN 978-1-7380320-1-3 (PDF)

URL : [hdl.handle.net/20.500.11794/123723](https://hdl.handle.net/20.500.11794/123723)

**Mise en page :** Duplain Communication Intégrée

**Traduction :** ITC traduction

**Crédits photographiques :** Isabelle Dubois/ArcticNet 5

Martin Fortier/ArcticNet 7

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

Sentinelles  
Nord



COMPENDIUM  
DE RECHERCHE

2017/22

ENVIRONNEMENT

SANTÉ

INNOVATION



## 7 À propos de ce Compendium

### CHAPITRE 1 ENVIRONNEMENTS MARINS ET SANTÉ HUMAINE

- 15 Adaptation du phytoplancton aux conditions extrêmes
- 19 Transmission de la lumière à travers la glace de mer arctique
- 21 Déterminants de la qualité nutritionnelle des producteurs primaires
- 23 Changement du milieu marin et de la répartition des espèces
- 25 Relations trophiques et transfert d'énergie dans le réseau trophique
- 29 Contaminants environnementaux et incidences sur la santé humaine dans le Nord
- 33 Des résultats de recherche aux politiques
- 41 Références

### CHAPITRE 2 PERGÉLISOL ET SYSTÈMES D'EAU DOUCE

- 55 Dégradation du pergélisol et ses impacts sur le paysage et les infrastructures
- 57 Mares de thermokarst et dynamique du carbone associée à la dégradation du pergélisol
- 59 La détection des émissions de gaz à effet de serre *in situ*
- 61 À la découverte des virus des lacs et des mares nordiques
- 63 Les lacs de l'Arctique, sentinelle des changements
- 65 De nouvelles technologies pour suivre les lacs arctiques
- 67 Des régimes hydrologiques en changement
- 69 Des changements dans le manteau neigeux
- 71 Importance de la cryobiodiversité dans un contexte de réchauffement climatique
- 81 Références

### CHAPITRE 3 DYNAMIQUE DES ÉCOSYSTÈMES TERRESTRES ET RÉPONSE AUX CHANGEMENTS

- 97 Chimio-diversité nordique: une signature moléculaire distinctive
- 99 Le verdissement: des répercussions multiples dans un environnement interconnecté
- 101 Des communautés animales en pleine mutation
- 103 De nouvelles technologies pour étudier les lemmings: un pas de plus pour mieux comprendre une espèce clé de l'Arctique
- 105 Prédire les interactions, la vulnérabilité et la résilience des écosystèmes grâce à de nouvelles approches de modélisation
- 107 Enjeux pour la conservation des ressources et de la biodiversité
- 115 Références

### CHAPITRE 4 ALIMENTATION, SANTÉ MÉTABOLIQUE ET INSÉCURITÉ ALIMENTAIRE

- 129 Les bienfaits des oméga-3
- 131 De nouvelles avancées sur les polyphénols
- 135 L'alimentation, un déterminant du microbiote intestinal
- 137 L'axe intestin-cerveau: des mécanismes d'actions à approfondir
- 139 Le rôle du système endocannabinoïde dans la santé métabolique
- 141 Pour de nouveaux systèmes alimentaires
- 145 L'accès à une eau potable de qualité
- 155 Références

### CHAPITRE 5 BIEN-ÊTRE: DES NEUROSCIENCES AU LOGEMENT DURABLE

- 169 Les conséquences du stress sur la santé mentale
- 171 Comprendre la résilience au stress
- 173 Vers un diagnostic précoce des principales maladies psychiatriques
- 177 Des outils pour une meilleure compréhension du cerveau
- 179 Développer une approche écosystémique de la santé mentale
- 183 Revoir la planification et la création du logement pour le bien-être des populations nordiques
- 185 Une approche architecturale axée sur la nature pour le bien-être des habitants et habitantes
- 187 Le rôle de la ventilation pour la qualité de l'air intérieur des logements
- 188 Un environnement intérieur sans fumée pour la santé des habitants et des habitantes
- 195 Références



## À propos de ce Compendium

Dans le contexte de l'accélération des changements climatiques et du développement socio-économique dans les régions arctiques et subarctiques, le programme de recherche Sentinelle 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 durables dans le Nord.

Ce compendium présente une sélection de résultats du programme de recherche Sentinelle 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 les pairs, qui ont été intégrés dans cinq chapitres interdisciplinaires traitant des principaux enjeux nordiques. Malgré l'ampleur

et la complexité de ces derniers, chaque chapitre du compendium vise à apporter de nouvelles perspectives grâce au processus d'intégration des connaissances et à combler les lacunes fondamentales dans notre compréhension du Nord en changement. Chacun des cinq chapitres commence par une introduction qui établit l'importance des enjeux nordiques abordés et le contexte dans lequel les résultats sélectionnés de Sentinelle Nord sont présentés. Les résultats peuvent être ensuite consultés individuellement, mais ils ont été organisés de manière à mettre en évidence les liens potentiels entre eux et à faciliter la navigation dans les chapitres.

Le compendium rassemble un large éventail de résultats provenant de diverses équipes de recherche de l'Université Laval, qui travaillent avec leurs partenaires des organisations nordiques et des secteurs public et privé. Il peut servir de document de référence pour les prises de décisions éclairées, de catalyseur pour de nouvelles avenues de recherche, de porte d'entrée vers une mine de données de recherche, ou de source de réflexion pour aborder des enjeux complexes au moyen d'approches novatrices et interdisciplinaires.

Enfin, ce compendium ne vise pas à passer en revue tous les résultats des recherches financées par Sentinelle Nord. Pour consulter l'ensemble des publications et des résultats du programme, les lecteurs et lectrices sont invités à visiter le site web de Sentinelle Nord.

CHAPITRE 1

# Environnements marins et santé humaine





## Environnements marins arctiques et subarctiques en changement et les implications pour la santé humaine

### Introduction

Les environnements marins arctiques et subarctiques subissent des changements rapides et importants liés au réchauffement climatique. L'étendue du couvert de glace de mer arctique en été - un indicateur important du changement - a diminué d'environ 40% et son épaisseur de 65% depuis 1979 (Roebeling et coll., 2021; Lindsay et Schweiger, 2015). La disparition de la glace de mer a d'importantes répercussions sur les processus physiques, chimiques et biologiques, notamment sur le flux thermique, la circulation générale, la stratification, l'apport en nutriments, la production primaire et les dynamiques énergétiques des réseaux trophiques (Carmack et coll., 2015; Kortsch et coll., 2015; Castellani, 2022).

Il a été démontré que les eaux libres de glace plus chaudes et leurs répercussions sur les courants océaniques favorisent l'expansion vers le nord d'espèces boréales, en particulier le phytoplancton, le zooplancton et les poissons (Fossheim et coll., 2015; Lefort et coll., 2020; Møller et Nielsen, 2020; [Oziel et coll., 2020](#)). La réduction drastique du couvert de glace est aussi associée à la prolongation de la saison de croissance du phytoplancton et à une augmentation de 30% de la production primaire nette en eau libre dans tout l'océan Arctique (Arrigo et coll., 2015).

Les algues unicellulaires autotrophes, qui sont les principales responsables de la production primaire dans les écosystèmes marins, utilisent le rayonnement solaire pour synthétiser les biomolécules essentielles, qui sont ensuite transférées à des niveaux trophiques supérieurs. Dans l'Arctique, la plupart des biomolécules synthétisées par les algues de glace et le phytoplancton remontent la chaîne alimentaire par l'intermédiaire du copépode herbivore *Calanus* spp (Falk-Petersen et coll., 2007). Ces copépodes riches en lipides sont ensuite consommés par la morue arctique (*Boreogadus saida*), la proie principale des phoques piscivores, ainsi que des bélugas et des narvals (Welch et coll., 1992). Une fraction de cette production primaire



se dépose également sur le fond marin et fournit de l'énergie et des acides gras essentiels pour alimenter la production benthique secondaire (Grebmeier et Barry, 1991). La disponibilité et la qualité nutritionnelle des biomolécules essentielles à la base du réseau trophique sont donc des déterminants importants de la productivité et de la santé des écosystèmes marins. Or, ces biomolécules sont sensibles aux caractéristiques de la glace de mer et à la quantité de lumière pénétrant dans la partie supérieure de l'océan (Søreide et coll., 2010). L'un des défis pour bien comprendre les dynamiques des réseaux trophiques selon différents régimes de glace de mer consiste à quantifier adéquatement la pénétration du rayonnement solaire à travers la glace de mer (Veyssière et coll., 2022; Katlein et coll., 2021; Perron et coll., 2021).

Les conséquences des changements climatiques sur les réseaux trophiques marins peuvent se répercuter sur les communautés autochtones nordiques, qui consomment des aliments traditionnels marins de haute qualité nutritionnelle (Falardeau et coll., 2022). Les crustacés, les poissons, les phoques et les baleines sont au cœur de la culture inuite et constituent une alimentation riche en composés essentiels aux bienfaits reconnus pour la santé (Lemire et coll., 2015; Rosol et coll., 2016; Rapinski et coll., 2018; Hibbeln et coll., 2006; Hu et coll., 2018). L'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*), une espèce de poisson de grande importance pêché par les Inuits et une source d'acides gras essentiels, pourrait subir les conséquences de l'expansion vers le nord d'espèces boréales, notamment en raison de nouvelles interactions ascendantes (p. ex., disponibilité et qualité des proies) et descendantes (p. ex., concurrence et prédation) (Power et coll., 2012; Falardeau et coll., 2022). La dynamique des contaminants, c'est-à-dire la biodisponibilité, l'absorption, la bioaccumulation et la persistance des contaminants environnementaux, peut aussi être modifiée par les changements des dynamiques du réseau trophique, comme l'augmentation d'espèces migratrices boréales (McKinney et coll., 2012; Lemire et coll., 2015; Alava et coll., 2017).

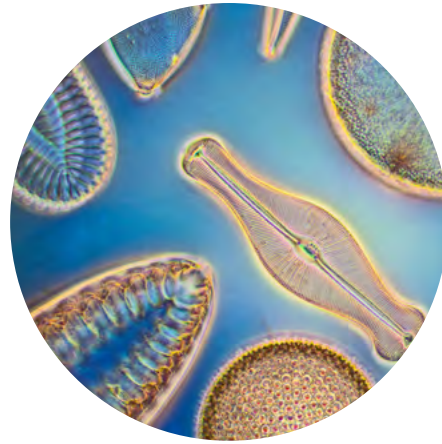
Le mercure (Hg), le méthylmercure (MeHg), les polluants organiques persistants (POP) ainsi que les contaminants émergents tels que les acides perfluoroalkylés (PFAA) qui sont transportés en Arctique par les courants atmosphérique et océanique (Burkow et Kallenborn, 2000) peuvent être extrêmement néfastes pour la santé humaine. Par exemple, l'exposition au MeHg des populations inuites côtières est la plus élevée au monde (Basu et coll., 2018), ce qui risque d'entraîner des effets délétères sur les systèmes respiratoire, endocrinien et nerveux central (Foster et coll., 2012). Afin de formuler de nouvelles politiques qui permettront d'améliorer la santé des communautés nordiques, il est crucial de mieux comprendre les effets des changements climatiques sur la dynamique et l'exposition des contaminants dans les environnements marins arctiques et subarctiques, ainsi que leurs répercussions sur les services et la santé des populations côtières (Achouba et coll., 2019; de Moraes Pontual et coll., 2021).

Ce chapitre rassemble une sélection de résultats de recherche du programme Sentinelle Nord qui contribuent à approfondir notre compréhension des impacts des changements climatiques sur les processus clés des écosystèmes marins arctiques et subarctiques, ainsi que des répercussions sur la santé des populations côtières nordiques. Combinés, ces résultats répondent à des questions de recherche interdisciplinaire concernant les effets des changements climatiques sur la production primaire, les dynamiques des réseaux trophiques, la disponibilité et la qualité des composés essentiels, le transfert d'énergie à travers les principaux biotes des écosystèmes marins arctiques et subarctiques, ainsi que le rôle des aliments traditionnels du milieu marin dans l'exposition aux contaminants et la santé humaine.



#### 🔍 MOTS CLÉS:

Écosystèmes marins, Glace de mer, Changement climatique, Réseau trophique marin, Aliments traditionnels, Océans, Santé humaine, Transfert d'énergie, Contaminants



## 1. Adaptation du phytoplancton aux conditions extrêmes

Sélection de faits saillants de la recherche

Afin d'anticiper la réaction de l'océan Arctique à la diminution du couvert de glace et à l'augmentation de la luminosité, il est nécessaire de bien comprendre comment le phytoplancton arctique s'adapte aux régimes extrêmes de luminosité saisonnière.

1.1 Dans la baie de Baffin, au Canada, des observations en continu sur deux cycles annuels ont indiqué qu'une croissance nette du phytoplancton peut se produire au milieu de l'hiver, sous un couvert complet de glace. Une partie de cette croissance est le résultat de la photosynthèse et souligne la capacité d'adaptation du phytoplancton arctique à des conditions de très faible luminosité, capacité qui peut s'avérer essentielle à sa survie pendant la nuit polaire (Randelhoff et coll., 2020).



1.2 Pour approfondir nos connaissances de l'océan Arctique pendant la nuit polaire, une équipe de recherche a mis au point un capteur optique ultrasensible, en collaboration avec Biospherical Inc (Figure 1.2). Monté sur un véhicule sous-marin autonome doté de capacités de navigation sous la glace, ce capteur a permis à l'équipe de prélever les toutes premières données de luminosité sous la glace dans l'Arctique (Leymarie et coll., communication personnelle).

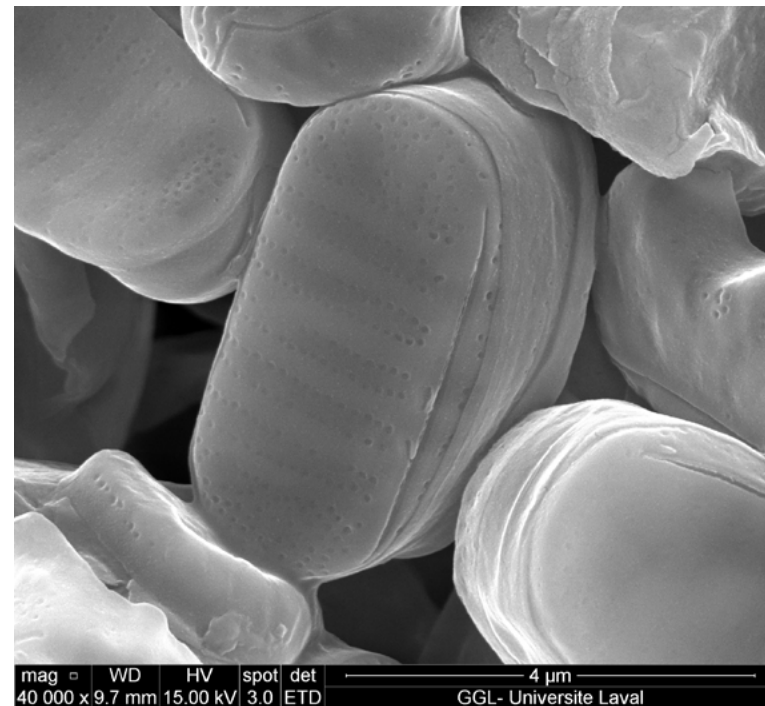


Figure 1.2  
Capteur développé avec Biospherical Inc.



1.3 Il a été démontré que les stratégies de photoadaptation, ou «boîtes à outils moléculaires», développées par les diatomées arctiques pour optimiser leur croissance dépendent fortement des niches lumineuses saisonnières propres à chaque espèce (Figure 1.3; [Croteau et coll., 2022](#)). Les diatomées arctiques évoluent dans un climat extrême, dans lequel la quantité de lumière disponible est régie par les cycles de la glace de mer, la photopériode et l'angle solaire. C'est donc en réaction à cet environnement que les diatomées arctiques ont développé des patrons de désactivation photoprotectrice non photochimique et des cycles de xanthophylle inhabituels ([Croteau et coll., 2021](#)).

1.4 Un premier modèle du génome de l'espèce *Fragilariopsis cylindrus*, une diatomée pennée de glace de mer, a été développé pour mieux comprendre les mécanismes métaboliques responsables du succès évolutif des diatomées dans les écosystèmes polaires. Les résultats indiquent que le réseau moléculaire métabolique de *F. cylindrus* est extrêmement robuste face aux perturbations cellulaires, une caractéristique qui contribue probablement à maintenir son homéostasie cellulaire dans des conditions extrêmes ([Lavoie et coll., 2020](#)).



*Fragilariopsis cylindrus*

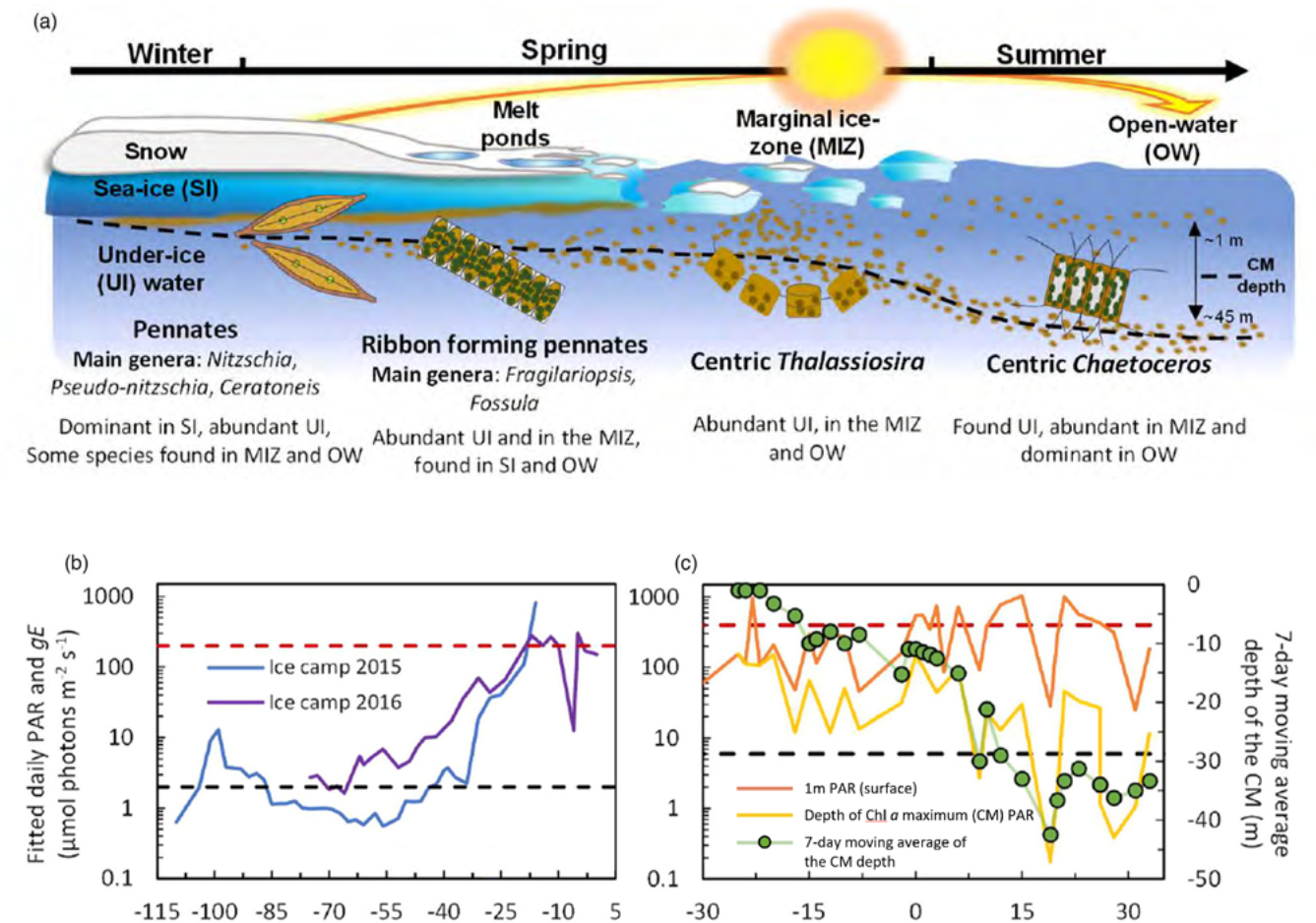


Figure 1.3 Les changements dans les optimums de lumière de croissance des espèces de diatomées favorisent leur succession pendant la floraison printanière dans l'Arctique. Les lignes horizontales en pointillés représentent le minimum (noir) ou le maximum (rouge) d'intensité lumineuse de croissance (gE) utilisée pour la croissance d'une espèce de diatomée sympagique (b) ou planctonique (c). Figure adaptée de Croteau et coll., 2022, un article sous licence CC BY 4.0.



«Une compréhension approfondie de la manière dont la lumière solaire est réfléchié et transmise par le couvert de glace de mer est nécessaire pour une représentation précise des processus clés dans les modèles climatiques et écosystémiques, tels que la rétroaction glace-albédo.»

Traduction libre Katlein et coll., 2021

## 2. Transmission de la lumière à travers la glace de mer arctique

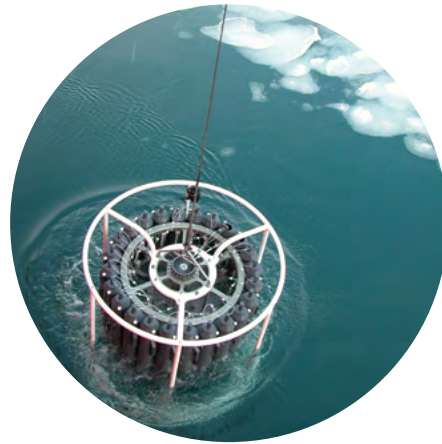
Sélection de faits saillants  
de la recherche

Les propriétés physiques de la glace de mer changent avec le réchauffement de l'Arctique, ce qui affecte la façon dont la lumière du soleil est réfléchié et transmise à la colonne d'eau sous la glace. Ultimement, ces changements se répercutent sur la production primaire et la dynamique des écosystèmes.

2.1 Une sonde optique novatrice a été conçue et mise à l'essai pour mesurer les propriétés optiques inhérentes de la glace de mer *in situ* (Perron et coll., 2021). Cette sonde est un outil nouveau, rapide et fiable pour mesurer la diffusion de la lumière et ainsi mieux prédire la production primaire associée à la glace.



2.2 Une nouvelle chaîne de capteurs de lumière multispectrale a été mise au point pour prendre des mesures directes, autonomes et verticalement résolues de l'atténuation de la lumière dans la glace de mer. Grâce à des déploiements fréquents sur une vaste zone, cet instrument peu coûteux pourrait recueillir des données sur la lumière associée à la glace sur des échelles spatiales et temporelles beaucoup plus grandes. De telles données permettraient d'améliorer les schémas de transfert radiatif dans les modèles à grande échelle (Katlein et coll., 2021).



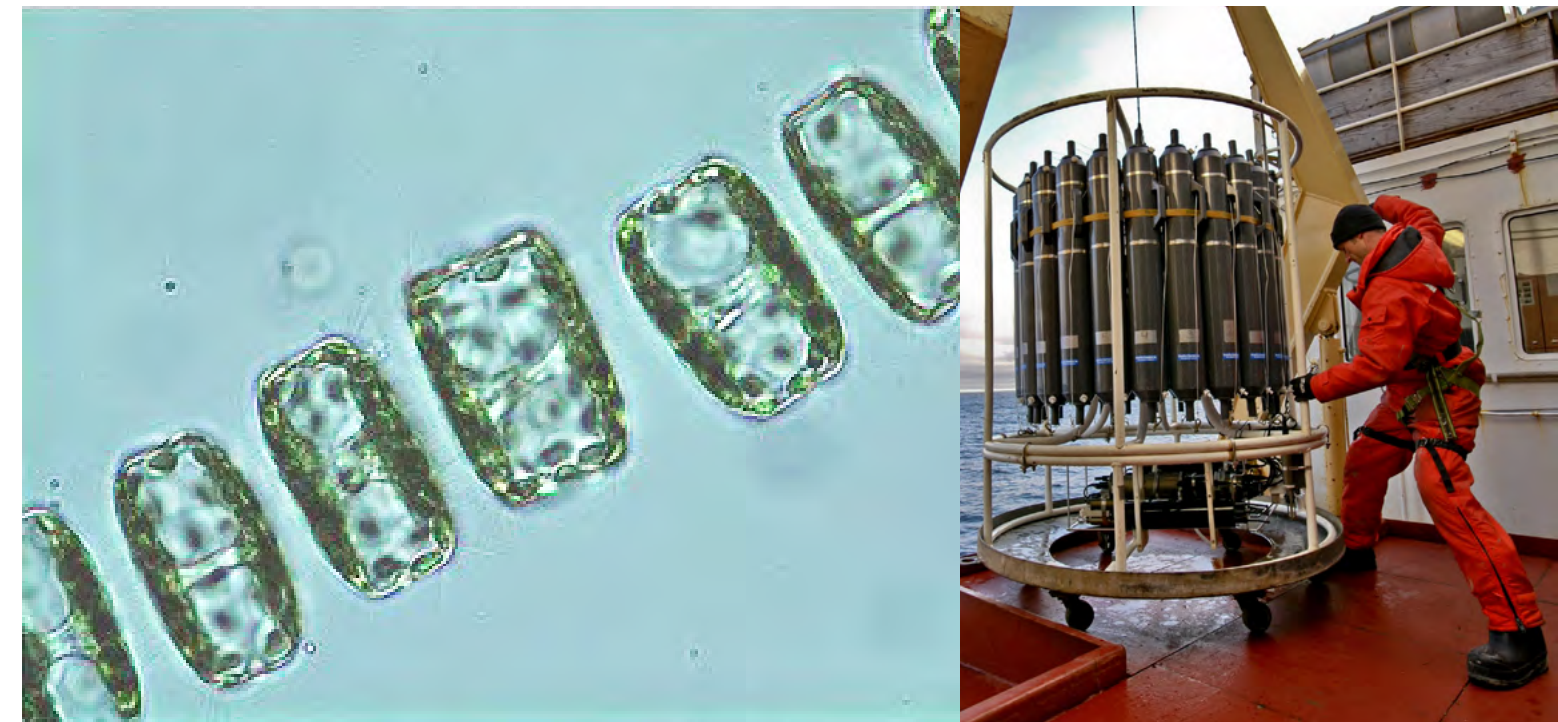
### 3. Déterminants de la qualité nutritionnelle des producteurs primaires

Sélection de faits saillants de la recherche

La quantité et le type de lipides, d'acides gras essentiels et de pigments caroténoïdes antioxydants synthétisés par les algues de glace et le phytoplancton sont cruciaux pour la santé et le fonctionnement du réseau trophique marin de l'Arctique. Or, ce dernier subira les impacts, directs ou indirects, de la transformation rapide de l'Arctique.

3.1 Des changements dans l'environnement physicochimique marin (p. ex., la température de l'eau de mer, la salinité, le pH, les nutriments et la lumière) sur un transect de 3 000 km ont eu des effets indirects sur la composition en acides gras essentiels, notamment la composition en oméga-3 et en pigments caroténoïdes du phytoplancton marin. Ces changements résultent d'une modification des assemblages d'espèces après le retrait printanier de la glace de mer et des floraisons successives ([Marmillot et coll., 2020](#); [Amiriaux et coll., 2022](#)).

3.2 Dans le cadre d'une étude comparative des milieux marins du Nunavik, le pH était positivement corrélé avec la production d'acide eicosapentaénoïque, l'un des principaux acides gras oméga-3 à longue chaîne présents dans les diatomées. Les résultats obtenus lors d'analyses de covariance indiquent qu'un pH faible aurait un effet direct et néfaste sur la physiologie des cellules de diatomées ([Cameron-Bergeron, 2020](#)). L'un des taux d'acidification les plus rapides au monde a été observé dans l'océan Arctique, ce qui pourrait créer des conséquences importantes sur la production et le transfert des composés essentiels dans la chaîne alimentaire.





## 4. Changement du milieu marin et de la répartition des espèces

Sélection de faits saillants de la recherche

Dans les milieux marins arctiques et subarctiques, le réchauffement climatique entraîne le déplacement d'espèces vers le nord, causant ainsi une réorganisation des populations et des changements dans la dynamique des réseaux trophiques.

4.1 L'augmentation significative de la vitesse de surface des courants de l'Atlantique Nord à travers le corridor arctique européen au cours des 24 dernières années a conduit à l'expansion nordique d'*Emiliana huxleyi*, un traceur phytoplanctonique des écosystèmes tempérés (Figure 4.1). Cette «atlantification» physique et biologique de l'océan Arctique risque d'avoir des répercussions sur l'ensemble de l'écosystème marin en modifiant la répartition des espèces ainsi que le transfert d'énergie à des niveaux trophiques plus élevés (Oziel et coll., 2020).

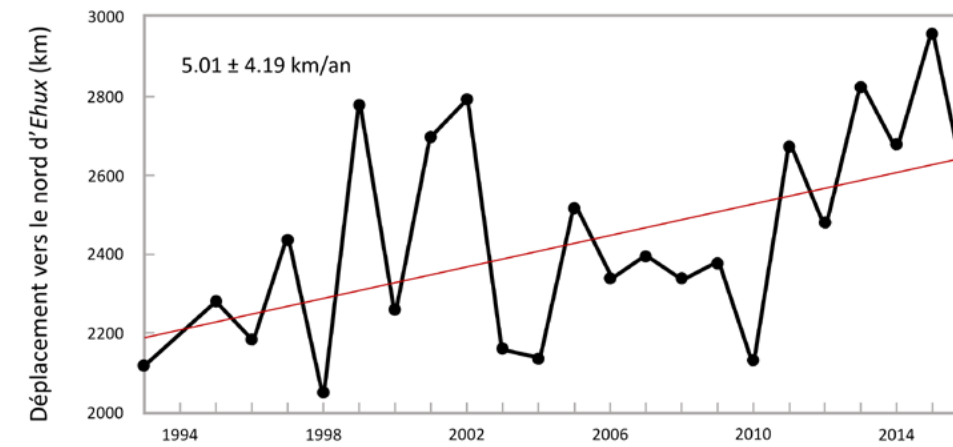


Figure 4.1 Déplacement vers le nord d'*Emiliana huxleyi* (EHux). Figure tirée de Oziel et coll., 2020, un article sous licence CC BY 4.0.



4.2 Une analyse des caractéristiques morphologiques de plus de 28 000 images de zooplancton recueillies dans la baie de Baffin, au Canada, à l'aide d'un système d'imagerie sous-marin a révélé que les caractéristiques des copépodes variaient selon les propriétés de la masse d'eau et les dynamiques spatiotemporelles de la fonte de la glace. Les grands copépodes comme *Calanus hyperboreus* sont plus abondants dans les eaux arctiques recouvertes de glace alors que les plus petites espèces comme *C. finmarchicus* dominent les eaux libres advectées de l'Atlantique (Vilgrain et coll., 2021).

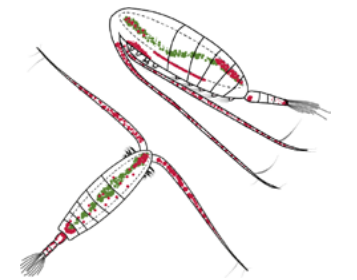


Illustration de copépodes arctiques. © Laure Vilgrain

4.3 Les systèmes d'imagerie du plancton s'avèrent des outils cruciaux pour mieux connaître l'écologie des producteurs secondaires. Plus particulièrement, ces systèmes peuvent maintenant être couplés à des techniques d'apprentissage automatique pour faire le suivi de la répartition du zooplancton à l'aide de l'expression de traits fonctionnels morphologiques au niveau individuel (Orenstein et coll., 2022). Cette nouvelle approche contribuera à mieux démontrer les dynamiques du réseau trophique et les cycles du carbone des océans.



## 5. Relations trophiques et transfert d'énergie dans le réseau trophique

Sélection de faits saillants de la recherche

Il est crucial d'identifier les relations trophiques ainsi que la variabilité régionale et saisonnière des voies principales par lesquelles l'énergie et le carbone sont transférés dans les réseaux trophiques de l'Arctique et du subarctique afin de déterminer la stabilité, la complexité et la résilience de l'écosystème aux changements climatiques.

5.1 À l'aide de marqueurs d'acides gras de diatomées, il a été démontré que le contenu d'acides gras essentiels des copépodes est principalement influencé par l'alimentation récente au maximum profond de chlorophylle (Figure 5.1). La présence de maximums profonds de chlorophylle à longue durée de vie demeure donc essentielle pour le zooplancton et le transfert des acides gras essentiels dans les réseaux trophiques de l'océan Arctique. Ces résultats remettent également en question le paradigme selon lequel les copépodes doivent s'appuyer principalement sur des efflorescences de surface à court terme pour stocker rapidement des lipides en prévision de l'hiver à venir (Marmillot, 2023).

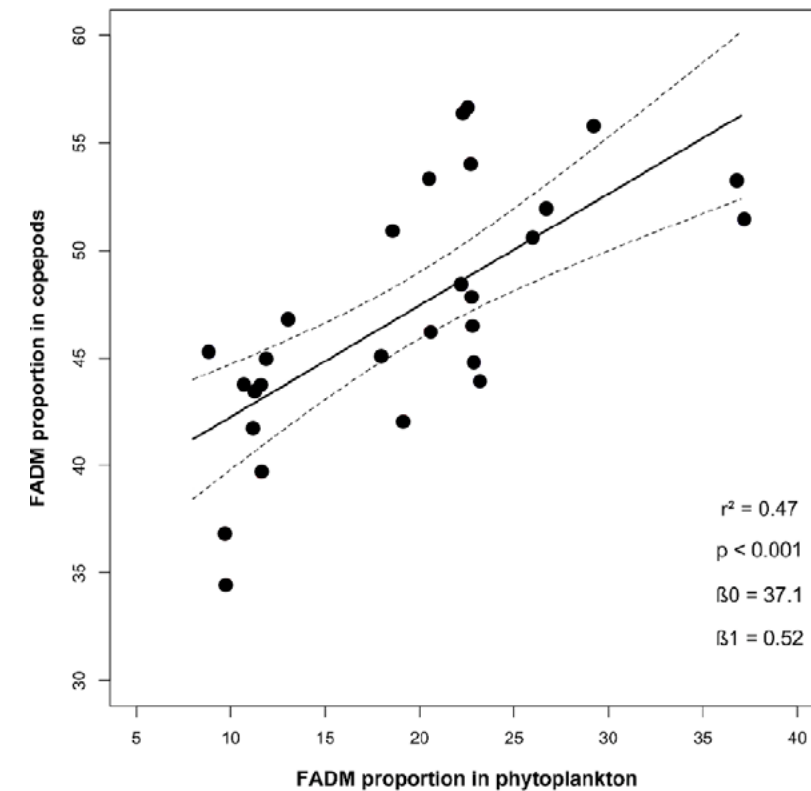


Figure 5.1 Relation entre les marqueurs d'acides gras de diatomées (FADM) du phytoplancton et des copépodes. Les lignes en pointillé représentent l'intervalle de confiance à 95%. Figure adaptée de Marmillot, 2023, © Vincent Marmillot.

5.2 De fortes corrélations ont été observées entre la production saisonnière et annuelle par les algues de glace d'isoprénoïdes hautement ramifiés et d'acides gras polyinsaturés essentiels (par exemple, les oméga-3) et leur présence dans la coque du Groenland (*Serripes groenlandicus*), un bivalve filtreur arctique (Amiriaux et coll., 2021). Ces résultats soulignent l'influence de la production de lipides associés à la banquise sur la qualité et la capacité reproductive des bivalves. Ils mettent également en lumière le rôle crucial que joue l'interaction des milieux pélagiques et benthiques dans le cycle des nutriments et le transfert d'énergie dans les réseaux trophiques de l'Arctique.



*Serripes groenlandicus*

5.3 Au Nunavik, la valeur nutritionnelle des organismes benthiques varie en fonction de la stratégie d'alimentation de ces derniers. Les concentrations d'acides gras des espèces des niveaux trophiques supérieurs, telles que l'étoile de mer, étaient généralement plus élevées que celles des niveaux trophiques inférieurs (Figure 5.3). De plus, elles présentaient des niveaux de sélénium comparables à d'autres aliments traditionnels, comme la viande et la graisse de phoque et de béluga (Van Doorn, 2021).

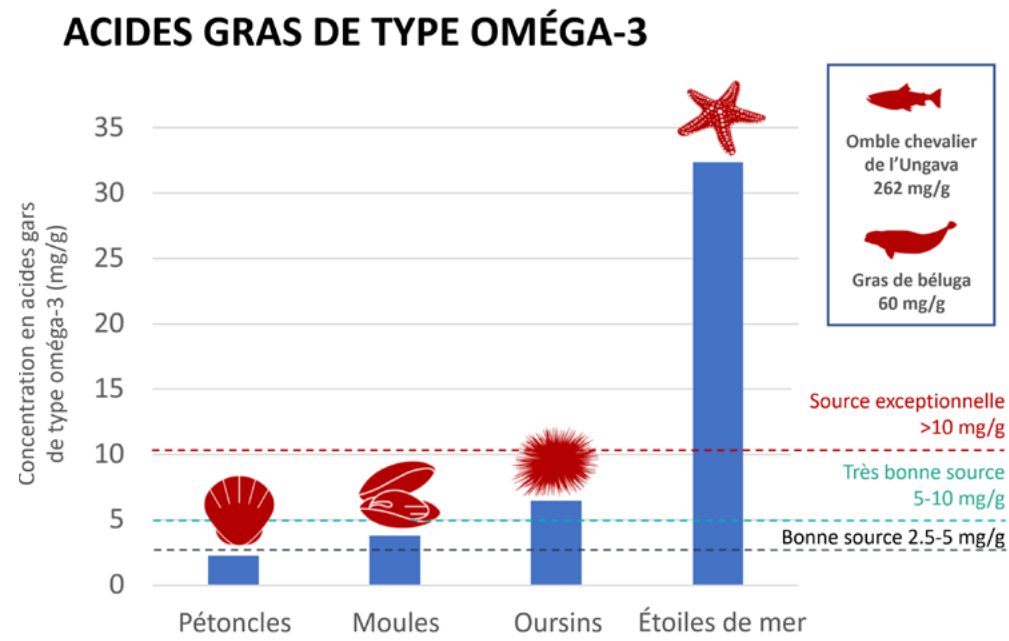


Figure 5.3 Les étoiles de mer sont des sources exceptionnelles d'oméga-3. © Chaire Littoral

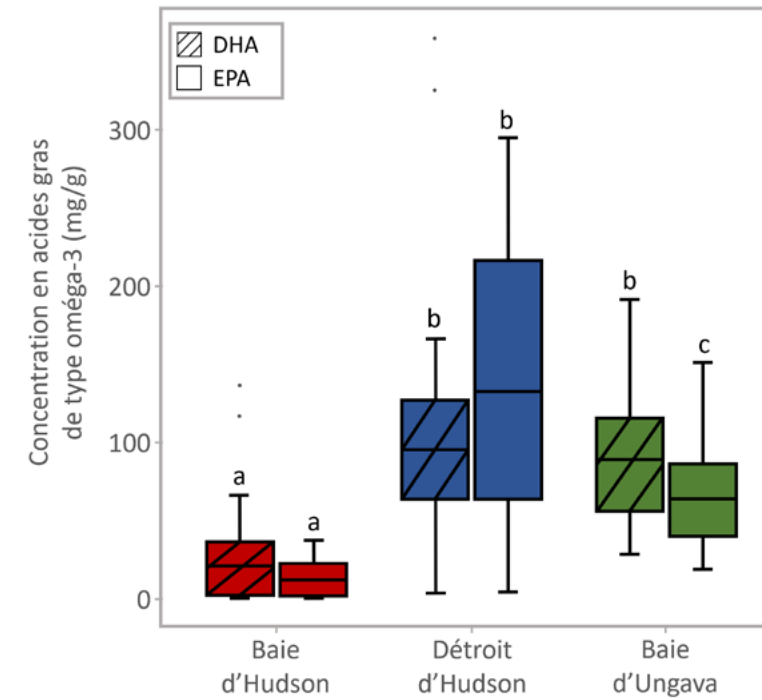
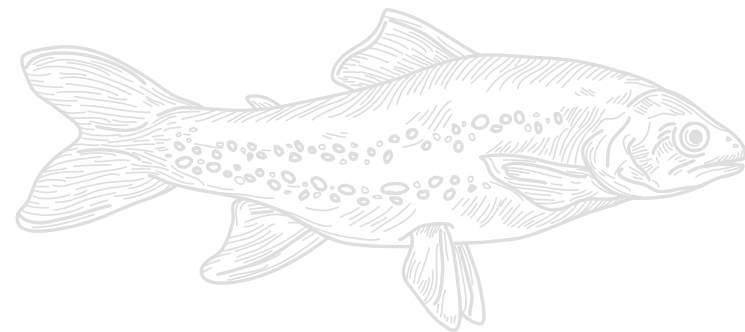


Figure 5.4 Teneur en oméga-3 de l'omble chevalier des trois régions marines du Nunavik. Les boîtes à moustaches représentent les moyennes arithmétiques des concentrations en oméga-3 et l'erreur type des moyennes. © Sara Bolduc

5.4 La valeur nutritionnelle de l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*), mesurée par les concentrations d'oméga-3 polyinsaturés à longue chaîne dans la chair, varie selon les régions (Figure 5.4) et les différences de régime alimentaire. Les populations d'ombles chevaliers de la baie et du détroit d'Hudson ont une alimentation plutôt pélagique, alors que celles de la baie d'Ungava s'alimentent davantage de proies benthiques. Dans les trois régions du Nunavik, l'omble chevalier présente des concentrations exceptionnelles d'oméga-3 (Bolduc, 2021).

### Génomique des populations d'ombles chevaliers

L'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) est une espèce de haute importance pour les populations côtières nordiques et représente une source d'alimentation traditionnelle riche en composés essentiels. La structure de la population d'ombles chevaliers au Nunavik a été étudiée en appliquant des méthodes génomiques. Les résultats indiquent que les populations de cette espèce sont adaptées à leur environnement (température, salinité, etc.) et génétiquement distinctes entre les trois régions écologiques du Nunavik : la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava. Ces résultats pourraient être pris en compte dans les plans régionaux de gestion durable pour la pêche de l'omble chevalier (Dallaire et coll., 2021).



## 6. Contaminants environnementaux et incidences sur la santé humaine dans le Nord

Sélection de faits saillants de la recherche

L'exposition des communautés côtières nordiques à des contaminants environnementaux par la voie de l'alimentation traditionnelle est une préoccupation majeure pour la santé humaine dans l'Arctique. Les études de surveillance fournissent des informations essentielles aux organisations locales pour gérer les risques pour la santé humaine associés à l'exposition aux contaminants. Elles promeuvent également les aliments traditionnels locaux, qui sont une source de qualité nutritionnelle exceptionnelle tout en revêtant une importance culturelle, sociale et économique pour ces communautés.

6.1 Les apports moyens estimés en méthylmercure (MeHg) basés sur la consommation totale d'aliments traditionnels chez les femmes enceintes inuites du Nunavik ont révélé des variations mensuelles importantes (Figure 6.1). Par ailleurs, ces apports étaient deux fois plus élevés que les valeurs recommandées pour les femmes enceintes. La viande de béluga constituait la principale source quotidienne de MeHg chez ces femmes, particulièrement en été et au début de l'automne. Il est essentiel de comprendre les variations saisonnières dans la consommation alimentaire traditionnelle pour déterminer l'exposition au MeHg, mettre en œuvre des mesures préventives et évaluer l'efficacité de la réglementation internationale ([de Moraes Pontual et coll., 2021](#)).

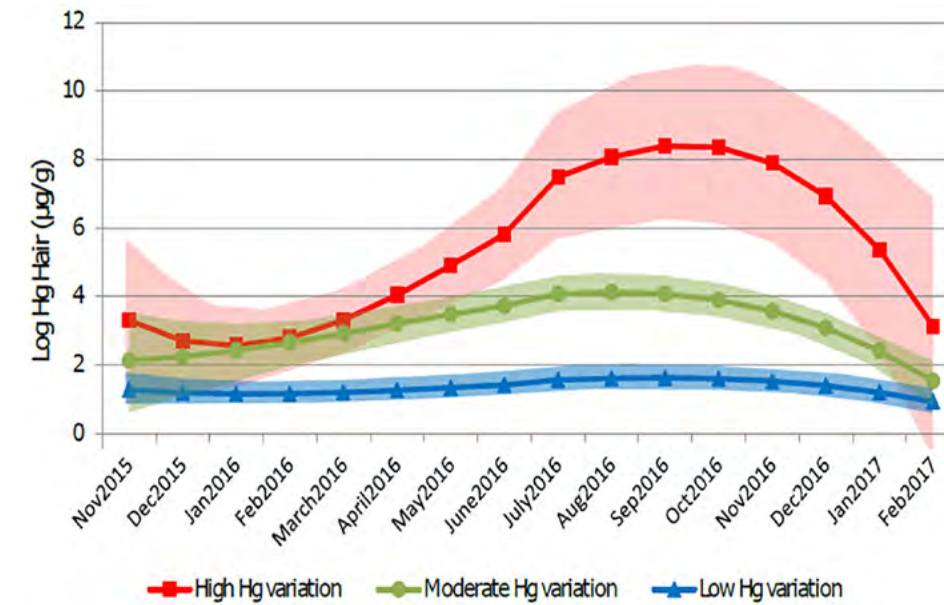


Figure 6.1  
Variation mensuelle de la concentration de mercure dans les cheveux de trois groupes de femmes enceintes du Nunavik. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance à 95%. Figure tirée de de Moraes Pontual et coll., 2021, un article sous licence CC BY-NC-ND 4.0.

6.2 La sélénonéine est le principal type de sélénium présent dans le mattaaq de béluga. Elle se trouve également en concentrations élevées dans les globules rouges des Inuits du Nunavik (Figure 6.2) et est corrélée positivement à la consommation de cette nourriture traditionnelle très appréciée. L'une des hypothèses à l'étude est que la sélénonéine pourrait protéger de la toxicité du méthylmercure en augmentant sa déméthylation dans les globules rouges ([Achouba et coll., 2019](#); [Little et coll., 2019](#)).

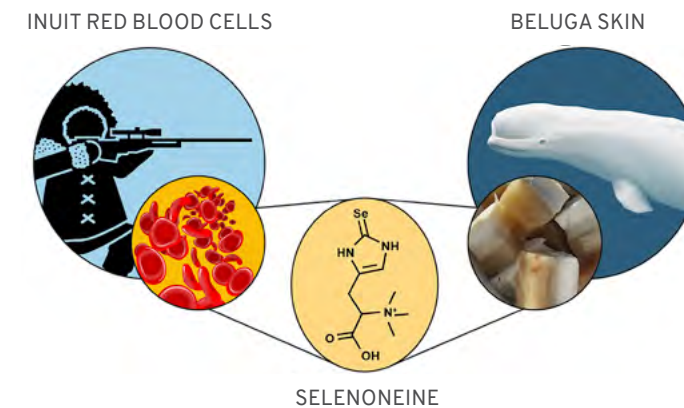


Figure 6.2  
La sélénoneine se trouve en forte concentration dans les globules rouges des Inuits et le mattaaq de béluga. Figure tirée de Achouba et al., 2019, un article sous licence CC BY-NC-ND 4.0.

### Mise au point d'un instrument portable pour mesurer les contaminants dans les aliments traditionnels

Des étapes importantes ont été franchies dans le développement d'un outil portable, fiable et efficace permettant de détecter le mercure dans les aliments traditionnels. Un nouveau fluorophore sensible au mercure a été synthétisé (Picard-Lafond et coll., 2020) et ses propriétés de détection ont été mises à l'essai. La fluorescence exaltée par le métal (MEF) a été utilisée dans la conception de ce détecteur de mercure. La MEF accroît la luminosité et la photostabilité des fluorophores sensibles à la cible (Picard-Lafond et coll., 2022) et présente un excellent potentiel de détection des métaux lourds par fluorescence.

6.3 Les acides perfluoroalkylés (PFAA) à longue chaîne sont des composés synthétiques hautement persistants, qui peuvent migrer vers les pôles et s'accumuler dans les espèces marines, en particulier celles situées au sommet de la chaîne trophique. Les concentrations d'exposition aux PFAA chez la population inuite du Nunavik se sont révélées jusqu'à sept fois supérieures à celles de la population canadienne générale (Aker et coll., 2021). Une multitude d'effets sur la santé sont associés à une exposition élevée aux PFAA dans d'autres populations.



6.4 L'exposition des femmes inuites enceintes du Nunavik aux congénères des acides perfluoroalkylés à longue chaîne (PFAA), tels que l'acide perfluorononanoïque (PFNA), l'acide perfluorodécanoïque (PFDA) et l'acide perfluoro-undécanoïque (PFUdA), a augmenté entre 2011 et 2017 jusqu'à 21% dans certains cas. Ces niveaux d'exposition figurent parmi les plus élevés dans l'Arctique circumpolaire et ailleurs. Cela indique que les femmes enceintes du Nunavik sont disproportionnellement exposées à ces PFAA (Figure 6.4) en raison de la bioaccumulation dans les aliments marins traditionnels. Il est urgent que des réglementations strictes concernant les PFAA soient mises en place afin de protéger les espèces traditionnellement consommées (Caron-Beaudoin et coll., 2020).

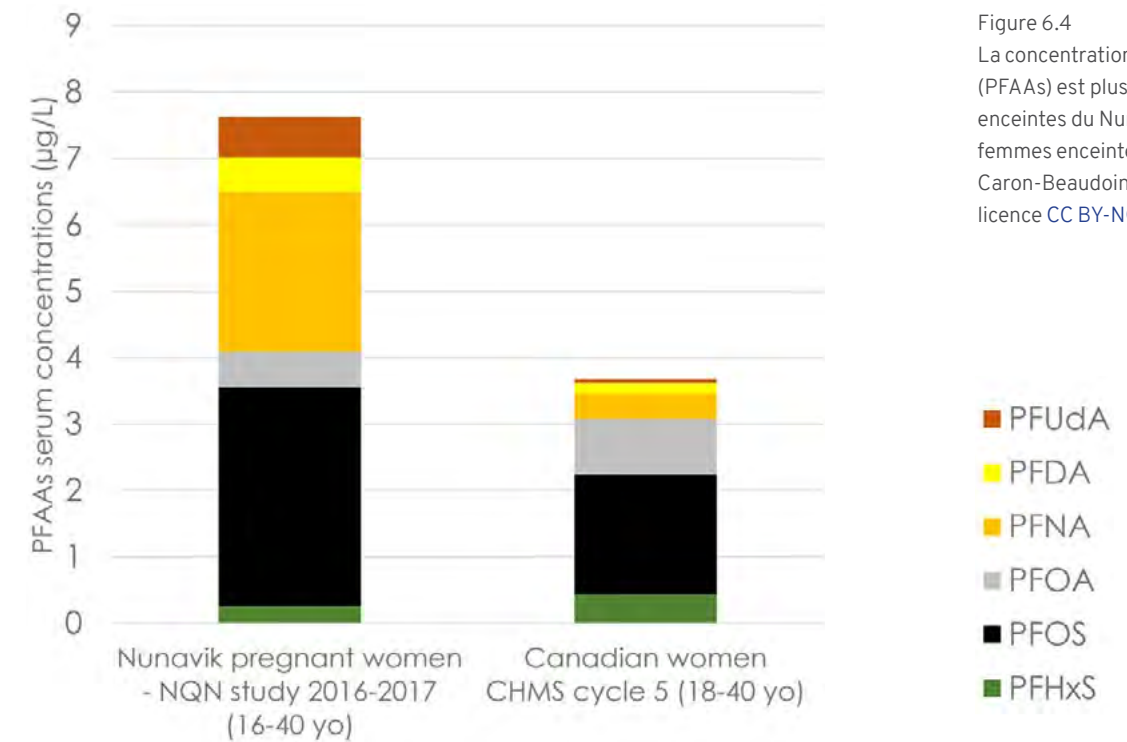


Figure 6.4 La concentration d'acides perfluoroalkyliques (PFAAs) est plus élevée chez les femmes enceintes du Nunavik que pour la moyenne des femmes enceintes canadiennes. Figure tirée de Caron-Beaudoin et al., 2020, un article sous licence CC BY-NC-ND 4.0.

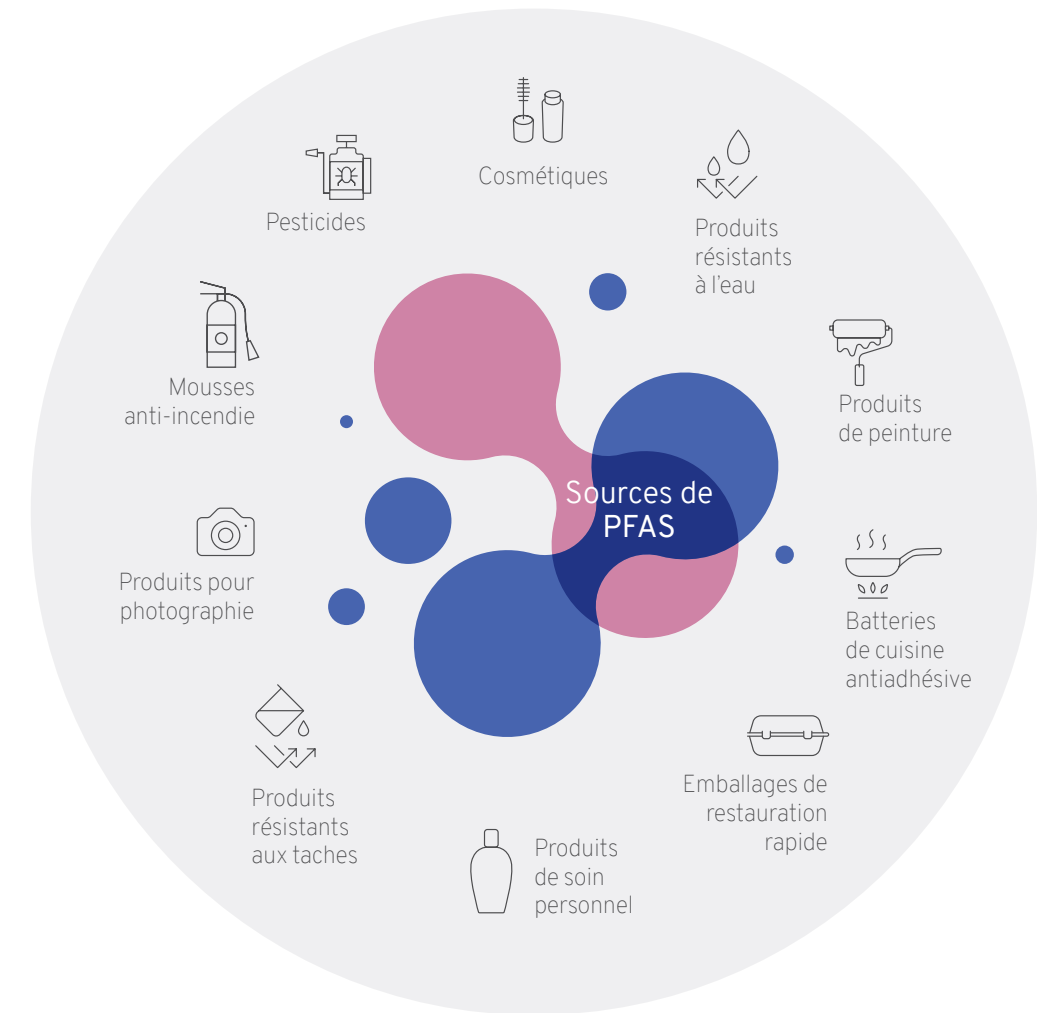


## Des résultats de recherche aux politiques

Les résultats obtenus grâce au partenariat entre des scientifiques de Sentinelle Nord et des Inuits du Nunavik ont été essentiels pour la proposition du Canada à la Convention de Stockholm visant à réglementer les acides perfluorocarboxyliques (PFCA) à longue chaîne, leurs sels et leurs précurseurs, également appelés «polluants éternels». Soulignant l'injustice environnementale subie par les Inuits, la proposition du Canada a franchi des étapes importantes lors des réunions du Comité d'étude des polluants organiques persistants, en 2022. L'évaluation du Comité a conclu que ces produits chimiques posent un risque important pour l'environnement et la santé humaine. Les PFCA à longue chaîne, qui font partie de la classe chimique des substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS), sont donc passés à l'étape suivante du processus, qui consiste à évaluer les impacts socioéconomiques des différentes options de réglementation et de gestion. Après cette étape, la Conférence des Parties décidera s'il faut, par mesure de précaution, interdire l'utilisation de ces produits chimiques ou imposer des mesures réglementaires strictes.



## Les PFAS sont utilisés dans de nombreux produits de consommation



Lutter efficacement contre les effets des changements climatiques et des contaminants environnementaux afin d'améliorer les résultats en matière de santé requiert une approche transdisciplinaire et une meilleure intégration du processus de développement des connaissances dans l'élaboration des politiques.



## 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.

- **Élucider les interactions microbiote-hôte présentes dans les maladies cardiométaboliques et mentales à l'aide de capteurs optiques multimodaux novateurs**

Chercheurs principaux: Denis Boudreau (Dép. de chimie),  
André Marette (Dép. de médecine)

- **Lumière et océan Arctique en changement: comprendre les liens complexes entre les changements globaux et la santé des Inuits (BriGHT)**

Chercheurs principaux: Mélanie Lemire (Dép. de médecine sociale et préventive), Jean-Éric Tremblay (Dép. de biologie)

- **Outils innovants pour le suivi de la qualité alimentaire dans les environnements nordiques**

Chercheurs principaux: Dominic Larivière (Dép. de chimie),  
Jean Ruel (Dép. de génie mécanique)

- **Utilisation des microalgues diatomées pour améliorer le traitement des dysfonctionnements de l'horloge biologique liés à la lumière chez les habitants de l'Arctique**

Chercheur principal: Johann Lavaud (Dép. de biologie)

- **Vers une meilleure compréhension de l'interaction lumière-matière: concevoir de nouveaux outils et des approches innovantes pour l'étude du Nord grâce à une connaissance approfondie des propriétés des structures tant microscopiques que macroscopiques**

Chercheur principal: Pierre Marquet (Dép. de psychiatrie et de neurosciences)

- **Chaire de recherche en partenariat Sentinelle Nord en approches écosystémiques de la santé**

Titulaire: Mélanie Lemire (Dép. de médecine sociale et préventive)

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

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

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.

- **Génomique de populations de l'omble chevalier au Nunavik et son adaptation locale aux conditions environnementales**

Xavier Dallaire (bourse de maîtrise)

- **Impact of climate change on the nutritional quality of traditional Inuit foods: *Mytilus edulis* and *Mya truncata* (Bivalvia)**

Rémi Amiriaux (stage postdoctoral)

- **In situ optical measurements in sea ice**

Christian Katlein (stage postdoctoral)

- **Modélisation des réseaux moléculaires de l'horloge biologique des diatomées arctiques aux modèles humains**

Michel Lavoie (stage postdoctoral)

- **Network structures of Northern oceanography**

Achim Randelhoff (stage postdoctoral)

- **The association between per and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and metabolic outcomes among Nunavimmiut adults**

Amira Aker (stage postdoctoral)

Projets de recherche  
cités dans ce chapitre



UiT / THE ARCTIC UNIVERSITY  
OF NORWAY



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.

- **Application de l'intelligence artificielle à l'identification de traits fonctionnels à partir d'images à haute résolution**

Chercheurs principaux: Éric Debreuve (Université Côte d'Azur), Frédéric Maps (Dép. de biologie)

- **Indice de coloration rouge du Calanus, de l'intelligence artificielle à l'analyse d'images (CARDINAL)**

Chercheurs principaux: Sünnje Basedow (UiT The Arctic University of Norway), Frédéric Maps (Dép. de biologie)

- **Rôle des horloges circadiennes dans la synchronisation saisonnière dans l'Arctique**

Chercheurs principaux: Johann Lavaud (Dép. de biologie), David Hazlerigg (UiT The Arctic University of Norway)

- **Caractérisation de la variabilité du champ lumineux sous les glaces océaniques de l'Arctique à l'aide de véhicules autonomes sous-marins et aériens**

Chercheurs principaux: Marcel Babin (Dép. de biologie), Jørgen Berge (UiT The Arctic University of Norway)

- **Unité mixte internationale de recherche Takuvik**

Directeur: Marcel Babin (Dép. de biologie)  
Centre national de la recherche scientifique, France  
Associée à la CERC sur la télédétection de la nouvelle frontière arctique du Canada



## 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.

- **Caractérisation de la variabilité du champ lumineux sous les glaces océaniques de l'Arctique à l'aide de véhicules autonomes sous-marins et aériens**

Chercheurs principaux: Marcel Babin (Dép. de biologie), Jørgen Berge (UiT The Arctic University of Norway)  
*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'UiT The Arctic University of Norway*

- **Des systèmes alimentaires ruraux durables et résistants pour les générations futures de Nunavimmiut : promouvoir la sécurité alimentaire tout en s'adaptant aux environnements nordiques en changement**

Chercheurs principaux: Frédéric Maps (Dép. de biologie), Tiff-Annie Kenny (Dép. de médecine sociale et préventive)

- **Évaluation des risques émergents pour la santé des populations humaines circumpolaires dans l'Arctique (SEARCH)**

Chercheurs principaux: Pierre Ayotte (Dép. de médecine sociale et préventive), Torkjel M. Sandanger (UiT The Arctic University of Norway)  
*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'UiT The Arctic University of Norway*

- **Élucider les liens entre l'environnement marin et les qualités nutritives du béluga et des bivalves à Quaqtaq**

Chercheurs principaux: Mélanie Lemire (Dép. de médecine sociale et préventive), Jean-Éric Tremblay (Dép. de biologie)  
*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'Institut nordique du Québec*

- **Microbiomes de la dernière zone glaciaire et santé de l'écosystème arctique**

Chercheurs principaux: Alexander Culley (Dép. de biochimie, microbiologie et bio-informatique), Warwick Vincent (Dép. de biologie)

- **Projet sur les interactions côtières du Nunatsiavut (PICN): climat, environnement et stratégies de subsistance des Inuits du Labrador**

Chercheur principal: James Woollett (Dép. des sciences historiques)  
*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'Institut nordique du Québec*

- **TININNIMIUTAIT: évaluer le potentiel des aliments marins locaux accessibles depuis le littoral pour accroître la sécurité alimentaire et la souveraineté au Nunavik**

Chercheurs principaux: Lucie Beaulieu (Dép. des sciences des aliments), Ladd Johnson (Dép. de biologie)

- **UVILUQ: l'utilisation de biopsies liquides pour le monitoring de l'état de santé des écosystèmes marins côtiers**

Chercheur principal: Yves St-Pierre (Centre Eau Terre Environnement, Institut national de la recherche scientifique)  
*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'Institut nordique du Québec*

- **Application de l'intelligence artificielle à l'identification de traits fonctionnels à partir d'images à haute résolution**

Chercheurs principaux: Éric Debreuve (Université Côte d'Azur), Frédéric Maps (Dép. de biologie)  
*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'Université Côte d'Azur*

- **Effet de la lumière et de la température sur l'activité du Calanus dans l'Arctique (CalAct)**

Chercheurs principaux: Malin Daase (UiT The Arctic University of Norway), Marcel Babin (Dép. de biologie)  
*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'UiT The Arctic University of Norway*

- **Indice de coloration rouge du Calanus, de l'intelligence artificielle à l'analyse d'images (CARDINAL)**

Chercheurs principaux: Sünne Basedow (UiT The Arctic University of Norway), Frédéric Maps (Dép. de biologie)  
*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'UiT The Arctic University of Norway*

- **Rôle des horloges circadiennes dans la synchronisation saisonnière dans l'Arctique**

Chercheurs principaux: Johann Lavaud (Dép. de biologie), David Hazlerigg (UiT The Arctic University of Norway)  
*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'UiT The Arctic University of Norway*

- **Chaire de recherche en partenariat Sentinelle Nord en approches écosystémiques de la santé**

Titulaire: Mélanie Lemire (Dép. de médecine sociale et préventive)

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

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

- **Unité mixte internationale de recherche Takuvik**

Directeur: Marcel Babin (Dép. de biologie)

## Références

Publications  
issues de  
Sentinelle Nord









- 🔗 Achouba, A., Dumas, P., Ouellet, N., Little, M., Lemire, M., et Ayotte, P. (2019). Selenoneine is a major selenium species in beluga skin and red blood cells of Inuit from Nunavik. *Chemosphere*, 229, 549-558. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.191>
- 🔗 Aker, A. M., Ayotte, P., Gaudreau, E., Beaudoin, É. C., Silva, A. D., Dumas, P., ... Lemire, M. (2021). *Exposure to per and polyfluoroalkyl acids (PFAAs) from diet and lifestyle factors among Inuit adults of Nunavik, Canada* [communication]. Conférence de l'International Society of Environmental Epidemiology (ISEE). <https://doi.org/10.1289/isee.2021.o-lt-065>
- 🔗 Amiraux, R., Archambault, P., Moriceau, B., Lemire, M., Babin, M., Memery, L., ... Tremblay, J.-E. (2021). Efficiency of sympagic-benthic coupling revealed by analyses of n-3 fatty acids, IP25 and other highly branched isoprenoids in two filter-feeding Arctic benthic molluscs: *Mya truncata* and *Serripes groenlandicus*. *Organic Geochemistry*, 151, 104160. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2020.104160>
- 🔗 Amiraux, R., Lavaud, J., Cameron-Bergeron, K., Matthes, L. C., Peeken, I., Mundy, C. J., Babb, D. G., et Tremblay, J.-É. (2022). Content in fatty acids and carotenoids in phytoplankton blooms during the seasonal sea ice retreat in Hudson Bay complex, Canada. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 10(1), 00106. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00106>
- 🔗 Bolduc, S. (2021). *Évaluation des différences inter-régionales de la diète de bomble chevalier anadrome (Salvelinus alpinus) au Nunavik et ses liens avec les indicateurs de sa qualité nutritive* [Mémoire de maîtrise, Université Laval]. CorpusUL. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/70314>
- 🔗 Cameron-Bergeron, K. (2020). *Qualités nutritives des microalgues marines au Nunavik* [Mémoire de maîtrise, Université Laval]. CorpusUL. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/67222>
- 🔗 Caron-Beaudoin, É., Ayotte, P., Blanchette, C., Muckle, G., Avar, E., Ricard, S., et Lemire, M. (2020). Perfluoroalkyl acids in pregnant women from Nunavik (Quebec, Canada): Trends in exposure and associations with country foods consumption. *Environment International*, 145, 106169. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106169>
- 🔗 Croteau, D., Guérin, S., Bruyant, F., Ferland, J., Campbell, D. A., Babin, M., et Lavaud, J. (2021). Contrasting nonphotochemical quenching patterns under high light and darkness aligns with light niche occupancy in Arctic diatoms. *Limnology and Oceanography*, 66(S1), S231-S245. <https://doi.org/10.1002/lno.11587>

🔗 Libre accès

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

Publications  
issues de  
Sentinelle Nord

- 🔗 Croteau, D., Lacour, T., Schiffrine, N., Morin, P.-I., Forget, M.-H., Bruyant, F., Ferland, J., Lafond, A., Campbell, D. A., Tremblay, J.-É., Babin, M., et Lavaud, J. (2022). Shifts in growth light optima among diatom species support their succession during the spring bloom in the Arctic. *Journal of Ecology*, 110(6), 1356-1375. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13874>
- 🔗 Dallaire, X., Normandeau, É., Mainguy, J., Tremblay, J.-É., Bernatchez, L., et Moore, J.-S. (2021). Genomic data support management of anadromous Arctic Char fisheries in Nunavik by highlighting neutral and putatively adaptive genetic variation. *Evolutionary Applications*, 14(7), 1880-1897. <https://doi.org/10.1111/eva.13248>
- 🔗 de Moraes Pontual, M. M., Ayotte, P., Little, M., Furgal, C., Boyd, A. D., Muckle, G., ... Lemire, M. (2021). Seasonal variations in exposure to methylmercury and its dietary sources among pregnant Inuit women in Nunavik, Canada. *Science of the Total Environment*, 755(Pt 2), 143196. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143196>
- 🔗 Katlein, C., Valcic, L., Lambert-Girard, S., et Hoppmann, M. (2021). New insights into radiative transfer within sea ice derived from autonomous optical propagation measurements. *The Cryosphere*, 15(1), 183-198. <https://doi.org/10.5194/tc-15-183-2021>
- 🔗 Lavoie, M., Saint-Béat, B., Strauss, J., Guérin, S., Allard, A., Hardy, S., ... Lavaud, J. (2020). Genome-scale metabolic reconstruction and in silico perturbation analysis of the polar diatom *Fragilariopsis cylindrus* predicts high metabolic robustness. *Biology*, 9(2), 30. <https://doi.org/10.3390/biology9020030>
- 🔗 Little, M., Achouba, A., Dumas, P., Ouellet, N., Ayotte, P., et Lemire, M. (2019). Determinants of selenoneine concentration in red blood cells of Inuit from Nunavik (Northern Québec, Canada). *Environment International*, 127, 243-252. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.077>
- 🔗 Marmillot, V., Parrish, C. C., Tremblay, J.-É., Gosselin, M., et MacKinnon, J. F. (2020). Environmental and biological determinants of algal lipids in Western Arctic and Subarctic seas. *Frontiers in Environmental Science*, 8(265). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.538635>
- 🔗 Marmillot, V. (2023). *Synthèse et transfert de lipides à la base des réseaux alimentaires marins de l'Arctique canadien* [Thèse de doctorat, Université Laval]. CorpusUL. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/111783>

- Publications issues de Sentinelle Nord
-  Orenstein, E. C., Ayata, S.-D., Maps, F., Becker, É. C., Benedetti, F., Biard, T., Garidel-Thoron, T., Ellen, J. S., Ferrario, F., Giering, S. L. C., Guy-Haim, T., Hoebeke, L., Iversen, M. H., Kiørboe, T., Lalonde, J.-F., Lana, A., Laviale, M., Lombard, F., Lorimer, T., ... Irisson, J.-O. (2022). Machine learning techniques to characterize functional traits of plankton from image data. *Limnology and Oceanography*, 67(8), 1647-1669. <https://doi.org/10.1002/lno.12101>
  -  Oziel, L., Baudena, A., Ardyna, M., Massicotte, P., Randelhoff, A., Sallée, J. B., ... Babin, M. (2020). Faster Atlantic currents drive poleward expansion of temperate phytoplankton in the Arctic Ocean. *Nature Communications*, 11(1), 1705. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15485-5>
  -  Perron, C., Katlein, C., Lambert-Girard, S., Leymarie, E., Guinard, L.-P., Marquet, P., et Babin, M. (2021). Development of a diffuse reflectance probe for in situ measurement of inherent optical properties in sea ice. *The Cryosphere*, 15(9), 4483-4500. <https://doi.org/10.5194/tc-15-4483-2021>
  -  Picard-Lafond, A., Larivière, D., et Boudreau, D. (2020). Revealing the hydrolysis mechanism of a Hg<sup>2+</sup>-reactive fluorescein probe: Novel insights on thionocarbonated dyes. *ACS Omega*, 5(1), 701-711. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03333>
  -  Picard-Lafond, A., Larivière, D., et Boudreau, D. (2022). Metal-enhanced Hg<sup>2+</sup>-responsive fluorescent nanoprobes: From morphological design to application to natural waters. *ACS Omega*, 7(26), 22944-22955. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02985>
  -  Randelhoff, A., Lacour, L., Marec, C., Leymarie, E., Lagunas, J., Xing, X., ... Babin, M. (2020). Arctic mid-winter phytoplankton growth revealed by autonomous profilers. *Science Advances*, 6(39), eabc2678. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc2678>
  -  Van Doorn, C. (2021). *Valeur nutritive du réseau trophique benthique au Nunavik, Canada* [Mémoire de maîtrise, Université Laval]. CorpusUL. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/71618>
  -  Vilgrain, L., Maps, F., Picheral, M., Babin, M., Aubry, C., Irisson, J.-O., et Ayata, S.-D. (2021). Trait-based approach using in situ copepod images reveals contrasting ecological patterns across an arctic ice melt zone. *Limnology and Oceanography*, 66(4), 1155-1167. <https://doi.org/10.1002/lno.11672>

Références  
externes

- Alava, J. J., Cheung, W. W. L., Ross, P. S., et Sumaila, U. R. (2017). Climate change-contaminant interactions in marine food webs: Toward a conceptual framework. *Global Change Biology*, 23(10), 3984-4001. <https://doi.org/10.1111/gcb.13667>
- Arrigo, K. R., et van Dijken, G. L. (2015). Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Progress in Oceanography*, 136, 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.05.002>
- Basu, N., Horvat, M., Evers David, C., Zastenskaya, I., Weihe, P., et Tempowski, J. (2018). A state-of-the-science review of mercury biomarkers in human populations worldwide between 2000 and 2018. *Environmental Health Perspectives*, 126(10). <https://doi.org/10.1289/EHP3904>
- Burkow, I. C., et Kallenborn, R. (2000). Sources and transport of persistent pollutants to the Arctic. *Toxicology Letters*, 112-113, 87-92. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(99\)00254-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(99)00254-4)
- Carmack, E., Polyakov, I., Padman, L., Fer, I., Hunke, E., Hutchings, J., Jackson, J., Kelley, D., Kwok, R., Layton, C., Melling, H., Perovich, D., Persson, O., Ruddick, B., Timmermans, M.-L., Toole, J., Ross, T., Vavrus, S., et Winsor, P. (2015). Toward quantifying the increasing role of oceanic heat in sea ice loss in the new Arctic. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2079-2106. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00177.1>
- Castellani, G., Veyssièrre, G., Karcher, M., Stroeve, J., Banas, S. N., Bouman, A. H., Brierley, S. A., Connan, S., Cottier, F., Große, F., Hobbs, L., Katlein, C., Light, B., McKee, D., Orkney, A., Proud, R., et Schourup-Kristensen, V. (2022). Shine a light: Under-ice light and its ecological implications in a changing Arctic Ocean. *Ambio*, 51(2), 307-317. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01662-3>
- Falardeau, M., Bennett, E. M., Else, B., Fisk, A., Mundy, C. J., Choy, E. S., Ahmed, M. M., Harris, L. N., et Moore, J.-S. (2022). Biophysical indicators and Indigenous and Local Knowledge reveal climatic and ecological shifts with implications for Arctic Char fisheries. *Global Environmental Change*, 74, 102469. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102469>
- Falk-Petersen, S., Pavlov, V., Timofeev, S., et Sargent, J. R. (2007). Climate variability and possible effects on Arctic food chains: The role of *Calanus*. Dans: Ørbæk, J. B., Kallenborn, R., Tombre, I., Hegseth, E. N., Falk-Petersen, S., Hoel, A. H. (ed.) *Arctic Alpine Ecosystems and People in a Changing Environment*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-48514-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-48514-8_9)
- Fosheim, M., Primicerio, R., Johannesen, E., Ingvaldsen, R. B., Aschan M. M., et Dolgov, A. V. (2015). Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic. *Nature Climate Change*, 5, 673-677. <https://doi.org/10.1038/nclimate2647>

Références  
externes

- Foster, K. L., Stern, G. A., Pazerniuk, M. A., Hickie, B., Walkusz, W., Wang, F., et Macdonald, R. W. (2012). Mercury biomagnification in marine zooplankton food webs in Hudson Bay. *Environmental Science et Technology*, 46(23), 12952-12959. <https://doi.org/10.1021/es303434p>
- Grebmeier, J. M., et Barry, J. P. (1991). The influence of oceanographic processes on pelagic-benthic coupling in polar regions: A benthic perspective. *Journal of Marine Systems*, 2(3-4), 495-518. [https://doi.org/10.1016/0924-7963\(91\)90049-Z](https://doi.org/10.1016/0924-7963(91)90049-Z)
- Hibbeln, J. R. M. D., Ferguson, T. A., et Blasbalg, T. L. (2006). Omega-3 fatty acid deficiencies in neurodevelopment, aggression and autonomic dysregulation: Opportunities for intervention. *International Review of Psychiatry*, 18(2), 107-118. <https://doi.org/10.1080/09540260600582967>
- Hu, X. F., Kenny, T.-A., et Chan, H. M. (2018). Inuit country food diet pattern is associated with lower risk of coronary heart disease. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 118(7), 1237-1248. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2018.02.004>
- Kortsch, S., Primicerio, R., Fossheim, M., Dolgov, A. V., et Aschan, M. (2015). Climate change alters the structure of arctic marine food webs due to poleward shifts of boreal generalists. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1814). <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1546>
- Lefort, K. J., Garroway, C. J., et Ferguson, S. H. (2020). Killer whale abundance and predicted narwhal consumption in the Canadian Arctic. *Global Change Biology*, 26(8), 4276-4283. <https://doi.org/10.1111/gcb.15152>
- Lemire, M., Kwan, M., Laouan-Sidi, A. E., Muckle, G., Pirkle, C., Ayotte, P., et Dewailly, E. (2015). Local country food sources of methylmercury, selenium and omega-3 fatty acids in Nunavik, Northern Quebec. *Science of the Total Environment*, 509-510, 248-259. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.102>
- Lindsay, R., et Schweiger, A. (2015). Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations. *The Cryosphere*, 9(1), 269-283. <https://doi.org/10.5194/tc-9-269-2015>
- McKinney, M.A., McMeans, B.C., Tomy, G.T., Rosenberg, B., Ferguson, S.H., Morris, A., Muir, D.C.G., Fisk, A.T. (2012). Trophic transfer of contaminants in a changing Arctic marine food web: Cumberland Sound, Nunavut, Canada. *Environmental Science and Technology*, 46(18), 9914-9922. <https://doi.org/10.1021/es302761p>
- Møller, E. F., et Nielsen, T. G. (2020). Borealization of Arctic zooplankton—smaller and less fat zooplankton species in Disko Bay, Western Greenland. *Limnology and Oceanography*, 65(6), 1175-1188. <https://doi.org/10.1002/lno.11380>

Références  
externes

- Power, M., Dempson, B.J., Doidge, B., Michaud, W., Chavarie, L., Reist, J.D., Martin, F. et Lewis, A.E. (2012). Arctic charr in a changing climate: predicting possible impacts of climate change on a valued northern species. In Allard, M. and M. Lemay (eds.) Nunavik and Nunatsiavut: From science to policy. An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of climate change and modernization. ArcticNet Inc., Quebec City, Canada, p 199-221.
- Rapinski, M., Cuerrier, A., Harris, C., Elders of Ivujivik, Elders of Kangiqsujaq, et Lemire, M. (2018). Inuit perception of marine organisms: from folk classification to food harvest. *Journal of Ethnobiology*, 38(3), 333-355. <https://doi.org/10.2993/0278-0771-38.3.333>
- Roebeling, R., Traeger-Chatterjee, C., Evers-King, H., Lavergne, T., Membrive, O., et Loveday, B. (2021, 22 octobre). *State of Arctic and Antarctic sea ice in 2021*. EUMETSAT. <https://www.eumetsat.int/state-arctic-and-antarctic-sea-ice-2021>
- Rosol, R., Powell-Hellyer, S., et Chan, H. M. (2016). Impacts of decline harvest of country food on nutrient intake among Inuit in Arctic Canada: Impact of climate change and possible adaptation plan. *International Journal of Circumpolar Health*, 75(1), 31127. <https://doi.org/10.3402/ijch.v75.31127>
- Søreide, J. E., Leu, E., Berge, J., Graeve, M., et Falk-Petersen, S. T. (2010). Timing of blooms, algal food quality and *Calanus glacialis* reproduction and growth in a changing Arctic. *Global Change Biology*, 16(11), 3154-3163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02175.x>
- Veyssièrre, G., Castellani, G., Wilkinson, J., Karcher, M., Hayward, A., Stroeve, J. C., Nicolaus, M., Kim, J.-H., Yang, E.-J., Valcic, L., Kauker, F., Khan, A. L., Rogers, I. et Jung, J. (2022). Under-ice light field analysis in the western Arctic Ocean during late summer. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.643737>
- Welch, H. E., Bergmann, M. A., Siferd, T. D., Martin, K. A., Curtis, M. F., Crawford, R. E., Conover, R. J., et Hop, H. (1992). Energy flow through the marine ecosystem of the Lancaster Sound region, Arctic Canada. *Arctic*, 45(4), 343-357. <https://www.jstor.org/stable/40511483>

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](#) (Croteau et coll., 2022; Oziel et coll., 2020); [CC BY-NC-ND 4.0](#) (de Moraes Pontual et coll., 2021; Achouba et coll., 2019; Caron-Beaudoin et coll., 2020).



**Rédaction de l'introduction**

Keith Lévesque et Gérald Darnis

**Recherche et rédaction des faits saillants scientifiques**

Keith Lévesque et Sophie Gallais

**Révisions et édition finale**

Keith Lévesque, Aurélie Lévy et Pascale Ropars

**Remerciements**

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

Philippe Archambault, Marcel Babin, Sarah Bolduc, Denis Boudreau, Marie-Hélène Forget, Christian Katlein, Johann Lavaud, Mélanie Lemire, Frédéric Maps, Jean-Sébastien Moore, Jean-Éric Tremblay.

Nous remercions également Mary Thaler pour ses commentaires sur l'introduction.

**Crédits photographiques**

**Index**

Mathieu Ardyna	22
Mark Aspland	19, 20, 48
Philippe Bourseiller/ArcticNet	15
Suzie Côté et Adèle Luthi-Marie	17
Gérald Darnis	23, 24
Ariel Estulin/ArcticNet	15, 48
Marie-Hélène Forget	35
Martin Fortier/ArcticNet	11, 13, 21, 22, 24, 25, 29, 38, 47, 48
Cindy Grant	26
Keith Lévesque/ArcticNet	14
Lisa Matthes	16
Tommy Pontbriand	9, 48
Marc Robitaille	16
Natasha Thorpe	31
Imalirijit/Nunami Sukujainiq 2022 Science and Culture Land Camp	33

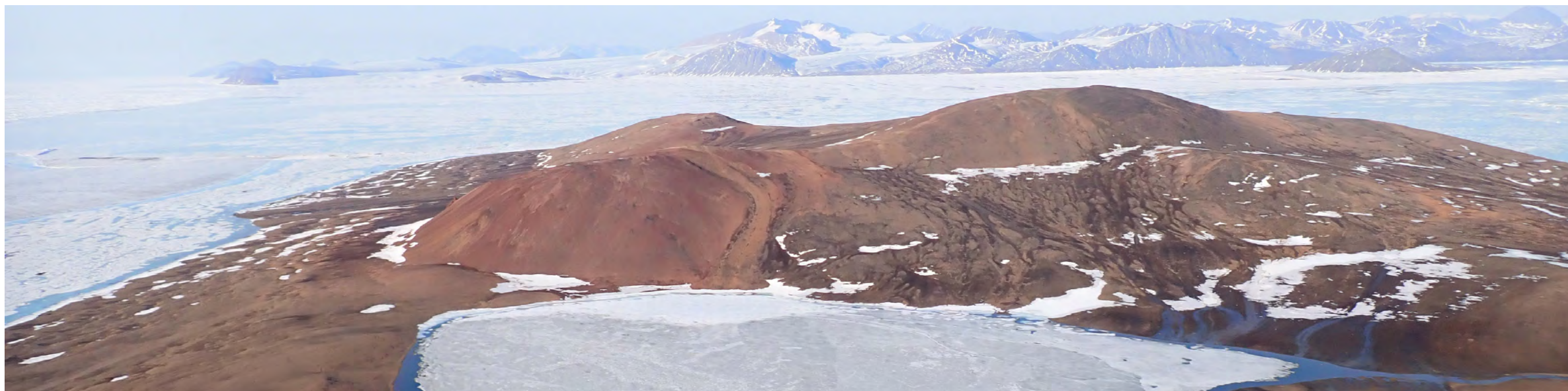




CHAPITRE 2

# Pergélisol et systèmes d'eau douce



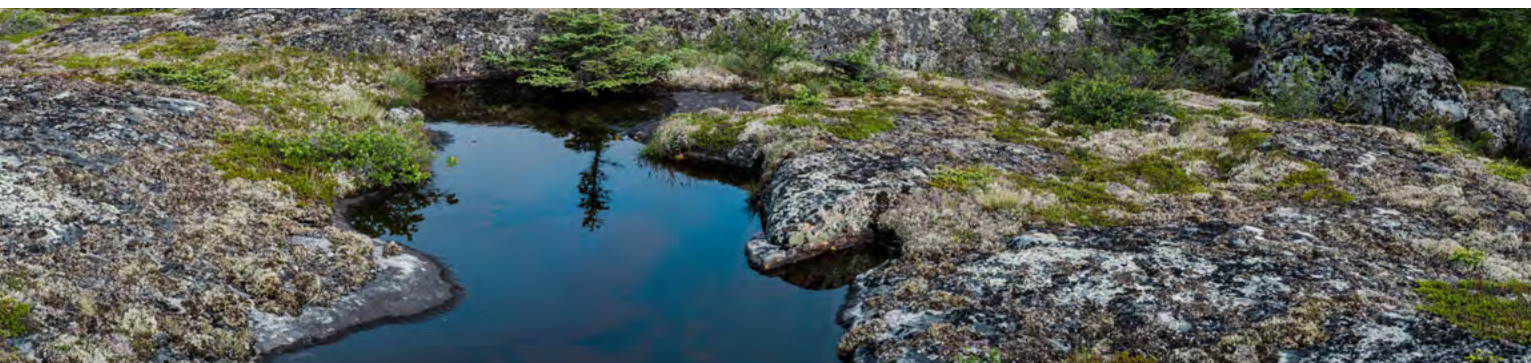


## Environnements pergélisolés et systèmes d'eau douce dans un Nord en changement: vers une compréhension intégrée

### Introduction

En modifiant les caractéristiques de la cryosphère, les changements climatiques ont des impacts sans précédent qui s'étendent bien au-delà des régions nordiques (AMAP, 2011; AMAP, 2021). Dans les régions arctiques et subarctiques, le pergélisol, la neige et la glace d'eau douce composent la majorité du paysage terrestre et abritent des habitats et écosystèmes uniques et interreliés. Les changements que subit la cryosphère ont des effets directs sur ces environnements, en modifiant les liens physiques, biogéochimiques et biologiques qui les unissent (Vincent et coll., 2011). Le réchauffement climatique est d'autant plus exacerbé par l'effet d'albédo associé à la diminution de la quantité de neige et de glace (Barry, 2022) et par la libération de gaz à effet de serre provenant de grandes quantités de carbone organique séquestré dans le pergélisol nordique (Schuur et coll., 2015).

Le pergélisol, qui, par définition, est un sol qui se maintient sous 0°C pour un minimum de deux années consécutives (van Everdingen, 1998), couvre environ 22% de la superficie terrestre de l'hémisphère Nord (Obu et coll., 2019) et plus de la moitié du territoire canadien (Heginbottom et coll., 1995). À la fin du 20<sup>e</sup> et au début du 21<sup>e</sup> siècle, le taux de dégel des sols pergélisolés les plus froids de l'Arctique ont été plus élevés qu'à tout autre moment jamais enregistré (AMAP, 2021; Smith et coll., 2022). Les milieux et infrastructures nordiques dépendent de la stabilité du pergélisol et subissent les conséquences accélérées du réchauffement climatique et du développement (Vincent et coll., 2017; Hjort et coll., 2022). Formées par le dégel du pergélisol, les mares de thermokarst sont devenues une caractéristique dominante du paysage nordique (Grosse et coll., 2013) et sont reconnues comme étant des sources importantes d'émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Matveev et coll., 2016; [Matveev et coll., 2018](#)). Le développement et le déploiement de nouvelles technologies en régions éloignées pour détecter et surveiller ces émissions ([Jobin et coll., 2022](#); [Paradis et coll., 2022](#)) sont d'autant plus essentiels alors que les répercussions climatiques s'accroissent.



L'augmentation des températures et ses impacts associés affectent également l'hydrologie des cours d'eau nordiques en raison des changements de débit des eaux souterraines ([Sergeant et coll., 2021](#)), altèrent les propriétés du manteau neigeux arctique et causent une réduction du couvert de glace dans les lacs du Haut-Arctique. Ces lacs réagissent de différentes manières aux changements climatiques et peuvent, en ce sens, jouer le rôle de sentinelles pour la santé des écosystèmes arctiques, au-delà de l'échelle régionale (Mueller et coll., 2009). Certains lacs peu profonds ne gèlent plus jusqu'au fond en hiver, entraînant ainsi une période prolongée d'activité biologique et une augmentation de la production de gaz à effet de serre ([Mohit et coll., 2017](#)). La neige et ses propriétés varient sur le territoire nordique, mais une diminution générale de la couverture neigeuse a été documentée partout en Arctique (Liston et Hiemstra, 2011; AMAP, 2017). Dans le Bas-Arctique, le couvert de neige est complexe et comprend des couches de différentes densités ainsi qu'une forte variabilité entre les saisons, ce qui se répercute sur le flux de chaleur vers le sol et l'atmosphère ([Lackner et coll., 2021](#)). Des changements dans les conditions et les propriétés de la neige influent par ailleurs sur le comportement, la reproduction et la survie de la faune nordique (Berteaux et coll., 2016).

Le microbiome des écosystèmes de la cryosphère est encore peu connu, mais les recherches indiquent que de nombreux environnements nordiques abritent des communautés microbiennes uniques, qui pourraient s'avérer essentielles à la santé générale des écosystèmes et des humains ([Jungblut et coll., 2021](#)). Le réchauffement du climat menace les habitats de certains microbes polaires (p. ex., [Tsuji et coll., 2019a](#); [Tsuji et coll., 2019b](#); [Tsuji et coll., 2022](#)), entraînant des effets en cascade sur d'autres communautés microbiennes dans des habitats hydrologiques reliés ([Comte et coll., 2018](#)). La découverte de communautés bactériennes nouvelles et diversifiées dans les eaux douces des régions nordiques

pourrait nous aider à mieux comprendre le cycle du carbone dans les écosystèmes du nord ([Vigneron et coll., 2019](#); [Vigneron et coll., 2020](#); [Labbé et coll., 2020](#)). Des efforts pour protéger et documenter ces habitats uniques avant qu'ils ne disparaissent sont déployés dans le cadre d'initiatives comme la cryopréservation de microbiomes et la création d'aires protégées, telles que la zone de protection marine de Tuvaijuittuq dans le Haut-Arctique ([Vincent et Mueller, 2020](#)).

Comprendre et surveiller les transformations accélérées du paysage nordique causées par les changements climatiques est plus critique que jamais et nécessite une approche de recherche intersectorielle tout comme le développement de nouvelles technologies. Les travaux de recherche interdisciplinaire de Sentinelle Nord mettent en lumière de l'information nouvelle sur les changements que subissent les environnements nordiques et contribuent à des avancées novatrices dans le domaine de l'optique, de la biotechnologie et des énergies vertes afin de mieux comprendre ces transformations et y faire face. Ce chapitre présente les avancées en recherche de Sentinelle Nord relativement aux changements observés dans les régions arctiques et subarctiques, les nouveaux outils et méthodes élaborées pour faire le suivi de ces changements ainsi que leurs impacts sur les écosystèmes interreliés. Par ses recherches sur le dégel du pergélisol, les mares de thermokarst, ainsi que sur les lacs et glaciers du Haut-Arctique et leurs habitats, Sentinelle Nord s'impose comme un chef de file de la recherche interdisciplinaire permettant de mieux comprendre les impacts du réchauffement des régions nordiques du Canada.

#### 🔍 MOTS CLÉS:

Cryosphère, Pergélisol, Réchauffement, Thermokarst, Gaz à effet de serre, Microbiome, Eau souterraine, Lacs du Haut-Arctique, Détection optique





## 1. Dégradation du pergélisol et ses impacts sur le paysage et les infrastructures

Sélection de faits saillants de la recherche

Le pergélisol se réchauffe et dégèle à un rythme qui s'accélère. Le dégel du pergélisol induit un tassement du sol et occasionne des impacts aux ramifications diverses sur les différents paysages nordiques ainsi que sur les infrastructures.

1.1 Le dégel du pergélisol contribue à la formation de lacs, mais ce sont les bassins drainés qui ont augmenté le plus rapidement. Le réchauffement climatique entraîne ainsi une perte nette de la superficie des lacs dans les régions pergélisolées. Ces changements dans les paysages nordiques affectent l'hydrologie, le cycle du carbone, la succession végétale, les habitats, les activités de subsistance et les infrastructures ([Jones et coll., 2022](#)).

1.2 Au cours des 50 dernières années, le régime thermique du sol et la réaction du pergélisol au réchauffement du climat ont varié de façon importante à l'échelle du paysage près de Kangiqsualujuaq, au Nunavik. Cette grande variabilité mesurée à l'intérieur d'une petite superficie souligne l'importance de bien caractériser les conditions de terrain afin de mieux prédire l'influence du réchauffement climatique sur le pergélisol ([Deslauriers et coll., 2021](#)).

1.3 Une nouvelle technologie de fibre multicœur hybride où trois fibres optiques ont été assemblées dans une préforme microstructurée en polycarbonate a été développée. La caractérisation des réseaux de Bragg de cette fibre hybride verre-polymère a montré qu'elle est sept fois plus sensible que les fibres optiques multicœurs traditionnelles. Cette fibre a le potentiel d'être étendue sur des kilomètres et permet d'envisager plusieurs applications, notamment pour le suivi du tassement au dégel du pergélisol ([Boilard et coll., 2020](#)).



1.4 Les connaissances sur le pergélisol doivent être partagées avec les communautés nordiques, afin d'appuyer les décisions en matière d'aménagement du territoire et d'adaptation aux changements climatiques sur des données probantes. La plateforme [Permafrost Data](#) est un outil de transfert de connaissances qui permet de partager les données acquises sur le pergélisol avec les villages nordiques du Nunavik, ainsi qu'avec les décideurs publics.



### Former la relève à l'ingénierie du pergélisol

L'ingénierie sur pergélisol requiert des connaissances et des techniques spécialisées. Afin de former des professionnels ainsi que des étudiants diplômés et des stagiaires postdoctoraux à ces enjeux, Sentinelle Nord a coordonné en 2019 la tenue de l'École doctorale internationale « Ingénierie du pergélisol appliquée aux infrastructures de transport », organisée sur le campus du Collège Aurora, à Inuvik, dans les Territoires du Nord-Ouest. Cette formation à la fine pointe des connaissances a permis aux participants de comprendre le contexte et les défis liés à la construction sur pergélisol et d'acquérir les connaissances fondamentales pour faire face à des situations complexes dans des contextes de pergélisol instable.



## 2. Mares de thermokarst et dynamique du carbone associée à la dégradation du pergélisol

Sélection de faits saillants  
de la recherche

Le dégel du pergélisol riche en glace mène à la formation de mares de thermokarst. Ces milieux aquatiques sont une source importante de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) vers l'atmosphère. Il est essentiel d'approfondir nos connaissances sur les micro-organismes adaptés à ces environnements extrêmes et les processus biogéochimiques liés à la production de gaz à effet de serre.

2.1 Les mares de thermokarst formées à la suite du dégel des lithales émettent du  $\text{CH}_4$  et du  $\text{CO}_2$  vers l'atmosphère dès leur formation. Les résultats obtenus indiquent que les taux de diffusion du  $\text{CO}_2$  et du  $\text{CH}_4$  à partir des lithales du Nunavik sont généralement plus élevés dans les zones de plus grande dégradation du pergélisol (Figure 2.1). Ces résultats suggèrent que le développement de mares de thermokarst dans un paysage de lithales s'accompagnera d'une augmentation des émissions de gaz à effet de serre pendant plusieurs décennies (Matveev et coll., 2018).

2.2 La majorité des études sur les lacs thermokarstiques ont été réalisées en été, malgré la prédominance de l'hiver et de la couverture de glace pendant une grande partie de l'année. Or, des résultats récents suggèrent que la communauté microbienne estivale représente une étape transitoire du cycle annuel et que la production de  $\text{CH}_4$  et du  $\text{CO}_2$  se poursuit sous le couvert de glace par l'entremise d'une communauté hivernale taxonomiquement distincte et de divers mécanismes de transformation du carbone du pergélisol (Vigneron et coll., 2019).

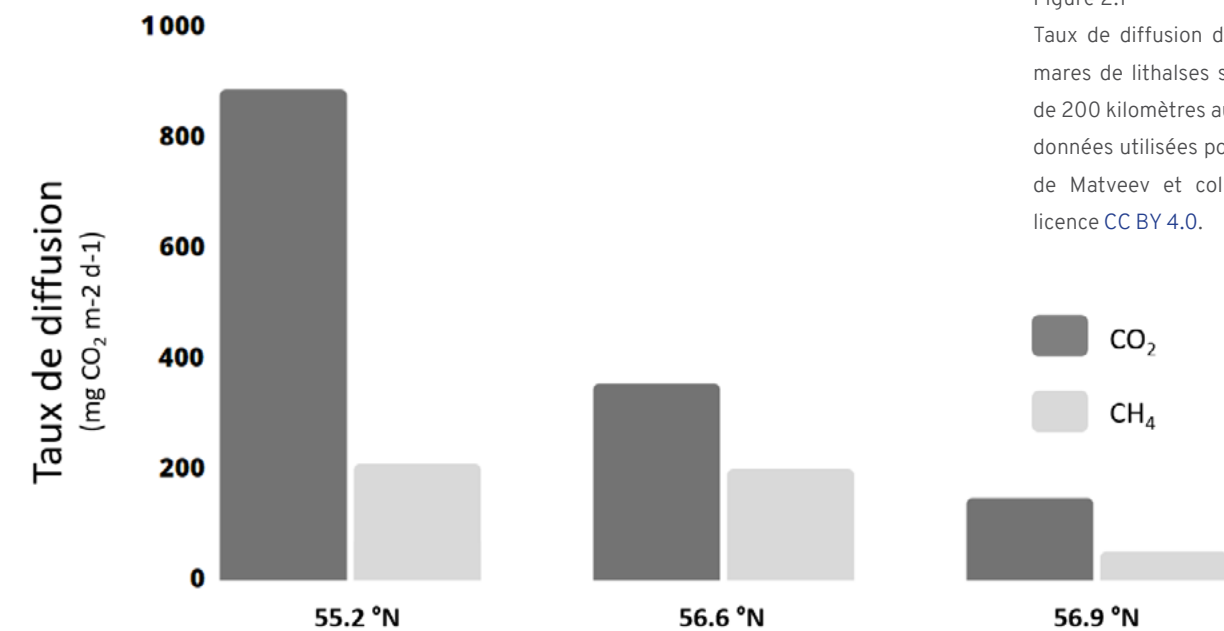


Figure 2.1

Taux de diffusion de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{CH}_4$  par des mares de lithales sur un gradient latitudinal de 200 kilomètres au Québec subarctique. Les données utilisées pour cette figure sont tirées de Matveev et coll., 2018, un article sous licence CC BY 4.0.

2.3 Les *Candidate phyla radiation* (CPR) sont présentes tout au long de l'année dans les mares de thermokarst, ce qui pose des questions quant à leur rôle dans la biogéochimie de ces mares. Une analyse génomique a révélé que ces micro-organismes de très petite taille sont potentiellement très abondants et qu'ils jouent un rôle clé dans la transformation du carbone, peu importe la saison. L'importance des CPR a été largement sous-estimée et négligée dans les écosystèmes lacustres (Vigneron et coll., 2020).

2.4 Au Québec subarctique, il a été démontré que les mares de thermokarst des tourbières riches en matières organiques présentent des concentrations en  $\text{CH}_4$  extrêmement élevées en hiver sous le couvert de glace et des émissions dans l'atmosphère élevées lors de la débâcle printanière. Les résultats soulignent la nécessité de tenir compte des grandes fluctuations saisonnières des émissions de méthane issu des mares de thermokarst dans les estimations des flux annuels de carbone (Matveev et coll., 2019).

2.5 Le dégel du pergélisol a entraîné une augmentation du carbone organique dissous (COD) dans les milieux lacustres (*browning*). Cette augmentation en COD a pour conséquence d'atténuer le rayonnement photosynthétiquement actif et le rayonnement ultraviolet dans les lacs, entraînant d'importants changements dans les écosystèmes. Afin de mieux comprendre le phénomène de *browning* des lacs et ses conséquences, le modèle MyLake a été amélioré pour prendre en compte l'atténuation de la lumière dans les lacs en réponse aux changements dans la charge en COD (Pilla et Couture, 2021).



### 3. La détection des émissions de gaz à effet de serre *in situ*

Sélection de faits saillants  
de la recherche

Pour obtenir une meilleure compréhension des flux de carbone et des émissions de gaz à effet de serre, des équipes de Sentinelle Nord développent des dispositifs permettant de détecter et de quantifier les gaz présents dans la basse atmosphère.

3.1 Des avancées remarquables ont été réalisées dans la conception de sources lasers émettant dans le moyen infrarouge (2,5-5 microns) pour la détection du méthane (CH<sub>4</sub>), un gaz qui présente de fortes bandes d'absorption dans ces longueurs d'onde (Figure 3.1; [Jobin et coll., 2022](#)). Il a notamment été démontré que la concentration d'un gaz peut être mesurée sur un microphone en utilisant l'effet photo-acoustique avec une source laser à large bande spectrale.

3.2 Une démonstration a été faite du premier laser tout-fibre fonctionnant dans l'infrarouge moyen en régime auto-déclenché et utilisant une fibre de silice dopée au dysprosium comme absorbant saturable. Ce laser pourrait être suffisamment robuste et fiable pour être déployé dans des environnements extrêmes et permettre de détecter plus d'un gaz grâce à son spectre d'émission étendu, notamment le méthane ([Paradis et coll., 2022](#)).

3.3 Des fibres optiques à base de verres BGG riches en Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ayant de basses pertes (<1 dB/m) ont été fabriquées pour la première fois depuis la découverte de cette famille de verre ([Guérineau et coll., 2023](#)). Le développement de fibres optiquement actives et passives à partir de ces verres permet le design de nouveaux systèmes laser plus robustes et plus fiables, tout en améliorant la sensibilité de détection du méthane.

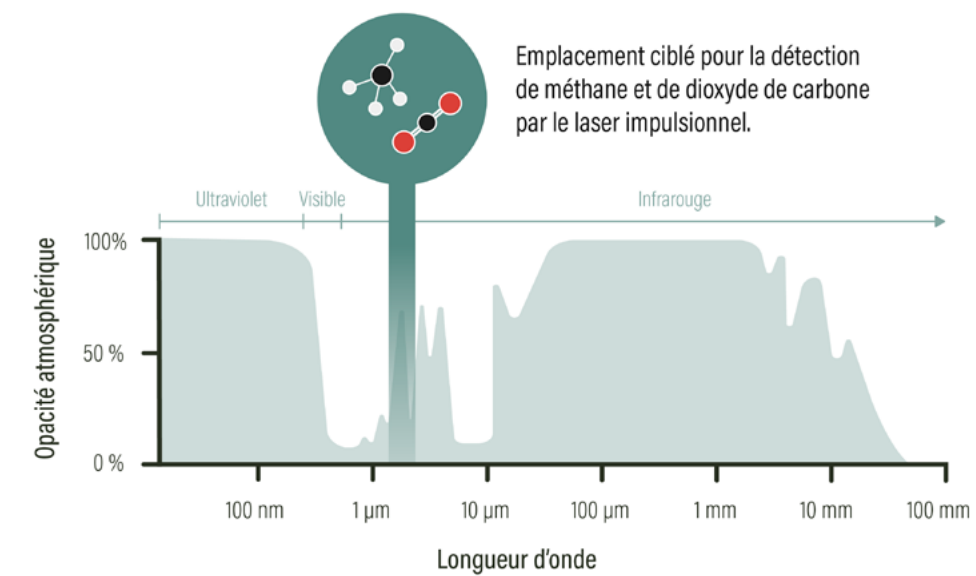


Figure 3.1  
Emplacement ciblé pour la détection du méthane et du dioxyde de carbone par un laser à impulsion. © Sarah Dandois et Élodie Ouellet-Belleau.



#### 4. À la découverte des virus des lacs et des mares nordiques

Sélection de faits saillants de la recherche

Les virus qui infectent les communautés microbiennes des mares de thermokarst et des lacs de l'Arctique sont encore méconnus. Pourtant, ces virus peuvent contrôler les populations microbiennes et influencer les cycles biogéochimiques.

4.1 Une première étude de la diversité virale des mares de thermokarst s'est intéressée aux myovirus et aux chlorovirus en utilisant le séquençage d'amplicon. Les résultats indiquent une diversité virale qui varie selon le type d'environnement et suggèrent que la composition de la communauté bactérienne hôte résulte d'un filtrage environnemental, qui contribue à son tour à la diversité virale dans les différents types de paysages ([Lévesque et coll., 2018](#)).

4.2 Les communautés virales des mares de thermokarst présentent des différences saisonnières. En plus d'avoir identifié 351 populations virales distinctes, une équipe de recherche a observé que la diversité virale change drastiquement entre l'été et l'hiver, ce qui suggère un changement important de la communauté virale entre les deux saisons ([Girard et coll., 2020](#)).

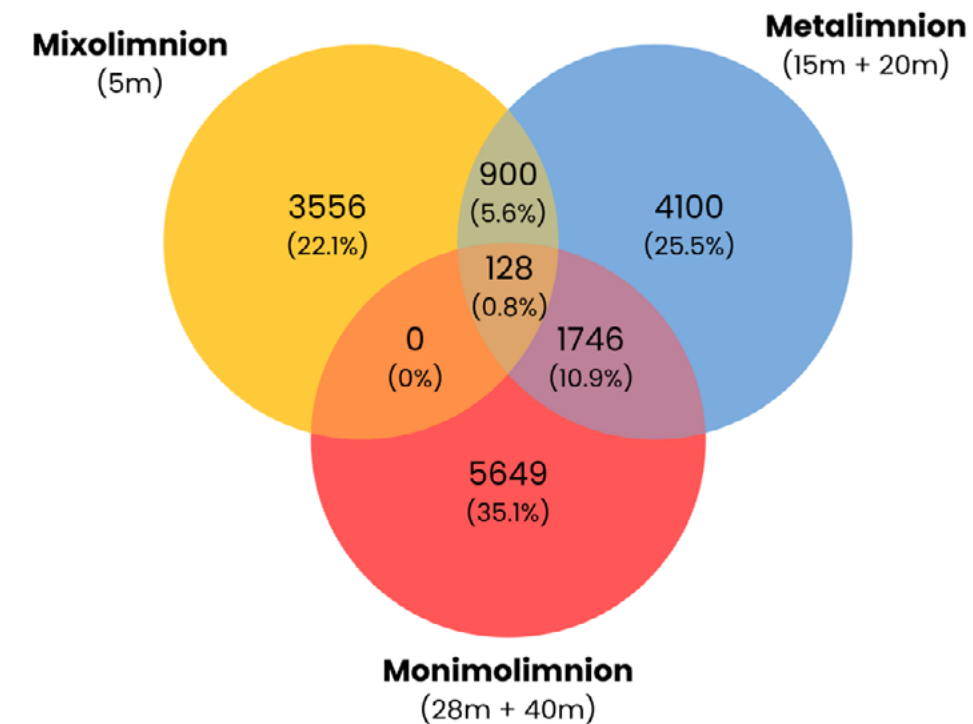


Figure 4.3  
Diversité virale en fonction de la profondeur dans un lac hautement stratifié du Haut-Arctique. Figure tirée de Labbé et coll., 2020, un article sous licence [CC-BY-4.0](#).

4.3 Dans un lac hautement stratifié du Haut-Arctique, les communautés virales de la couche profonde étaient plus diversifiées et abondantes que dans les couches superficielles et montrent une grande divergence avec les séquences virales connues (Figure 4.3). Ces résultats témoignent de la complexité et du caractère unique des communautés virales dans un environnement en pleine mutation ([Labbé et coll., 2020](#)).

4.4 La découverte des phages n'en est qu'à ses débuts. Les hôtes bactériens des nouveaux phages présents dans divers environnements peuvent maintenant être prédits grâce à une méthode bio-informatique, qui tire profit de l'information contenue dans les systèmes CRISPR-Cas ([Dion et coll., 2020](#); [Dion et coll., 2021](#)). Grâce à cette percée majeure, il a été possible de recenser les loci CRISPR dans tous les génomes bactériens de la base de données du *National Center for Biotechnology Information* (NCBI) et ainsi augmenter le nombre d'espaceurs disponibles pour les recherches d'homologie. L'ensemble de ces données est maintenant disponible sur une plateforme nommée [CRISPR Spacer Database](#).



## 5. Les lacs de l'Arctique, sentinelle des changements

Sélection de faits saillants  
de la recherche

Les lacs de l'Arctique sont particulièrement sensibles aux changements climatiques, notamment en raison du rôle que joue le couvert de glace dans leur structure et leur fonctionnement.

5.1 Auparavant recouverts d'une couche de glace épaisse et continue, les lacs polaires connaîtront vraisemblablement un régime de glace irrégulier et des conditions limnologiques instables qui varieront d'une année à l'autre (Figure 5.1; [Bégin et coll., 2021a](#)). La perte du couvert de glace estival modifie les propriétés de la colonne d'eau et les conditions de lumière benthique. Le fonctionnement de ces écosystèmes pourrait être profondément transformé, notamment en ce qui a trait aux échanges d'énergie et de gaz avec l'atmosphère ([Bégin et coll., 2021b](#)).

5.2 Le couvert de glace joue un rôle sous-estimé dans le stockage et la transformation du cycle biogéochimique du carbone des lacs arctiques et boréaux. La fonte des glaces relâche une quantité importante de particules et de composés qui influenceraient la productivité de ces lacs ([Imbeau et coll., 2021](#)).

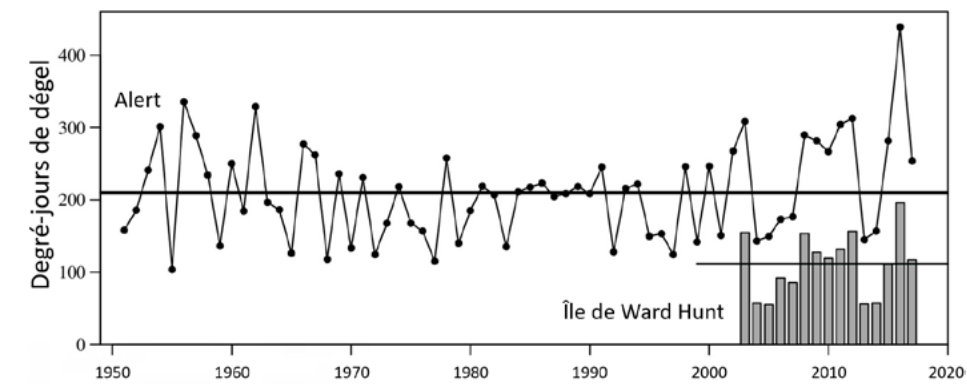
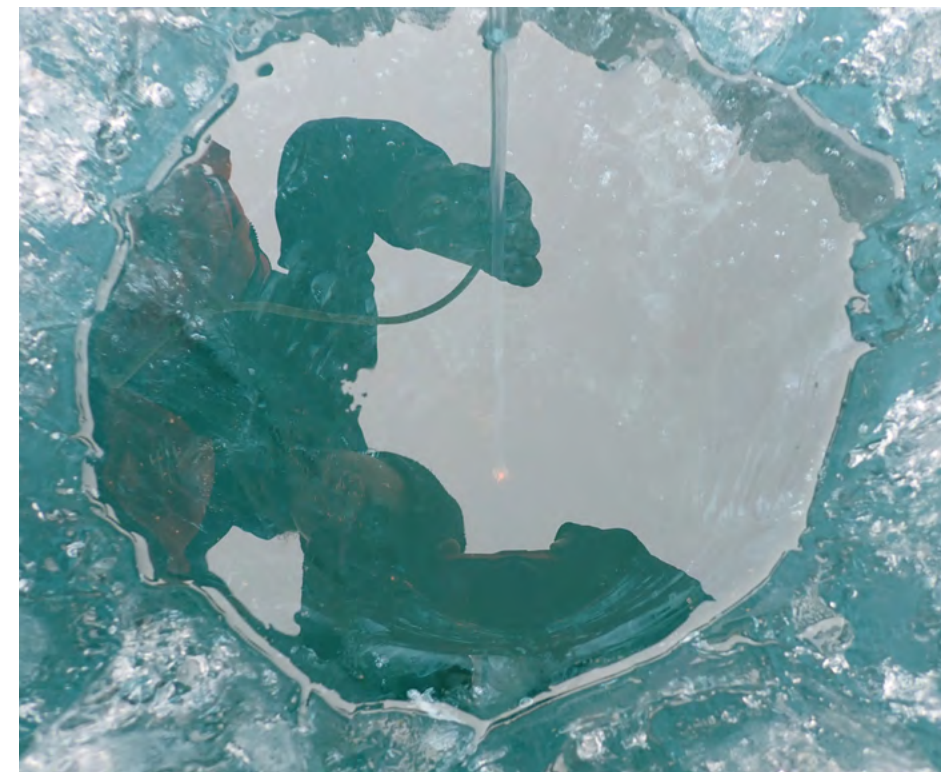
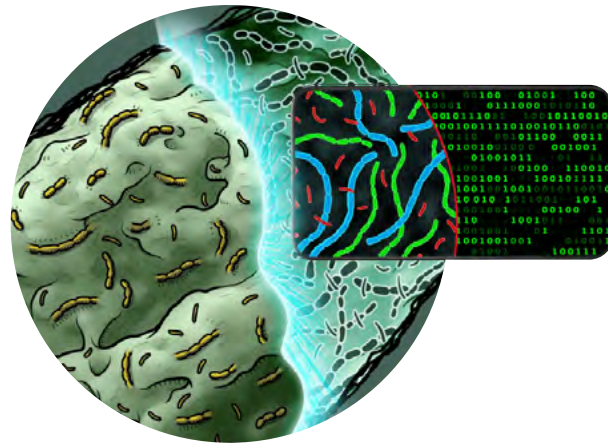


Figure 5.1  
Degré-jours de dégel à Alert (ligne et points noirs) et à l'île de Ward Hunt (barres). Les lignes horizontales représentent les valeurs moyennes pour les deux sites. Figure tirée de [Bégin et coll., 2021a](#), un article sous licence [CC BY-NC 4.0](#)

5.3 Avec le réchauffement climatique, de moins en moins de lacs arctiques seront complètement gelés en hiver. La présence d'eau au fond des lacs a favorisé le métabolisme anaérobie des biofilms de cyanobactéries, ce qui a augmenté la production de méthane, un puissant gaz à effet de serre ([Mohit et coll., 2017](#)).







## 6. De nouvelles technologies pour suivre les lacs arctiques

Sélection de faits saillants de la recherche

Le développement de nouvelles technologies est important pour suivre les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des lacs de l'Arctique.

6.1 Pour suivre en continu la qualité de l'eau en milieu arctique, des capteurs peuvent être déployés sur le terrain grâce à une source d'énergie autonome et performante basée sur une pile combustible microbienne de bactéries contenues dans le sol nordique. Une telle pile a été développée et testée pour différents profils de température permettant d'augmenter par quatre fois la puissance générée et de doubler le courant de sortie ([Gong et coll., 2021](#); [Gong et coll., 2022](#); [Brochu et coll., 2021](#); [Amirdehi et coll., 2020](#)).

6.2 La synthèse d'un polymère conjugué, le PPDT2FBT, en utilisant la polymérisation par (hétéro)arylation directe (DHAP), a permis de fabriquer des dispositifs photovoltaïques organiques ayant une faible empreinte écologique ([Mainville et coll., 2020](#)). Ces nouveaux dispositifs pourraient bientôt alimenter un système interconnecté d'instruments de mesure en continu dans les régions arctiques et subarctiques ([Mainville, 2022](#)).

6.3 Une plateforme microfluidique a été développée pour l'imagerie de cellules vivantes et la détection automatisée d'espèces dans des biofilms de cyanobactéries provenant de l'Arctique. Cette technologie combine l'utilisation de l'imagerie hyperspectrale et de l'apprentissage profond et fournit une plateforme polyvalente pour l'étude des biofilms cyanobactériens, qui sont des éléments importants des lacs et les rivières des régions polaires ([Deng et coll., 2021](#)).





## 7. Des régimes hydrologiques en changement

Sélection de faits saillants  
de la recherche

À l'instar des lacs, les rivières et les eaux souterraines des régions nordiques subissent les contrecoups des changements environnementaux. Par exemple, la dégradation du pergélisol cause une augmentation de l'épaisseur de la couche active et modifie le patron d'écoulement des eaux souterraines. Comprendre les mécanismes sous-jacents est essentiel pour mieux appréhender les changements en cours dans les milieux pergélisolés.

7.1 Une analyse circumpolaire de 336 rivières sur la période 1970-2000 a montré que l'augmentation de l'épaisseur de la couche active est généralement associée à une diminution de l'écoulement des eaux souterraines vers les rivières. En effet, le dégel du pergélisol entraîne une meilleure connectivité hydrologique, ce qui augmente la diversité des voies d'écoulement et donc multiplie les aires de drainage ([Sergeant et coll., 2021](#)).

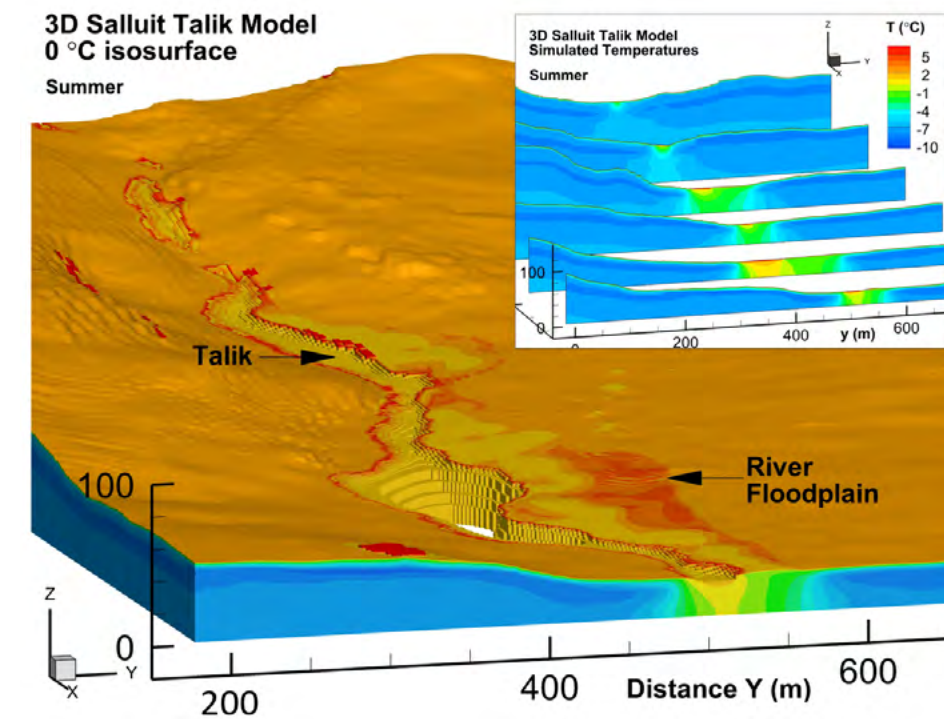


Figure 7.2

Perspective tri-dimensionnelle montrant les températures simulées autour d'un talik dans le pergélisol continu de la vallée de la rivière Kuuguluk, Salluit, Nunavik. © John Molson

7.2 Combinées à un modèle numérique 3D, des données de terrain ont fourni des informations clés sur les processus régissant l'écoulement des eaux souterraines et le transport de la chaleur à l'intérieur et autour d'un système rivière-talik en zone de pergélisol continu (Figure 7.2). Une meilleure compréhension de ces processus est essentielle pour connaître la formation des glaçages (aussi appelés afeis) ainsi que pour évaluer le potentiel des aquifères de talik comme sources d'eau potable dans les communautés nordiques ([Liu et coll., 2021](#); [Liu et coll., 2022](#)).



## 8. Des changements dans le manteau neigeux

Sélection de faits saillants de la recherche

La neige est un élément essentiel des écosystèmes arctique et subarctique. Les caractéristiques physiques et biologiques de la neige sont amenées à changer, ce qui a plusieurs conséquences notamment sur le bilan énergétique de surface, l'utilisation du manteau neigeux comme habitat et les communautés microbiennes associées.

8.1 Il a été montré que le manteau neigeux subarctique peut adopter deux configurations bien différentes: durant les années neigeuses, il se comporte comme un couvert de neige alpin (c'est-à-dire que la densité décroît avec la hauteur de la neige), tandis qu'il se comporte comme un couvert de neige arctique (profil de densité inversé) lors des années moins neigeuses. La neige alpine protège efficacement le sol du froid, permettant ainsi au sol de maintenir une température nettement plus chaude (plusieurs °C) que lorsque la neige est de type arctique (Lackner et coll., 2021).

8.2 Une augmentation de la dureté et de la densité de la neige est attendue. Ces changements sont susceptibles d'affecter la survie et la dynamique de population des lemmings, qui s'abritent dans le manteau neigeux durant l'hiver rigoureux de l'Arctique. La fréquence accrue des épisodes de fonte-regel et de pluie sur neige aura des conséquences sur la performance de creusage et la quantité d'efforts déployés par les lemmings (Figure 8.2), une espèce-clé des réseaux trophiques de l'Arctique (Poirier et coll., 2021).

8.3 Plusieurs avancées technologiques ont été réalisées pour mesurer automatiquement les propriétés physiques de la neige et, en particulier, sa densité. Des développements théoriques validés par des mesures en laboratoire ont démontré que des mesures de densité d'un matériau poreux comme la neige pouvaient être réalisées grâce à une technologie laser (Libois et coll., 2019). La prochaine étape consiste à déployer, dans le Haut-Arctique, un prototype mesurant en continu l'évolution de la densité de la neige pendant tout l'hiver.

8.4 Une étude réalisée dans le Haut-Arctique canadien a révélé que les communautés microbiennes diffèrent d'un habitat à l'autre. Toutefois, 30 % des phylotypes sont partagés le long du continuum hydrologique, démontrant ainsi que plusieurs taxons initialement retrouvés dans la neige demeurent actifs en aval. Ces résultats indiquent que les changements dans les précipitations neigeuses associés au réchauffement climatique vont affecter la structure des communautés microbiennes dans l'ensemble des habitats connectés au manteau neigeux (Comte et coll., 2018).

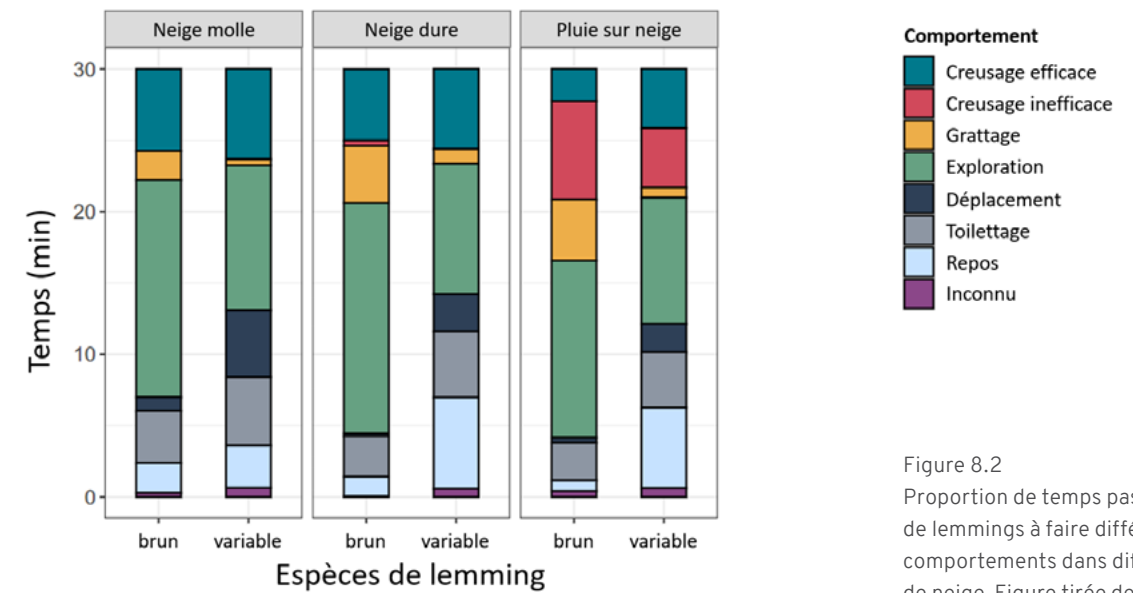


Figure 8.2 Proportion de temps passé par deux espèces de lemmings à faire différents comportements dans différents types de neige. Figure tirée de Poirier et coll., 2021, un article sous licence CC BY 3.0.



## 9. Importance de la cryobiodiversité dans un contexte de réchauffement climatique

Sélection de faits saillants  
de la recherche

Le réchauffement climatique menace de disparition plusieurs habitats arctiques, entraînant ainsi une réorganisation des communautés qui les habitent, notamment les communautés microbiennes. Il est important de mieux connaître la biodiversité associée à ces milieux, de la préserver et d'étudier les propriétés de ces organismes adaptés aux environnements extrêmes.

9.1 Une étude menée en collaboration avec le *National Institute of Polar Research* a identifié de nouvelles levures psychrophiles dans un glacier en retrait du Haut-Arctique canadien. Ces levures présentent des caractéristiques uniques, dont la capacité de croître à des températures au-dessous de zéro et dans un milieu sans vitamines ([Tsuji et coll., 2019a](#); [Tsuji et coll., 2019b](#)).

9.2 La biodiversité unique associée aux glaciers est menacée de disparition avec la perte de ces habitats. Pourtant, les espèces fongiques jouent un rôle fondamental dans le cycle du carbone et des nutriments et ont des caractéristiques biochimiques distinctives ([Tsuji et coll., 2022](#)). Il est nécessaire de mieux connaître cette cryobiodiversité, d'en préserver des échantillons et de protéger des territoires d'importance, notamment la dernière zone glaciaire (*Last Ice Area*) ([Vincent et Mueller, 2020](#)).

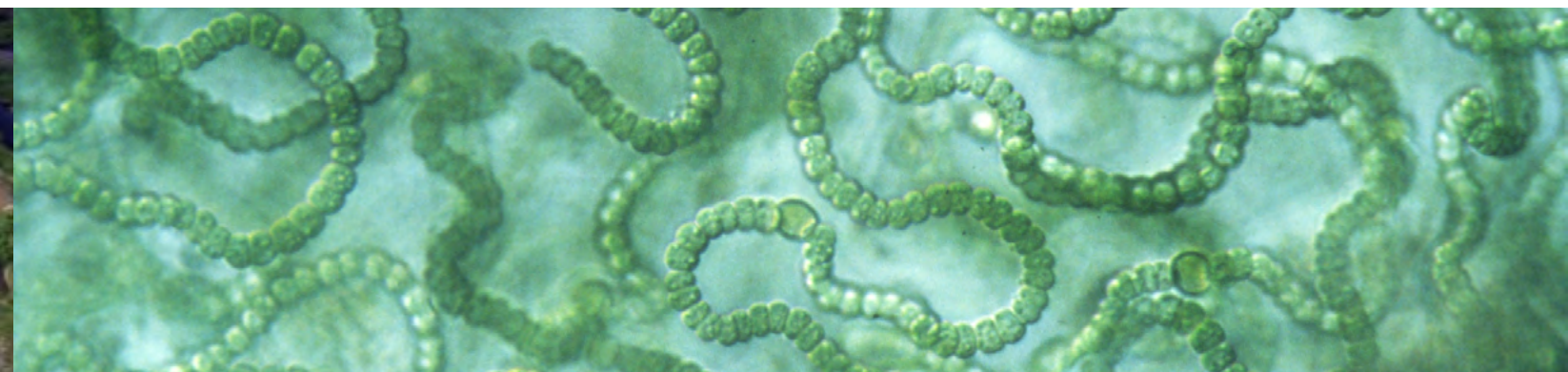




9.3 Des équipes de recherche ont utilisé la cryobanque canadienne de la biodiversité pour conserver des échantillons de biofilms des lacs arctiques. Les échantillons sont placés dans des congélateurs refroidis à l'azote liquide à moins de  $-160^{\circ}\text{C}$ . Cette température permet de préserver à perpétuité les informations que portent les molécules d'ADN des échantillons. Alors que l'Arctique canadien se réchauffe rapidement, ces échantillons constituent de précieux témoins de la diversité génétique des microbiomes d'eau douce du Haut-Arctique ([Bull et Vincent, 2020](#)).

9.4 Les diverses communautés microbiennes issues de sédiments de mares de thermokarst ont été analysées et mises en culture afin d'isoler certaines souches. L'une des souches de *Pseudomonas extremaustralis* montre une capacité de produire un polysaccharide à potentiel biotechnologique, notamment pour devenir une alternative durable aux polymères commerciaux ([Finore et coll., 2020](#)).

9.5 Une première analyse génomique des cyanobactéries polaires de type *Nostoc* a mis en évidence une plus grande composition en métabolites secondaires que des souches en milieu tempéré. Ces métabolites pourraient être d'intérêt pour la valorisation, notamment grâce à des composés bioactifs pour le développement de médicaments. Une analyse du système CRISPR-Cas a également démontré que les interactions entre virus et cyanobactéries sont variées en Arctique et que les virus jouent un rôle clé dans la diversité microbienne de cette région ([Jungblut 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.

- **Cellules solaires imprimées pour instruments portables**  
Chercheur principal: Mario Leclerc (Dép. de chimie)
- **Déployer des technologies de détection basées sur la lumière pour le suivi des gaz climatiquement actifs dans l'Arctique en mutation (BOND2.0)**  
Chercheurs principaux: Martin Bernier (Dép. de physique, de génie physique et d'optique), Daniel Nadeau (Dép. de génie civil et de génie des eaux)
- **Détection photonique extrême et suivi des environnements pergélisolés**  
Chercheurs principaux: Sophie Larochelle (Dép. de génie électrique et de génie informatique), Richard Fortier (Dép. de géologie et de génie géologique)

- **Développement de capteurs optiques pour le suivi de gaz climatiquement actifs dans l'Arctique en mutation (BOND)**  
Chercheur principal: Réal Vallée (Dép. de physique, de génie physique et d'optique)
- **Documenter et modéliser les interrelations clés des systèmes hydriques nordiques soumis aux pressions climatiques, géosystémiques et sociétales**  
Chercheur principal: René Therrien (Dép. de géologie et de génie géologique)
- **Faire les choses différemment: un atlas des meilleures pratiques pour des milieux de vie durables et culturellement adaptés au Nunavik**  
Chercheurs principaux: Geneviève Vachon (École d'architecture), Michel Allard (Dép. de géographie)
- **Investigation optogénétique de l'influence du microbiote sur le développement du cerveau et l'épigénétique**  
Chercheurs principaux: Paul De Koninck (Dép. de biochimie, de microbiologie et de bio-informatique), Sylvain Moineau (Dép. de biochimie, de microbiologie et de bio-informatique)
- **Microbiomes de la dernière zone glaciaire et santé de l'écosystème arctique**  
Chercheurs principaux: Alexander Culley (Dép. de biochimie, de microbiologie et de bio-informatique), Warwick Vincent (Dép. de biologie)
- **Microbiomes sentinelles pour la santé des écosystèmes arctiques**  
Chercheurs principaux: Daniel Côté (Dép. de physique, de génie physique et d'optique), Warwick Vincent (Dép. de biologie)
- **Suivi environnemental et valorisation dans le Nord: des molécules aux microorganismes**  
Chercheur principal: 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)
- **Chaire de recherche en partenariat sur le pergélisol au Nunavik**  
Titulaire: Pascale Roy-Léveillé (Dép. de géographie)
- **Chaire de recherche Sentinelle Nord en géochimie des milieux aquatiques**  
Titulaire: Raoul-Marie Couture (Dép. de chimie)

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.

- Développement de capteurs distribués dans une fibre multicœurs pour la mesure de contraintes  
Tommy Boilard (bourse maîtrise)
- Développement de cellules solaires organiques imprimables à base de nouveaux matériaux  $\pi$ -conjugués de type n  
Mathieu Mainville (bourse doctorale)
- Étude des interactions phages-bactéries dans le système gastro-intestinal  
Moïra Dion (bourse doctorale)
- Fibrage et fonctionnalisation laser de verres moyens infrarouges germano-gallates de baryum pour la détection de gaz climatiquement actif dans le Nord  
Théo Guérineau (stage postdoctoral)
- Virus aérosols libérés de la cryosphère en fonte: des microorganismes sentinelles du changement dans le Nord  
Catherine Girard (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.

- Développement de dispositifs photoniques pour la génération d'impulsions lasers moyen infrarouge adaptées à la spectroscopie gazeuse à distance  
Chercheurs principaux: Martin Bernier (Dép. de physique, de génie physique et d'optique), Bernard Dussardier (Institut de physique de Nice, Université Côte d'Azur)
- Unité mixte internationale de recherche Québec-Brazil Photonics Research  
Directeur: Younès Messaddeq (Dép. de physique, de génie physique et d'optique)  
Université d'État de São Paulo, Brésil  
Associée à la CERC sur l'innovation en photonique
- Unité mixte internationale de recherche chimique et biomoléculaire du microbiome et ses impacts sur la santé métabolique et la nutrition  
Directeur: Vincenzo Di Marzo (Dép. de médecine)  
Conseil national de la recherche, Italie  
Associée à la CERC sur l'axe microbiome-endocannabinoïdome dans la santé métabolique

UNIVERSITÉ  
CÔTE D'AZUR 

unesp 

  
Consiglio Nazionale  
delle Ricerche



## 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.

- **Déployer des technologies de détection basées sur la lumière pour le suivi des gaz climatiquement actifs dans l'Arctique en mutation (BOND2.0)**  
Chercheurs principaux: Martin Bernier (Dép. de physique, de génie physique et d'optique), Daniel Nadeau (Dép. de génie civil et de génie des eaux)
- **Développement de dispositifs photoniques pour la génération d'impulsions lasers moyen infrarouge adaptées à la spectroscopie gazeuse à distance**  
Chercheurs principaux: Martin Bernier (Dép. de physique, de génie physique et d'optique), Bernard Dussardier (Institut de physique de Nice, Université Côte d'Azur)  
*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'Université Côte d'Azur*

Projets de recherche  
Sentinelle Nord en cours

- **Faire les choses différemment: un atlas des meilleures pratiques pour des milieux de vie durables et culturellement adaptés au Nunavik**  
Chercheurs principaux: Geneviève Vachon (École d'architecture), Michel Allard (Dép. de géographie)
- **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**  
Chercheuse principale: Isabelle Laurion (Centre Eau Terre Environnement, Institut national de la recherche scientifique)  
*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'Institut nordique du Québec*
- **Microbiomes de la dernière zone glaciaire et santé de l'écosystème arctique**  
Chercheurs principaux: Alexander Culley (Dép. de biochimie, de microbiologie et de bio-informatique), Warwick Vincent (Dép. de biologie)
- **QAUJIKKAUT: outil en ligne d'anticipation hâtive des événements météorologiques extrêmes au Nunavik basé sur le réseau SILA de stations de suivi environnemental**  
Chercheurs principaux: Richard Fortier (Dép. de géologie et de génie géologique), Thierry Badard (Dép. des sciences géomatiques)
- **Chaire de recherche en partenariat Sentinelle Nord sur les infrastructures nordiques**  
Titulaire: Jean-Pascal Bilodeau (Dép. de génie civil et de génie des eaux)
- **Chaire de recherche en partenariat sur le pergélisol au Nunavik**  
Titulaire: Pascale Roy-Léveillé (Dép. de géographie)
- **Chaire de recherche Sentinelle Nord en géochimie des milieux aquatiques**  
Titulaire: Raoul-Marie Couture (Dép. de chimie)
- **Unité mixte internationale de recherche Québec-Brazil Photonics Research**  
Directeur: Younès Messaddeq (Dép. de physique, de génie physique et d'optique)
- **Unité mixte internationale de recherche chimique et biomoléculaire du microbiome et ses impacts sur la santé métabolique et la nutrition**  
Directeur: Vincenzo Di Marzo (Dép. de médecine)



## Références

Publications  
issues de  
Sentinelle Nord

- Amirdehi, M. A., Khodaparastasarabad, N., Landari, H., Zarabadi, M. P., Miled, A., et Greener, J. (2020). A high-performance membraneless microfluidic microbial fuel cell for stable, long-term benchtop operation under strong flow. *Chemelectrochem*, 7(10), 2227-2235. <https://doi.org/10.1002/celec.202000040>
- Ⓢ Bégin, P. N., Tanabe, Y., Kumagai, M., Culley, A., Paquette, M., Sarrazin, D., ... Vincent, W. F. (2021a). Extreme warming and regime shift toward amplified variability in a far northern lake. *Limnology and Oceanography*, 66(S1), S17-S29. <https://doi.org/10.1002/lno.11546>
- Ⓢ Bégin, P. N., Tanabe, Y., Rautio, M., Wauthy, M., Laurion, I., Uchida, M., ... Vincent, W. F. (2021b). Water column gradients beneath the summer ice of a High Arctic freshwater lake as indicators of sensitivity to climate change. *Scientific Reports*, 11(1), 2868. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82234-z>
- Ⓢ Boilard, T., Bilodeau, G., Morency, S., Messaddeq, Y., Fortier, R., Trépanier, F., Bernier, M. (2020). Curvature sensing using a hybrid polycarbonate-silica multicore fiber. *Optics Express*, 28(26), 39387-39399. <https://doi.org/10.1364/OE.411363>
- Ⓢ Brochu, N., Belanger-Huot, B., Humeniuk, D., Gong, L., Amirdehi, M. A., Greener, J., et Miled, A. (2021). Bacteria energy recovery system using natural soil bacteria in microbial fuel cells. *Energies*, 14(15), 4393. <https://doi.org/10.3390/en14154393>
- Bull, R., et Vincent, W. F. (2020, 19 février). Freezing Arctic microbes for the future. Blog du Musée canadien de la Nature. <https://nature.ca/en/freezing-arctic-microbes-for-the-future/>
- Ⓢ Comte, J., Culley, A. I., Lovejoy, C., et Vincent, W. F. (2018). Microbial connectivity and sorting in a High Arctic watershed. *The ISME journal*, 12(12), 2988. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0236-4>
- Deng, T., DePaoli, D., Bégin, L., Jia, N., Torres de Oliveira, L., Côté, D. C., ... Greener, J. (2021). Versatile microfluidic platform for automated live-cell hyperspectral imaging applied to cold climate cyanobacterial biofilms. *Analytical Chemistry*, 93(25), 8764-8773. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c05446>

Ⓢ Libre accès

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

Publications  
issues de  
Sentinelle Nord

- Ⓢ Deslauriers, C., Allard, M., et Roy-Léveillé, P. (2021). Ground temperature responses to climatic trends in a range of surficial deposits near Kangiqsualujuaq, Nunavik. *Permafrost* 2021, 27-37. <https://doi.org/10.1061/9780784483589.003>
- Ⓢ Dion, M. B., Plante, P.-L., Zufferey, E., Shah, S. A., Corbeil, J., et Moineau, S. (2021). Streamlining CRISPR spacer-based bacterial host predictions to decipher the viral dark matter. *Nucleic Acids Research*, 49(6), 3127-3138. <https://doi.org/10.1093/nar/gkab133>
- Ⓢ Dion, M. B., Oechslin, F., et Moineau, S. (2020). Phage diversity, genomics and phylogeny. *Nature Reviews Microbiology*, 18(3), 125-138. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0311-5>
- Ⓢ Finore, I., Vigneron, A., Vincent, W. F., Leone, L., Di Donato, P., Schiano Moriello, A., ... Poli, A. (2020). Novel psychrophiles and exopolymers from permafrost thaw lake sediments. *Microorganisms*, 8(9), 1282. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8091282>
- Ⓢ Girard, C., Langlois, V., Vigneron, A., Vincent, W. F., et Culley, A. I. (2020). Seasonal regime shift in the viral communities of a permafrost thaw lake. *Viruses*, 12(11), 1204. <https://doi.org/10.3390/v12111204>
- Gong, L., Amirdehi, M. A., Sonawane, J. M., Jia, N., Torres de Oliveira, L., et Greener, J. (2022). Mainstreaming microfluidic microbial fuel cells: A biocompatible membrane grown in situ improves performance and versatility. *Lab on a Chip*, 22(10), 1905-1916. <https://doi.org/10.1039/D2LC00098A>
- Gong, L., Amirdehi, M. A., Miled, A., et Greener, J. (2021). Practical increases in power output from soil-based microbial fuel cells under dynamic temperature variations. *Sustainable Energy et Fuels*, 5(3), 671-677. <https://doi.org/10.1039/D0SE01406K>
- Ⓢ Guérineau, T., Aouji, S., Morency, S., Calzavara, F., Laroche, P., Labranche, P., Lapointe, J., Danto, S., Cardinal, T., Fargin, E., Bernier, M., Vallée, R., et Messaddeq, Y. (2023). Toward low-loss mid-infrared Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaO-GeO<sub>2</sub> optical fibers. *Scientific Reports* 13, 3697. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30522-1>
- Imbeau, E., Vincent, W. F., Wauthy, M., Cusson, M., et Rautio, M. (2021). Hidden stores of organic matter in northern lake ice: Selective retention of terrestrial particles, phytoplankton and labile carbon. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 126(8), e2020JG006233. <https://doi.org/10.1029/2020JG006233>

- Publications issues de Sentinelle Nord
- Jobin, F., Paradis, P., Aydin, Y. O., Boilard, T., Fortin, V., Gauthier, J.-C., ...Vallée, R. (2022). Recent developments in lanthanide-doped mid-infrared fluoride fiber lasers [Invited]. *Optics Express*, 30(6), 8615-8640. <https://doi.org/10.1364/OE.450929>
- Jones, B. M., Grosse, G., Farquharson, L. M., Roy-Léveillé, P., Veremeeva, A., Kanevskiy, M. Z., ... Hinkel, K. M. (2022). Lake and drained lake basin systems in lowland permafrost regions. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(1), 85-98. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00238-9>
- Jungblut, A. D., Raymond, F., Dion, M. B., Moineau, S., Mohit, V., Nguyen, G. Q., ... Vincent, W. F. (2021). Genomic diversity and CRISPR-Cas systems in the cyanobacterium *Nostoc* in the High Arctic. *Environmental Microbiology*, 23(6), 2955-2968. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15481>
- Kirkwood, A., Roy-Léveillé, P., Branfireun, B., Pakalen, M., McLaughlin, J., Basiliko, N. (2021). Mercury, methylmercury, and microbial communities in a degrading tundra of the Hudson Bay Lowlands, Far North Ontario. *Permafrost 2021*, 49-59. <https://doi.org/10.1061/9780784483589.005>
- Labbé, M., Girard, C., Vincent, W. F., et Culley, A. I. (2020). Extreme viral partitioning in a marine-derived High Arctic Lake. *mSphere*, 5(3), e00334-00320. <https://doi.org/10.1128/mSphere.00334-20>
- Lackner, G., Nadeau, D., Dominé, F., Parent, A.-C., et Anctil, F. (2021, 19-30 avril). Neither Arctic nor alpine: Snow characterization in the low-Arctic region of Nunavik, Canada [communication orale]. European Geophysical Union General Assembly, conférence virtuelle. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-7048>
- Lévesque, A. V., Vincent, W. F., Comte, J., Lovejoy, C., et Culley, A. (2018). Chlorovirus and myovirus diversity in permafrost thaw ponds. *Aquatic Microbial Ecology*, 82(2), 209-224. <https://doi.org/10.3354/ame01893>
- Libois, Q., Lévesque-Desrosiers, F., Lambert-Girard, S., Thibault, S., et Domine, F. (2019). Optical porosimetry of weakly absorbing porous materials. *Optics Express*, 27(16), 22983-22993. <https://doi.org/10.1364/OE.27.022983>
- Liu, W., Fortier, R., Molson, J., et Lemieux, J.-M. (2021). A conceptual model for closed talik dynamics and icing formation in a river floodplain in the continuous permafrost zone at Salluit, Nunavik (Québec), Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, 32(3), 468-483. <https://doi.org/10.1002/ppp.2111>
- Publications issues de Sentinelle Nord
- Liu, W., Fortier, R., Molson, J., et Lemieux, J.-M. (2022). Three-dimensional numerical modeling of cryo-hydrogeological processes in a river-talik system in a continuous permafrost environment. *Water Resources Research*, 58(3), e2021WR031630. <https://doi.org/10.1029/2021WR031630>
- Mainville, M. (2022). *Conception de matériaux pi-conjugués pour des applications en dispositifs optoélectroniques organiques* [Thèse de doctorat, Université Laval]. CorpusUL. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/103965>
- Mainville, M., Tremblay, V., Fenniri, M. Z., Laventure, A., Farahat, M. E., Ambrose, R., Welch, G. C., Hill, I. G., Leclerc, M. (2020). Water compatible direct (hetero) arylation polymerization of PPDT2FBT : A pathway towards large-scale production of organic solar cells. *Asian Journal of Organic Chemistry*, 9(9), 1318. <https://doi.org/10.1002/ajoc.202000231>
- Matveev, A., Laurion, I., et Vincent, W. F. (2018). Methane and carbon dioxide emissions from thermokarst lakes on mineral soils. *Arctic Science*, 4(4), 584-604. <https://doi.org/10.1139/as-2017-0047>
- Matveev, A., Laurion, I., et Vincent, W. F. (2019). Winter accumulation of methane and its variable timing of release from thermokarst lakes in subarctic peatlands. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 124(11), 3521-3535. <https://doi.org/10.1029/2019jg005078>
- Mohit, V., Culley, A., Lovejoy, C., Bouchard, F., et Vincent, W. F. (2017). Hidden biofilms in a far northern lake and implications for the changing Arctic. *npj Biofilms and Microbiomes*, 3, 17. <https://doi.org/10.1038/s41522-017-0024-3>
- Paradis, P., Boilard, T., Fortin, V., Trzesien, S., Ude, M., Dussardier, B., ... Bernier, M. (2022). Dysprosium-doped silica fiber as saturable absorber for mid-infrared pulsed all-fiber lasers. *Optics Express*, 30(3), 3367-3378. <https://doi.org/10.1364/OE.448060>
- Pilla, R. M., et Couture, R.-M. (2021). Attenuation of photosynthetically active radiation and ultraviolet radiation in response to changing dissolved organic carbon in browning lakes: Modeling and parametrization. *Limnology and Oceanography*, 66(6), 2278-2289. <https://doi.org/10.1002/lno.11753>
- Poirier, M., Fauteux, D., Gauthier, G., Domine, F., et Lamarre, J.-F. (2021). Snow hardness impacts intranivean locomotion of arctic small mammals. *Ecosphere*, 12(11), e03835. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3835>

- Publications issues de Sentinelle Nord
- 🔗 Sergeant, F., Therrien, R., Oudin, L., Jost, A., et Anctil, F. (2021). Evolution of Arctic rivers recession flow: Global assessment and data-based attribution analysis. *Journal of Hydrology*, 601, 126577. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126577>
- 🔗 Tsuji, M., Tanabe, Y., Vincent, W. F., et Uchida, M. (2019a). *Vishniacozyma ellesmerensis* sp. nov., a psychrophilic yeast isolated from a retreating glacier in the Canadian High Arctic. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 69(3), 696-700. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.003206>
- 🔗 Tsuji, M., Tanabe, Y., Vincent, W. F., et Uchida, M. (2019b). *Mrakia hoshinonis* sp. nov., a novel psychrophilic yeast isolated from a retreating glacier on Ellesmere Island in the Canadian High Arctic. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 69(4), 944-948. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.003216>
- 🔗 Tsuji, M., Vincent, W. F., Tanabe, Y., et Uchida, M. (2022). Glacier retreat results in loss of fungal diversity. *Sustainability*, 14(3), 1617. <https://doi.org/10.3390/su14031617>
- 🔗 Vigneron, A., Cruaud, P., Langlois, V., Lovejoy, C., Culley, A. I., et Vincent, W. F. (2020). Ultra-small and abundant: Candidate phyla radiation bacteria are potential catalysts of carbon transformation in a thermokarst lake ecosystem. *Limnology and Oceanography Letters*, 5(2), 212-220. <https://doi.org/10.1002/lol2.10132>
- 🔗 Vigneron, A., Lovejoy, C., Cruaud, P., Kalenitchenko, D., Culley, A., et Vincent, W. F. (2019). Contrasting winter versus summer microbial communities and metabolic functions in a permafrost thaw lake. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1656. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01656>
- Vincent, W. F., et Mueller, D. (2020). Witnessing ice habitat collapse in the Arctic. *Science*, 370(6520), 1031-1032. <https://doi.org/10.1126/science.abe4491>

Références  
externes

- AMAP. (2011). *Snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate change and the cryosphere*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norvège. xii + 538 pp. <https://www.amap.no/documents/doc/snow-water-ice-and-permafrost-in-the-arctic-swipa-climate-change-and-the-cryosphere/743>
- AMAP. (2017). *Snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norvège. xiv + 269 pp. <https://www.amap.no/documents/download/2987/inline>
- AMAP. (2021). *AMAP Arctic climate change update 2021: Key trends and impacts*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norvège. viii + 148pp. <https://www.amap.no/documents/doc/amap-arctic-climate-change-update-2021-key-trends-and-impacts/3594>
- Barry, R. G. (2002). The role of snow and ice in the global climate system: A review. *Polar Geography*, 26(3), 235-246. <https://doi.org/10.1080/789610195>
- Berteaux, D., Gauthier, G., Domine, F., Ims, R. A., Lamoureux S. F., Lévesque, E., et Yoccoz, N. (2016). Effects of changing permafrost and snow conditions on tundra wildlife: Critical places and times. *Arctic Science*, 3(2), 65-90. <https://doi.org/10.1139/as-2016-0023>
- Grosse, G., Jones, B. M. et Arp, C. D. (2013). *Thermokarst lakes, drainage, and drained basins*. J.F. Shroder (Ed.), Treatise on Geomorphology, Academic Press, pp. 325-353. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00216-5>
- Heginbottom, J. A., Dubreuil, M. A., et Harker, P. T. (1995). *Canada, permafrost*. The National Atlas of Canada. Natural Resources Canada, Geomatics Canada, MCR Series no. 4177. <https://doi.org/10.4095/294672>
- Hjort, J., Streletskiy, D., Dore, G., Wu, Q., Bjella, K., et Luoto, M. (2022). Impacts of permafrost degradation on infrastructure. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(1), 24-38. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00247-8>
- Liston, G. E., et Hiemstra, C. A. (2011). The changing cryosphere: Pan-Arctic snow trends (1979-2009). *Journal of Climate*, 24(21), 5691-5712. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00081.1>
- Matveev, A., Laurion, I., Deshpande, B. N., Bhiry, N., et Vincent, W. F. (2016). High methane emissions from thermokarst lakes in subarctic peatlands. *Limnology and Oceanography*, 61, S150-S164. <https://doi.org/10.1002/lno.10311>

Références  
externes

- Mueller, D. R., Van Hove, P., Antoniadou, D., Jeffries, M. O. et Vincent, W. F. (2009). High Arctic lakes as sentinel ecosystems: Cascading regime shifts in climate, ice cover, and mixing. *Limnology and Oceanography*, 54(6), 2371–2385. [https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6\\_part\\_2.2371](https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2371)
- Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H. H., Dashtseren, A., Delaloye, R., Elberling, B., Eitzelmüller, B., Kholodov, A., Khomutov, A., Kääh, A., Leibman, M. O., Lewkowicz, A. G., Panda, S. K., Romanovsky, V., Way, R. G., Westergaard-Nielsen, A., Wu, T., ... Zou, D. (2019). Northern hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000-2016 at 1 km<sup>2</sup> scale. *Earth-Science Reviews*, 193, 299–316. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>
- Schuur, E. A. G., McGuire, A. D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., Hugelius, G., Koven, C. D., Kuhry, P., Lawrence, D. M., Natali, S. M., Olefeldt, D., Romanovsky, V. E., Schaefer, K., Turetsky, M. R., Treat, C. C., et Vonk, J. E. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520, 171-179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- Smith, S. L., O'Neill, H. B., Isaksen, K., Noetzli, J. et Romanovsky, V. E. (2022). The changing thermal state of permafrost. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 10–23. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00240-1>
- van Everdingen. (1998). *Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms: In Chinese, English, French, German, Icelandic, Italian, Norwegian, Polish, Romanian, Russian, Spanish, and Swedish*. Arctic Institute of North America. [https://globalcryospherewatch.org/reference/glossary\\_docs/Glossary\\_of\\_Permafrost\\_and\\_Ground-Ice\\_IPA\\_2005.pdf](https://globalcryospherewatch.org/reference/glossary_docs/Glossary_of_Permafrost_and_Ground-Ice_IPA_2005.pdf)
- Vincent, W. F., Callaghan, T. V., Dahl-Jensen, D., Johansson, M., Kovacs, K. M., Michel, C., Prowse, T., Reist, J. D., et Sharp, M. (2011). Ecological implications of changes in the Arctic cryosphere. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 40(1), 87–99. <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0218-5>
- Vincent, W. F., Lemay, M. et Allard, M. (2017). Arctic permafrost landscapes in transition: Towards an integrated Earth system approach. *Arctic Science*, 3(2), 39-64. <https://doi.org/10.1139/as-2016-0027>

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 3.0](#) (Poirier et coll., 2021); [CC BY 4.0](#) (Matveev et coll., 2018; Labbé et coll., 2020); [CC BY-NC 4.0](#) (Bégin et coll., 2021a).



**Rédaction de l'introduction**

Katie Blasco

**Recherche et rédaction des faits saillants scientifiques**

Sophie Gallais

**Révisions et édition finale**

Keith Lévesque, Aurélie Lévy et Pascale Ropars

**Remerciements**

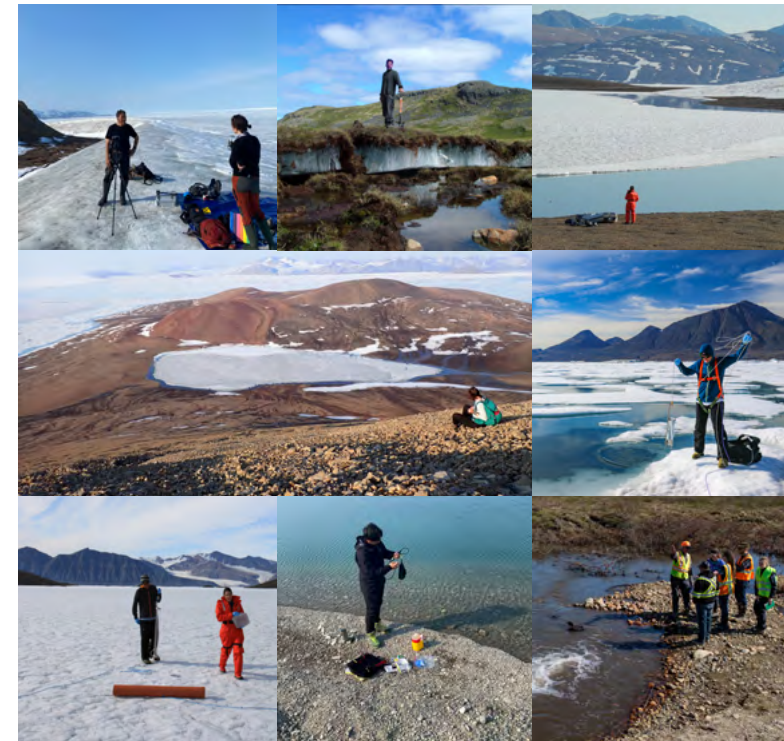
Les membres des équipes de recherche suivants ont contribué à la révision des faits saillants scientifiques présentés dans ce chapitre :

Raoul-Marie Couture, Alexander Culley, Florent Domine, Sarah Gauthier, Jesse Greener, Théo Guérineau, Jean-Michel Lemieux, Sylvain Moineau, Mathilde Poirier, Pascale Roy-Léveillé, Warwick Vincent

Nous remercions également Emmanuel L'Hérault et Mary Thaler pour leurs commentaires sur l'introduction.

**Crédits photographiques**

	<b>Index</b>
Martin Bernier	56
Karel Cadoret	61, 90
Fabrice Calmels	73
Centre d'études nordiques	75, 90
Pierre Coupel	59, 67, 79
Raoul-Marie Couture	51, 64, 90
Martin Fortier/ArcticNet	57, 71, 72
Jesse Greener	65
Emmanuel L'Hérault	49
Martin Lipman © Musée canadien de la nature	73
Weronika Murray	56, 90
Renaud Philippe	53, 54
Denis Sarrazin	63, 89, 90
Marie-Audrey Spain Tassitano	69
Warwick Vincent	66, 74, 90



# Dynamique des écosystèmes terrestres et réponse aux changements





## 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).

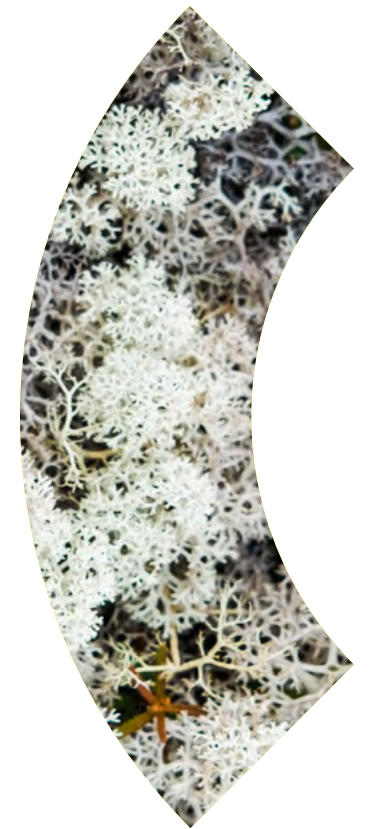
Bien que les changements climatiques aient une incidence sur les espèces, ils en ont également sur le réseau de liens trophiques qu'entretiennent ces dernières au sein d'un écosystème. L'un des défis auxquels les écologues font face aujourd'hui est de comprendre la manière dont les communautés se réorganiseront 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







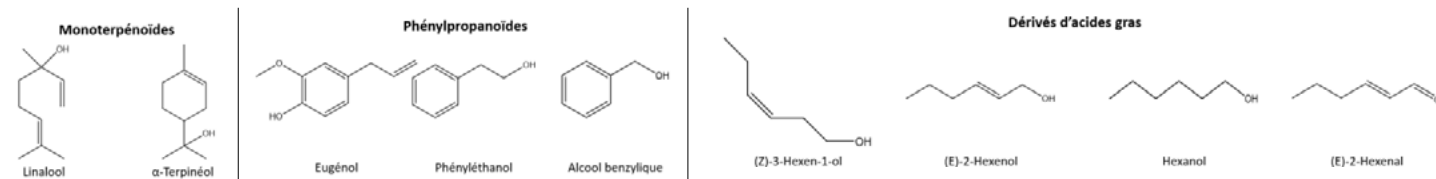
## 1. Chimio-diversité nordique : une signature moléculaire distinctive

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).

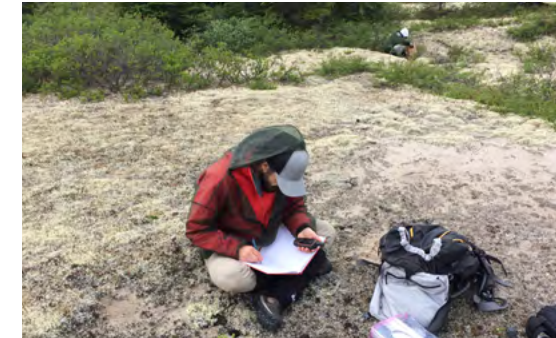
Figure 1.1  
Structures des métabolites principaux des extraits volatils de *Betula glandulosa*.  
© Jean-Christophe Séguin



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 liées aux différents processus de colonisation ou à une présence plus importante de bactéries dans les sols nordiques (Alonso-Garcia et coll., 2022).



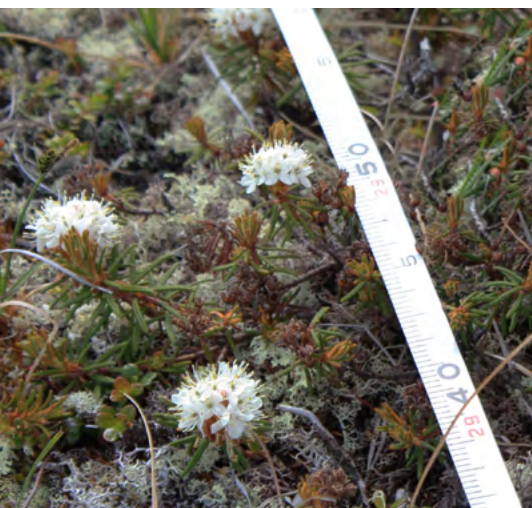
## 2. Le verdissement: des répercussions multiples dans un environnement interconnecté

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).

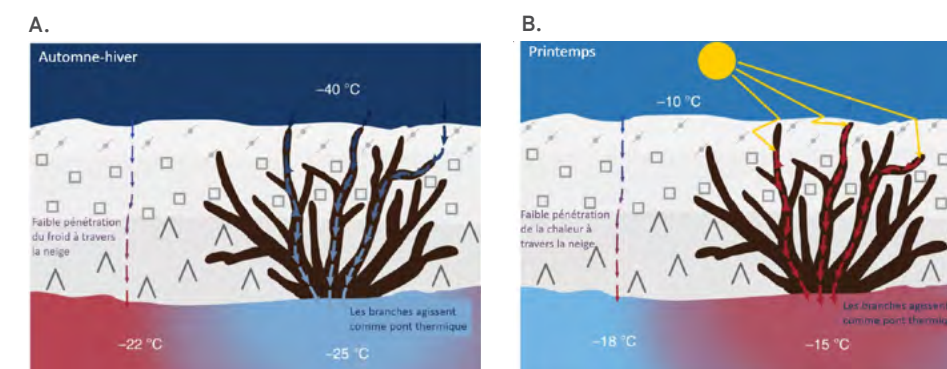


Figure 2.5 Les branches des arbustes agissent comme pont thermique à travers la neige en hiver (a) et au printemps (b). Figure tirée de Domine et coll., 2022, un article sous licence CC BY 4.0.



### 3. Des communautés animales en pleine mutation

Sélection de faits saillants  
de la recherche

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.

«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).

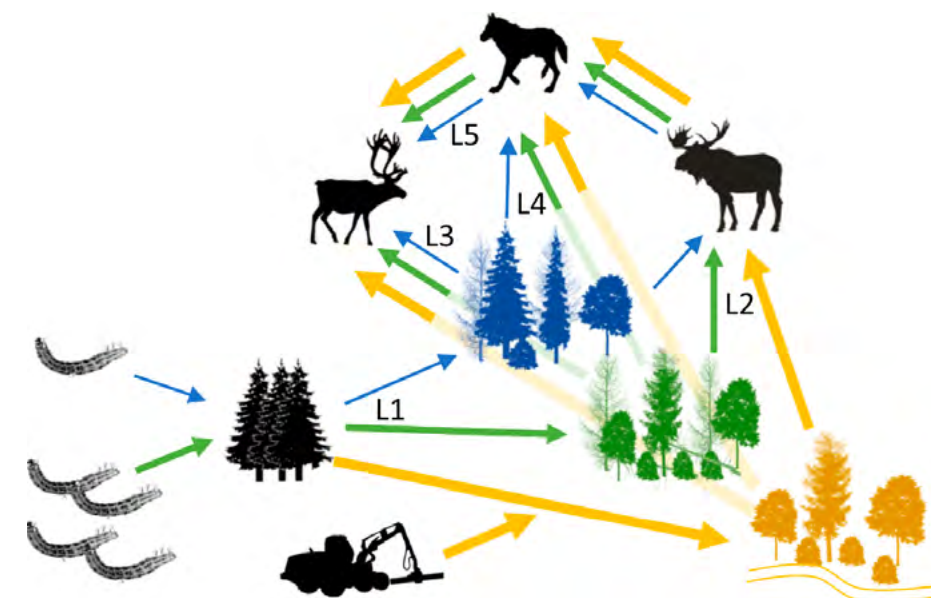


Figure 3.2  
Interactions trophiques illustrant les effets indirects d'un insecte défoliateur dans les premiers stades d'une épidémie (flèches bleues) et dans un stade plus avancé (flèches vertes). Les flèches jaunes représentent l'amplification des effets engendrée par les activités de coupe de récupération.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

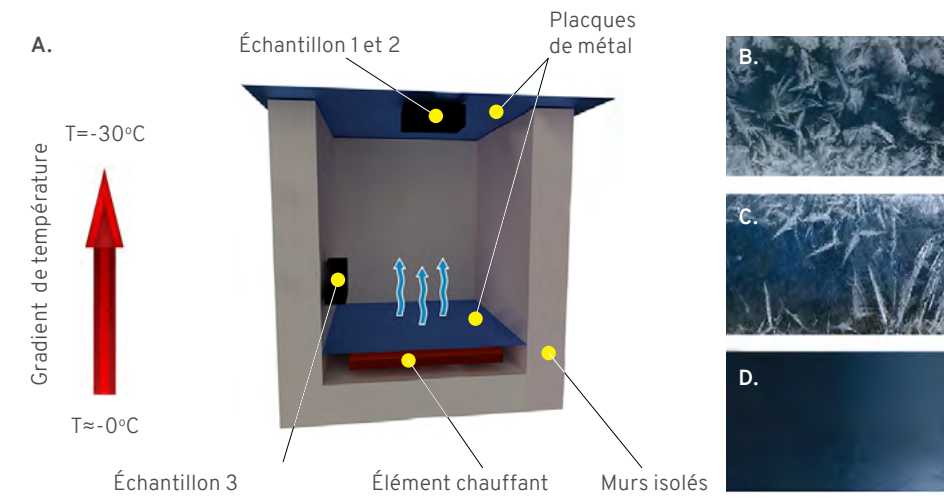


Figure 4.2 La formation de givre a été évitée en plaçant l'échantillon de verre sur la paroi latérale dans un montage expérimental où les températures étaient inférieures au point de congélation. Une schématisation du montage (a) montre que le givre se forme sur des verres sans (b) et avec (c) revêtement 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)

## 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>
- LeTourneau, 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>
- LeTourneau, 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 Tagliatalata-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](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (Domine et coll., 2022; Pusenkova et coll., 2021); [licence PNAS](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) (Labadie et coll., 2021).



**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	91, 105, 122
Gabriel Bergeron	103
Pierre Coupel	121
Isabelle Dubois/ArcticNet	93
Frédéric Dulude-de-Broin	107, 108, 122
Davood Kalhor	104
Pierre Legagneux	106, 122
Alexandre Paiement	100
Renaud Philippe	95, 96, 97, 98, 109
René Richard	101, 122
Pascale Ropars	99
Normand Voyer	98, 99, 113, 122



# Alimentation, santé métabolique et insécurité alimentaire





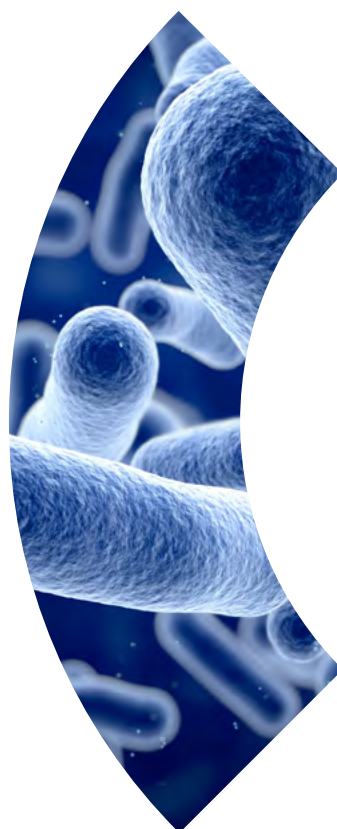
## Mieux comprendre les liens entre l'alimentation, la santé métabolique et l'insécurité alimentaire dans le Nord

### Introduction

L'interconnexion entre l'alimentation, la santé humaine et l'environnement est ancrée dans les systèmes de connaissances et les pratiques culturelles des peuples autochtones depuis des milliers d'années. Issus de la chasse, de la pêche et de la cueillette, les aliments traditionnels constituent un pilier de la santé inuite (ITK, 2014). Cependant, les communautés de l'Arctique vivent une transition rapide vers un régime riche en aliments transformés et des taux d'insécurité alimentaire alarmants y sont enregistrés. Cette situation entraîne des conséquences importantes pour la santé et le bien-être des habitants des régions nordiques (Egeland et coll., 2011). Dans l'Inuit Nunangat, 76 % des Inuits de 15 ans et plus ont déclaré vivre de l'insécurité alimentaire (ITK, 2021). Une disparité en matière d'accès aux services d'approvisionnement et de traitement de l'eau a également été observée dans cette région, compromettant l'accès sécuritaire à

l'eau potable (Sohns et coll., 2019). Ainsi, l'accès à l'eau potable et à des aliments nutritifs demeure un défi pour des millions de personnes vivant dans l'Arctique circumpolaire (Cassivi et coll., 2023).

Les aliments traditionnels contribuent de façon importante à l'alimentation, à la santé et à la sécurité alimentaire des collectivités inuites canadiennes (Gagné et coll., 2012; Little et coll., 2021). Ils représentent une source importante de protéines, de vitamines et de minéraux (Allaire et coll., 2021b). Malgré ce rôle essentiel, les effets de la colonisation, des changements climatiques, de l'évolution des préférences alimentaires, des défis socioéconomiques et les préoccupations au sujet de l'exposition aux contaminants mènent à une transition alimentaire rapide dans ces collectivités, tout en menaçant leur sécurité et leur souveraineté alimentaires (Little et coll., 2021). Les pratiques traditionnelles de chasse et de récolte d'aliments sont progressivement remplacées par des régimes constitués d'aliments achetés en épicerie et pauvres en nutriments (Furgal et coll., 2021). Une mauvaise alimentation, incarnée par un régime alimentaire occidental riche en gras saturés, en sucres et en aliments transformés, est le principal facteur de risque associé à la mortalité et le deuxième facteur



de risque d'incapacité au Canada (Bacon et coll., 2019). À mesure que les régimes riches en aliments transformés se répandent dans l'Arctique canadien, de plus en plus de préoccupations en matière de santé, comme l'obésité, le diabète et les maladies cardiométaboliques, sont soulevées (Allaire et coll., 2021a). Il devient donc crucial de comprendre le lien entre l'alimentation et la santé, et en particulier pour les populations inuites.

Des progrès technologiques ont permis de mieux comprendre le lien entre les pratiques alimentaires et la santé. Plus précisément, deux systèmes complexes et interconnectés ont été identifiés dans le contrôle du métabolisme énergétique et les dérèglements métaboliques (Iannotti et DiMarzo, 2021). Le microbiome intestinal, un écosystème de microorganismes régi par des facteurs environnementaux comme l'alimentation et les médicaments, joue un rôle crucial dans de nombreux aspects de la santé, notamment dans l'immunité, le métabolisme et le comportement (Valdes et coll., 2018). Le système endocannabinoïde, ou l'endocannabinoïdome, comprend, quant à lui, les récepteurs cannabinoïdes, les endocannabinoïdes et les enzymes responsables de leur synthèse et de leur dégradation (Lu et Mackie, 2016). L'endocannabinoïdome intervient dans la régulation d'une grande variété de processus, comme le métabolisme, l'appétit, la digestion, l'inflammation et la neuromodulation. Ces deux systèmes sont fortement influencés par le régime alimentaire, et jouent un rôle dans la médiation de nombreuses répercussions de l'alimentation sur la santé, notamment dans la communication le long de l'axe intestin-cerveau.

Les régimes obésogènes riches en gras augmentent les niveaux d'endocannabinoïdes, tant dans le cerveau que dans les tissus périphériques (Forte et coll., 2020), modulant ainsi la transduction du signal de l'intestin vers le cerveau par diverses biomolécules. Ces dernières influent sur la régulation énergétique et sont impliquées dans le développement de la neuroinflammation, qui peut ensuite modifier les comportements. Ainsi, les changements alimentaires contrôlent le système endocannabinoïde et ses relations bidirectionnelles avec le microbiome intestinal, lequel régule non seulement le métabolisme gastro-intestinal, mais aussi la fonction cérébrale (Choi et coll., 2020b).

Il est possible de mieux comprendre comment le microbiote intestinal réagit à de mauvaises habitudes alimentaires grâce au développement d'outils prédictifs et de biomarqueurs. Le diagnostic rapide et efficace des maladies représente un défi, surtout dans les régions éloignées (Azzi, 2019). À ce jour, l'analyse du microbiote intestinal repose principalement sur des technologies de séquençage permettant de déterminer la composition microbienne et l'expression génétique. La mise au



point de nouveaux outils et de nouveaux modèles animaux permettant une étude approfondie des molécules dérivées du microbiome ainsi que l'identification de biomarqueurs moléculaires pour un diagnostic précoce des maladies cardiométaboliques est cruciale (Anhê et coll., 2019, 2018; Cornuault et coll., 2022).

Les communautés nordiques isolées sont également aux prises avec un accès déficient à une eau potable de qualité en quantité suffisante. Des interventions sanitaires culturellement adaptées sont nécessaires pour garantir des services d'eau inclusifs et pour atteindre les objectifs de développement durable (ODD) relatifs à l'accès universel à l'eau (Cassivi et coll., 2023).

Ce chapitre rassemble les résultats du programme Sentinelle Nord qui élargissent notre compréhension des bienfaits de l'alimentation traditionnelle et d'une alimentation saine sur le microbiote intestinal. Il examine également les liens entre l'alimentation et les maladies chroniques et leurs répercussions à différentes échelles, depuis les environnements alimentaires jusqu'au niveau moléculaire. Enfin, il met en lumière des initiatives culturellement adaptées qui s'attaquent aux problèmes d'insécurité alimentaire et d'accès à l'eau potable en collaboration avec les communautés du Nord. Collectivement, ces progrès peuvent orienter la recherche et les mesures visant à prévenir le développement de maladies liées à l'alimentation, à améliorer la santé nutritionnelle et à assurer des services d'eau potable inclusifs.

#### Q MOTS CLÉS:

Alimentation traditionnelle, Alimentation occidentale, Microbiome intestinal, Axe intestin-cerveau, Santé métabolique, Système endocannabinoïde, Environnement alimentaire, Sécurité sanitaire de l'eau potable





## 1. Les bienfaits des oméga-3

Le régime alimentaire traditionnel inuit est riche en acides gras polyinsaturés de la famille des oméga-3, notamment en raison de la consommation fréquente de poissons. Les bienfaits des oméga-3 sur la santé sont de plus en plus reconnus, tant pour la population générale que pour les Inuits.

1.1 Dans une population ne présentant pas de pathologies liées à l'alimentation, une étude a révélé que les concentrations d'un dérivé d'oméga-3 (le 2-monoacylglycérol) dans le plasma sont associées positivement à des traits d'alimentation intuitive, c'est-à-dire à des comportements alimentaires basés sur des signaux physiologiques de faim et de satiété. Des recherches se poursuivent afin de mieux comprendre l'implication de ces lipides bioactifs dans la régulation des comportements alimentaires et d'élaborer de nouvelles stratégies nutritionnelles et pharmacologiques ([Rochefort et coll., 2021](#)).

1.2 La consommation d'huile de poisson, riche en acides gras polyinsaturés de la famille des oméga-3, combinée au cannabidiol (CBD) a produit un important effet anti-inflammatoire chez la souris avec colites. De plus, l'huile de poisson et le CBD, utilisés séparément ou en combinaison, ont affecté le microbiote intestinal de la souris. Ces résultats soulignent le potentiel d'utilisation de l'huile de poisson et du CBD combinés en faible dose pour le traitement des maladies inflammatoires de l'intestin ([Silvestri et coll., 2020](#)).



1.3 En utilisant un simulateur d'intestin humain, une équipe de recherche a démontré que la consommation de suppléments d'huile de poisson riche en oméga-3 peut moduler la composition du microbiote en fonction de la région intestinale. De plus, la consommation de ces suppléments était associée avec une floraison remarquable d'*Akkermansia muciniphila*, une bactérie connue pour ses effets bénéfiques sur la santé ([Roussel et coll., 2022](#)).

Sélection de faits saillants  
de la recherche



## 2. De nouvelles avancées sur les polyphénols

Sélection de faits saillants  
de la recherche

Les polyphénols sont présents en abondance dans les baies arctiques, ces petits fruits fréquemment consommés par les Nunavimmiut. De nombreuses données appuient le potentiel bénéfique des polyphénols contre les maladies cardiovasculaires, notamment par leur action sur le microbiote intestinal.

2.1 Des classes spécifiques de polyphénols, comme les proanthocyanidines et les ellagitanins, atténuent plusieurs caractéristiques du syndrome métabolique, cet ensemble d'affections qui augmente le risque de maladie cardiaque, d'accident vasculaire cérébral et de diabète de type 2. Il apparaît de plus en plus évident que le microbiote intestinal constitue un médiateur clé des bienfaits des polyphénols pour la santé (Anhê et coll., 2019).

2.2 Des extraits polyphénoliques de chicoutai (*Rubus chamaemorus*), de busserole alpine (*Arctostaphylos alpina*) et d'airelle rouge (*Vaccinium vitis-idaea*) ont tous présenté des effets bénéfiques sur la résistance à l'insuline, ainsi que pour les taux d'insuline à jeun et après les repas chez un modèle murin (Anhê et coll., 2018). La consommation de certaines baies arctiques pourrait donc réduire l'inflammation chronique liée à l'obésité et aux troubles métaboliques.

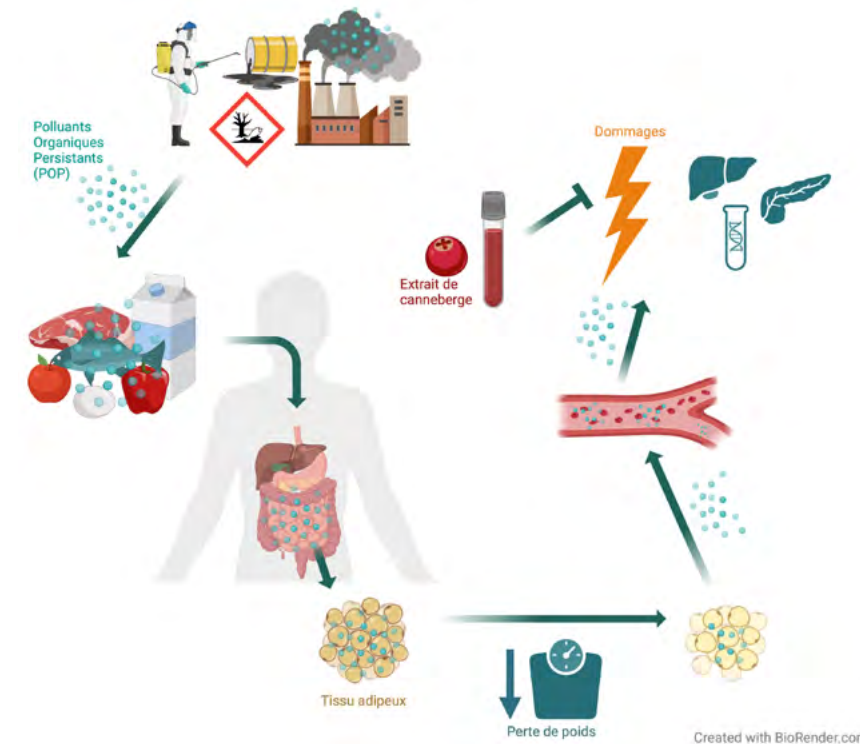
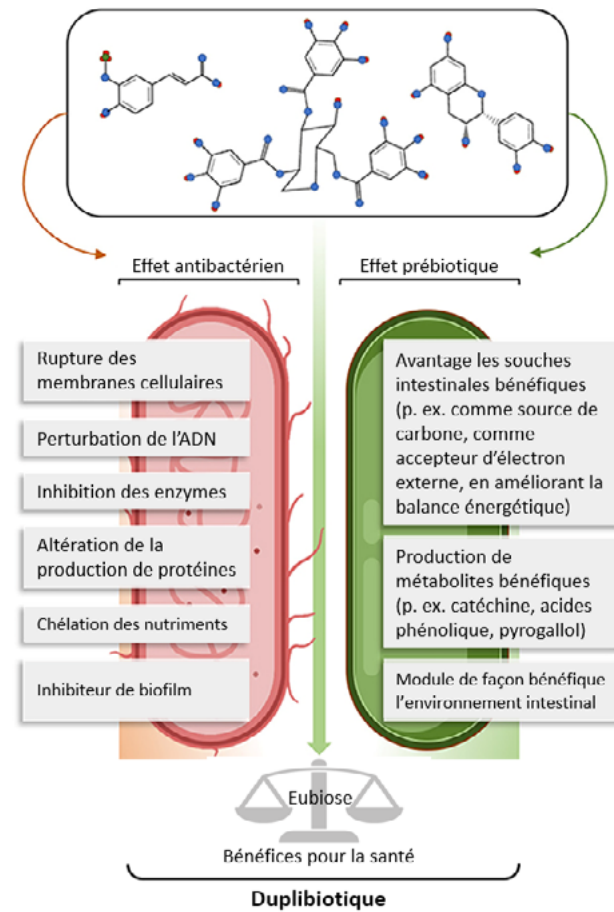


Figure 2.3  
Schématisation de l'impact des polluants organiques persistants dans un contexte de perte de poids rapide. © Béatrice Choi

2.3 Alors que la perte de poids induit la libération des polluants organiques persistants (POP) contenus dans les tissus adipeux et l'augmentation de leurs concentrations dans le corps, la consommation d'extraits de canneberge, utilisés comme prébiotique, a diminué la charge de ces polluants (Figure 2.3). Ces résultats sont d'intérêt pour les communautés vivant dans l'Arctique qui sont particulièrement exposées aux POPs par leur alimentation (Choi et coll., 2020a).

2.4 Les polyphénols contenus dans les bleuets ont réduit la prise de poids liée à l'alimentation et amélioré la sensibilité à l'insuline. Des classes spécifiques de polyphénols contenus dans les bleuets, les proanthocyanidines et les anthocyanines, ont procuré ces effets bénéfiques sur la santé métabolique, notamment par leur action de modulation du microbiote intestinal (Morissette et coll., 2020).

Figure 2.5  
Description de l'activité antibactérienne et de l'effet prébiotique des polyphénols.  
Figure tirée de Rodriguez-Daza et coll., 2021, un article sous licence CC BY 4.0.



2.5 Le terme «duplbiotique» est proposé pour décrire les polyphénols qui modulent le microbiote intestinal par leur action antibactérienne et prébiotique (Figure 2.5). L'effet duplbiotique des polyphénols pourrait participer à l'atténuation des perturbations métaboliques et de la dysbiose intestinale. Les polyphénols représentent ainsi une cible d'intérêt dans la mise en place de stratégies alimentaires à potentiel thérapeutique (Rodriguez-Daza et coll., 2021).

### Répondre aux préoccupations concernant la consommation sécuritaire de l'oie des neiges

L'oie des neiges est une ressource alimentaire importante pour de nombreuses communautés autochtones. La pandémie de la COVID-19 a suscité des inquiétudes au sein de certaines de ces communautés quant à la possibilité de contracter le coronavirus en consommant ces oiseaux migrateurs. Les informations de la santé publique à l'époque n'étant pas totalement concluantes, une équipe de recherche a obtenu et analysé des échantillons de 500 oies et a pu conclure que ces animaux ne constituent pas un vecteur de transmission de la COVID-19. Les résultats ont été rapidement communiqués, illustrant ainsi la capacité des chercheurs et chercheuses à répondre aux préoccupations des communautés autochtones (Frederick et coll., 2021).



Infographies partagées avec les communautés autochtones et les organisations en santé publique au Canada. © Alexandra Langwieder



### 3. L'alimentation, un déterminant du microbiote intestinal

Sélection de faits saillants de la recherche

L'alimentation est un déterminant majeur du microbiote intestinal. Des changements alimentaires peuvent déséquilibrer le microbiote intestinal et entraîner des désordres cardiométaboliques. Il est important de pouvoir caractériser le microbiote intestinal, d'identifier des biomarqueurs et de développer des outils prédictifs permettant un diagnostic rapide et efficace des maladies cardiométaboliques.

3.1 En partenariat avec des collaborateurs et collaboratrices du Nunavik, les caractéristiques taxonomiques et fonctionnelles du microbiote intestinal des jeunes Nunavimmiut ont été identifiées à partir des échantillons de selles récoltés lors de l'enquête *Qanuilirpitaa?* 2017. Les résultats indiquent que le microbiote intestinal des jeunes adultes du Nunavik présente une grande diversité et que sa composition se distingue de celles des sociétés non occidentales et occidentales (Figure 3.1). L'alimentation des Nunavimmiut, composée d'aliments traditionnels et issus du commerce, pourrait expliquer l'aspect unique de leur microbiote intestinal (Abed et coll., 2022).

3.2 Des avancées ont été réalisées dans la conception d'un capteur optique permettant de détecter en temps réel des biomarqueurs clés produits par le microbiote intestinal. Une sonde modèle capable d'effectuer des mesures quantitatives du pH en temps réel *in vitro* a été conçue. Des expériences préliminaires suggèrent que des mesures du pH en temps réel sont également possibles dans l'intestin *in vivo* (Azzi, 2019).

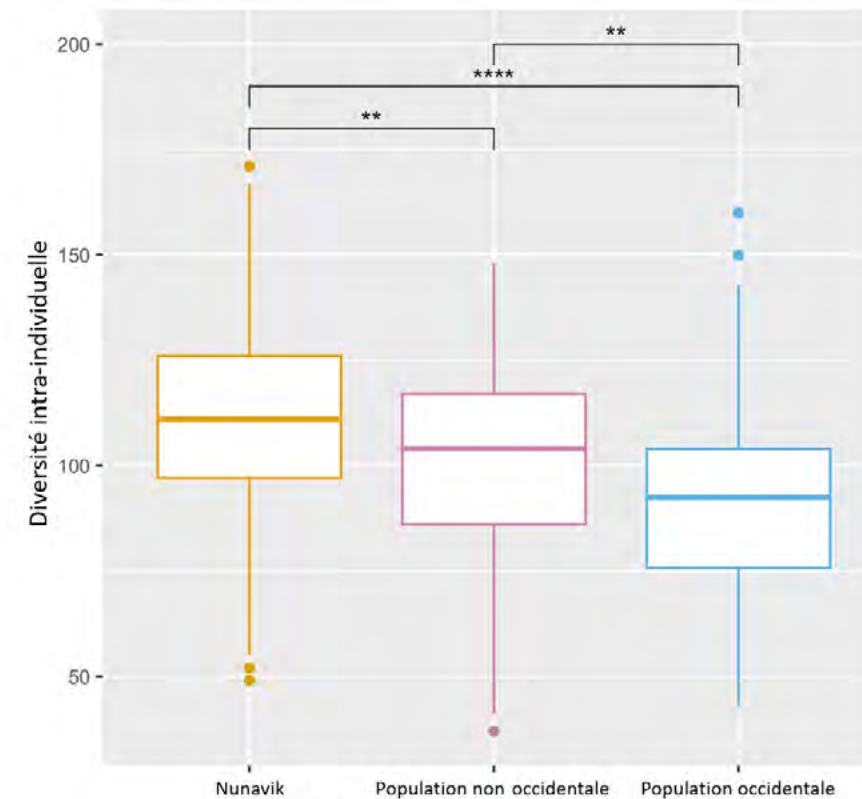
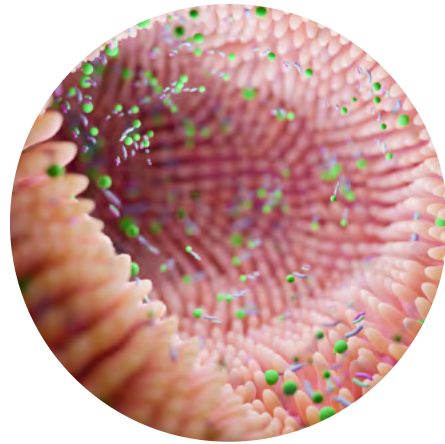


Figure 3.1  
La diversité intra-individuelle du microbiote intestinal des jeunes du Nunavik est significativement plus élevée que chez les individus des groupes comparés (populations occidentales et non occidentales). L'estimation de la richesse spécifique a été réalisée en utilisant le package *breakaway* dans R. (\* valeur  $p \leq 0.05$ , \*\* valeur  $p \leq 0.01$ , \*\*\* valeur  $p \leq 0.001$ , \*\*\*\* valeur  $p \leq 0.0001$ ).  
Figure tirée de Abed et coll., 2022, un article sous licence CC BY 4.0.

3.3 Les acides biliaries ont le potentiel d'être utilisés comme biomarqueurs du microbiote intestinal. Un modèle de réseau neuronal convolutif a été élaboré et a catégorisé avec succès les cinq types d'acides biliaries étudiés à partir de leurs spectres, même à de faibles concentrations. L'utilisation combinée de la spectroscopie Raman exaltée de surface (SRES) et d'algorithmes d'apprentissage profond a ainsi permis la première détection et différenciation des acides biliaries (Lebrun et coll., 2022).



#### 4. L'axe intestin-cerveau : des mécanismes d'actions à approfondir

Une importante connexion bidirectionnelle existe entre le microbiote intestinal et le cerveau. Toutefois, les mécanismes impliqués dans la régulation des fonctions cérébrales par le microbiote intestinal sont encore mal compris.

4.1 Un régime alimentaire obésogène entraîne de la neuroinflammation ainsi qu'une augmentation de la perméabilité de la barrière hématoencéphalique, lesquelles peuvent avoir une incidence sur le développement de troubles de l'humeur. L'obésité est d'ailleurs associée à une augmentation du risque de développer un trouble dépressif majeur. Le microbiote intestinal devient ainsi une nouvelle cible thérapeutique afin de prévenir et de traiter les comorbidités liées à l'obésité ([Choi et coll., 2020b](#)).

« L'axe intestin-cerveau implique différentes voies, notamment le microbiote et ses métabolites. Plusieurs neurotransmetteurs et métabolites modulent les voies du système immunitaire qui, à leur tour, influencent le comportement, la mémoire, l'apprentissage, la locomotion, les troubles de l'humeur et les troubles neurodégénératifs. »

Adapté de Rutsch et coll., 2020 (Traduction libre)

4.2 Le poisson-zèbre (*Danio rerio*) devient un modèle animal prometteur pour une meilleure compréhension des effets du microbiote intestinal sur le développement du cerveau. Plusieurs facteurs contribuent à l'intérêt de ce modèle, notamment son faible coût, la capacité d'évaluer de grandes cohortes, l'obtention potentielle de larves axéniques issues de parents non axéniques et la disponibilité de méthodes optiques pour sonder les larves de façon non invasive en tirant parti de leur transparence ([Cornuault et coll., 2022](#)).



Sélection de faits saillants  
de la recherche



## 5. Le rôle du système endocannabinoïde dans la santé métabolique

Sélection de faits saillants de la recherche

Le système endocannabinoïde agit à l'intersection entre le microbiote intestinal, la communication le long de l'axe intestin-cerveau et le métabolisme de l'hôte (Figure 5), jouant ainsi un rôle critique dans la santé métabolique et le développement de l'obésité (Forte et coll., 2020).

5.1 Le microbiome intestinal et le système endocannabinoïde peuvent être perturbés par de mauvaises habitudes alimentaires ou en cas d'obésité. Même si les interactions entre le microbiome intestinal et le système endocannabinoïde restent à définir, de nouvelles approches nutritionnelles ou pharmacologiques capables de moduler ces deux systèmes pourraient être bénéfiques pour traiter le syndrome métabolique ou l'obésité (Iannotti et Di Marzo, 2021).

5.2 La capacité du microbiote intestinal à moduler le système endocannabinoïde a été démontrée en réalisant une étude sur des souris axéniques. Dépourvues de microbiome intestinal, ces souris stériles présentaient de profondes altérations du système endocannabinoïde dans le cerveau et l'intestin, et particulièrement dans l'intestin grêle. Ces altérations ont été renversées chez la souris mâle adulte une semaine après une transplantation de microbiote fécal, laquelle leur a permis de retrouver un microbiome intestinal actif (Manca et coll., 2020a; Manca et coll., 2020b).

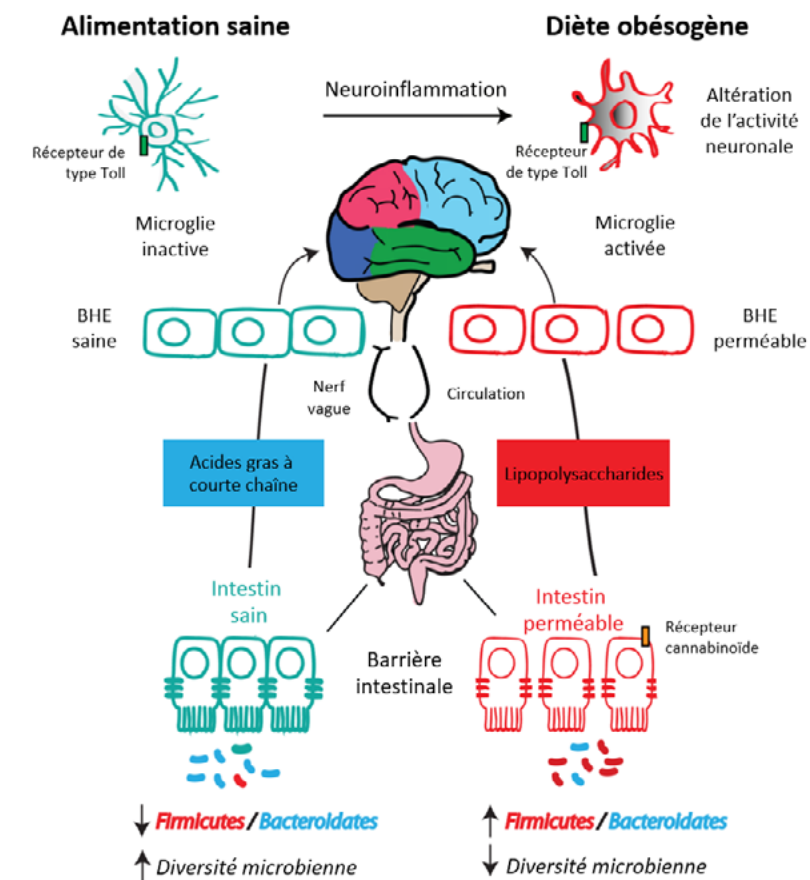


Figure 5  
Interactions d'un régime alimentaire sain (section verte) et d'un régime obésogène (section rouge) avec l'axe microbiome intestinal-endocannabinoïde-cerveau. Le régime alimentaire influence la composition du microbiote intestinal et régule la perméabilité intestinale. Le régime obésogène entraîne une dysbiose intestinale, une inflammation, une perméabilité intestinale et de la barrière hémato-encéphalique (BHE). Figure tirée de Forte et coll., 2020, un article sous licence CC BY 4.0.

5.3 Le microbiote intestinal et la consommation d'acides gras ont déterminé la signalisation du système endocannabinoïde (eCBome) dans une cohorte de 195 personnes, indépendamment de la distribution de leurs graisses corporelles. L'étude a démontré que les apports en acides gras sont associés aux niveaux plasmatiques de plusieurs médiateurs de l'eCBome. Ainsi, ces résultats révèlent la possibilité de moduler les médiateurs de l'eCBome plasmatique avec l'alimentation (Castonguay-Paradis et coll., 2020).

5.4 Une équipe de recherche a montré que la signalisation d'un neurotransmetteur était altérée chez les souris obèses, ce qui entraînait le dysfonctionnement de la neurogenèse de l'hippocampe adulte. Ces résultats fournissent un mécanisme moléculaire et fonctionnel pour expliquer les altérations de la mémoire épisodique liées à l'obésité chez les souris (Forte et coll., 2021).



## 6. Pour de nouveaux systèmes alimentaires

Sélection de faits saillants de la recherche

Les aliments traditionnels font partie intégrante de la culture, de la nutrition et de la santé des Inuits en Arctique. Toutefois, un changement dans les préférences alimentaires apparaît depuis quelques dizaines d'années, la majorité des Nunavimmiut (68 %) choisissant une alimentation mixte, c'est-à-dire un mélange d'aliments traditionnels et de produits issus du commerce (Furgal et coll., 2021).

6.1 De l'Arctique au Pacifique Sud, les commerces alimentaires dans les communautés autochtones éloignées présentent des caractéristiques communes: des prix élevés, des aliments de faible qualité, un choix limité d'aliments sains et une accessibilité accrue aux aliments transformés et malsains. Cette réalité peut mener à une alimentation à faible valeur nutritionnelle, accentuer l'insécurité alimentaire déjà fort présente en Arctique et contribuer au développement de maladies chroniques et de l'obésité. Des interventions favorisant la souveraineté alimentaire des communautés autochtones et le développement de systèmes alimentaires sains, abordables, et culturellement adaptés sont requises (Kenny et coll., 2020).



6.2 Différents profils alimentaires ont été déterminés chez les Inuits du Nunavik, et ceux-ci étaient fortement associés à des caractéristiques sociodémographiques (Figure 6.2). Le statut nutritionnel, l'exposition aux contaminants et les enjeux de santé des différents profils seront étudiés afin de déterminer des pistes de solutions pour des programmes adaptés de santé publique (Aker et coll., 2022a).

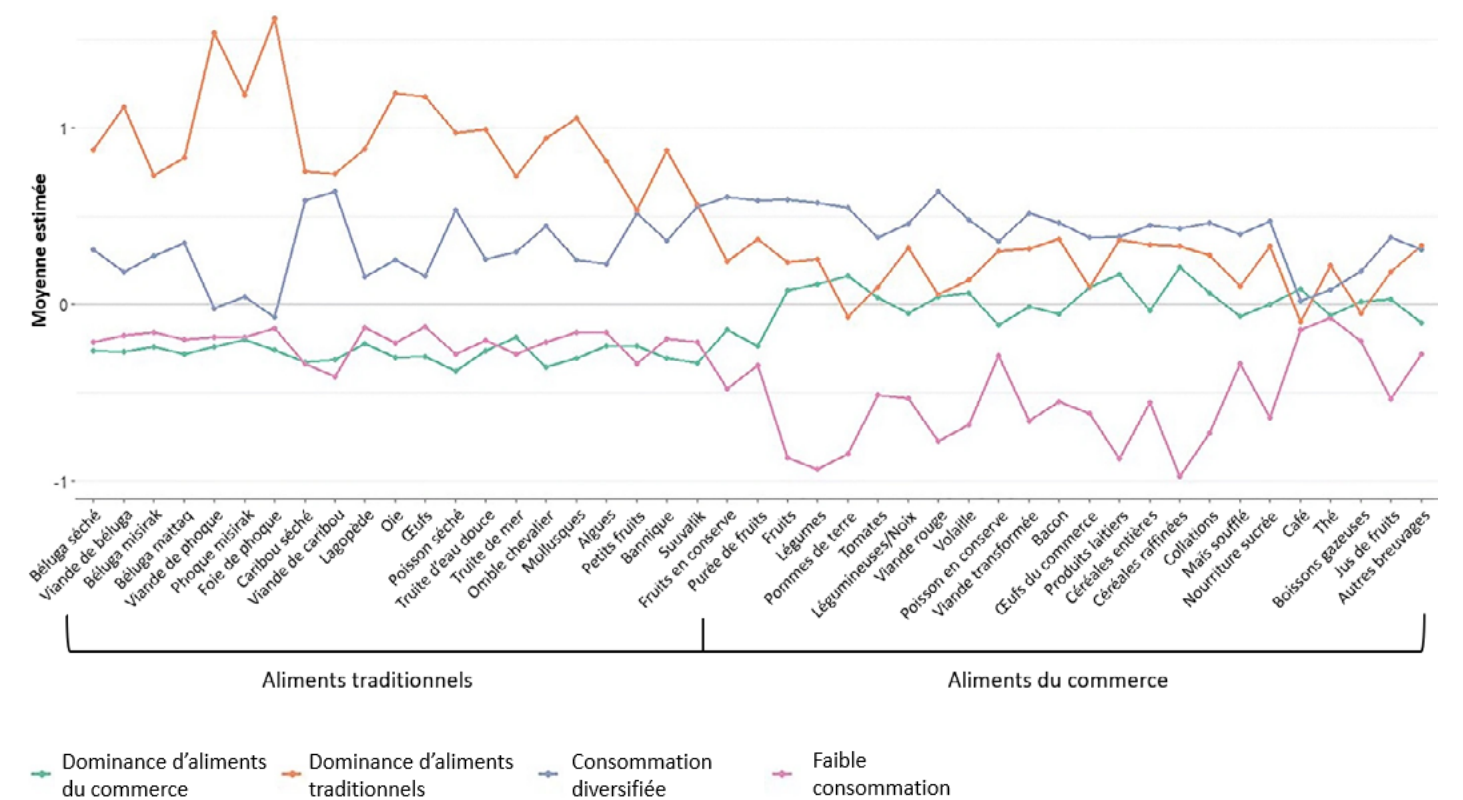


Figure 6.2  
Quatre profils alimentaires ont été identifiés: 42% de la population étudiée avait un profil à dominance d'aliments du commerce (ligne verte). Les femmes et les adultes inuits âgés de 30 à 49 ans étaient plus susceptibles d'avoir ce profil. Le profil à dominance d'aliments traditionnels (ligne orange) regroupait 12,6% de la population étudiée, soit le plus petit groupe. Les hommes, les jeunes inuits (16-29 ans) et les inuits plus âgés (≥ 50 ans) étaient plus souvent dans ce profil. Le profil de consommation diversifiée (ligne bleue) comprenait 23,4% de la population étudiée et incluait les personnes ayant une fréquence de consommation élevée d'aliments traditionnels et d'aliments du marché. Le profil de faible consommation (ligne violette) représentait 21,9% de la population étudiée et incluait les personnes vivant une forte insécurité alimentaire. Figure adaptée de Aker et coll., 2022a, un article sous licence CC BY 4.0.

6.3 Une équipe de recherche s'implique dans une démarche de recherche participative transdisciplinaire avec la communauté d'Ikaluktutiak au Nunavut afin de mettre en place un système de production alimentaire locale. À ce jour, 16 répliqués d'un prototype de mini-serres ont été installés dans le but de rendre possible l'agriculture à l'extérieur dans le Haut-Arctique. Pour favoriser l'agriculture en toute saison, des systèmes de culture intérieurs par hydroponie, aéroponie et en plein sol ont été implantés. Cette recherche permet également de consigner les savoirs associés aux pratiques serricoles et de connaître les perceptions des habitants et habitantes d'Ikaluktutiak concernant la qualité nutritionnelle des fruits et légumes disponibles en épicerie ainsi que leurs attentes quant à ceux qui sont cultivés localement (M. Dorais et C. Fournier-Côté, communication personnelle).



#### Les polluants dans les aliments du commerce

Les produits en conserve, les aliments emballés dans du plastique ainsi que plusieurs biens de consommation peuvent contenir des produits chimiques non persistants. L'exposition à ces contaminants suscite de plus en plus d'attention en Arctique, puisqu'une étude exploratoire réalisée dans le cadre de l'enquête *Qanuilirpitaa?* 2017 suggère des concentrations plus élevées de certains de ces contaminants chez les habitants du Nunavik que dans la population canadienne générale. Les femmes et les résidents de la baie d'Ungava présentaient les concentrations les plus élevées de ces substances. Des études approfondies sont nécessaires pour confirmer ces résultats, déterminer les sources d'exposition en Arctique et examiner leurs effets sur la santé des Inuits au Nunavik ([Aker et coll., 2022b](#)).





## 7. L'accès à une eau potable de qualité

De nombreuses personnes vivant dans l'Arctique ont un accès limité à l'eau potable. Les communautés autochtones éloignées sont particulièrement touchées par cette situation et sont aux prises avec différents problèmes, parmi lesquels figure une eau de qualité inappropriée et en quantité insuffisante, ainsi qu'un service d'approvisionnement intermittent.

7.1 Des interventions culturellement adaptées qui tiennent compte des préférences personnelles sur les perceptions des risques par les ménages et les pratiques d'accès à l'eau sont nécessaires pour améliorer et garantir l'approvisionnement en eau potable pour les communautés de l'Arctique. La prévention de la contamination microbienne et chimique représente la clé du succès des interventions sanitaires, des sources d'eau jusqu'aux points d'utilisation (Cassivi et coll., 2023).

7.2 Un comité composé de chercheurs et chercheuses, de membres de l'Administration régionale Kativik, de la Régie régionale de la santé et des services sociaux du Nunavik, et de représentants et représentantes des communautés travaille sur les enjeux associés à l'eau potable. Cette collaboration permet d'intégrer les préoccupations et les enjeux locaux dans les projets de recherche et assure un meilleur transfert des connaissances (S. Guilherme, communication personnelle).



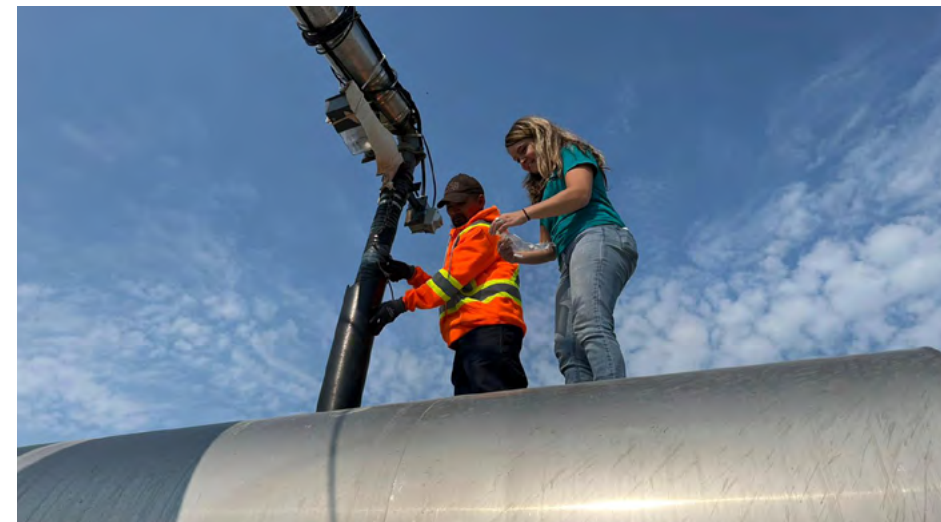
7.3 Dans le cadre des consultations pour la création de l'Agence canadienne de l'eau, un rapport sur l'eau potable au Nunavik a été produit en collaboration avec la Société Makivik. Ce rapport est basé sur une revue de littérature et des consultations auprès d'experts et d'expertes. Les enjeux suivants ont été identifiés: (1) la dégradation de la qualité de l'eau après traitement, (2) la formation du personnel pour l'utilisation et l'entretien des infrastructures, (3) la protection des sources d'eau potable, (4) la synergie entre les différents paliers de gouvernements et les acteurs de l'eau (M. Rodriguez et D. Nadeau, communication personnelle).

Sélection de faits saillants  
de la recherche



7.4 Afin d'obtenir un portrait de la variabilité spatio-temporelle de la qualité physico-chimique et microbiologique de l'eau, des stations météorologiques ont été installées non loin des sources d'eau potable et une surveillance continue de la qualité de l'eau de la source à l'usine est établie à Kangiqsualujjuaq et à Umiujaq, au Nunavik. Ces démarches visent à déterminer des protocoles et des outils d'aide à la décision pour les exploitants (M. Rodriguez, communication personnelle).

7.5 Au Nunavik, un programme d'échantillonnage a montré que la désinfection secondaire par chloration n'est pas suffisante pour assurer une protection adéquate pendant la distribution et le stockage domestiques de l'eau potable. En collaboration avec le village de Kangiqsualujjuaq, au Nunavik, un outil d'aide à la décision a été mis au point afin de déterminer les quantités adéquates de chlore permettant d'obtenir des concentrations de désinfectant résiduel répondant aux normes internationales, tout en limitant la génération de sous-produits de désinfection potentiellement nocifs pour la santé ainsi que les goûts et les odeurs de chlore qui freinent la consommation de l'eau du robinet par les Nunavimmiut (Garcia-Sanchez, 2022).





## 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.

- Documenter et modéliser les interrelations clés des systèmes hydriques nordiques soumis aux pressions climatiques, géosystémiques et sociétales  
Chercheur principal : René Therrien (Dép. de géologie et de génie géologique)
- Élucider les interactions microbiote-hôte présentes dans les maladies cardiométaboliques et mentales à l'aide de capteurs optiques multimodaux novateurs  
Chercheurs principaux : Denis Boudreau (Dép. de chimie), André Marette (Dép. de médecine)
- Investigation optogénétique de l'influence du microbiote sur le développement du cerveau et l'épigénétique  
Chercheurs principaux : Paul De Koninck (Dép. de biochimie, de microbiologie et de bio-informatique), Sylvain Moineau (Dép. de biochimie, de microbiologie et de bio-informatique)

- Le microbiome intestinal : sentinelle de l'environnement nordique et de la santé mentale des Inuits  
Chercheurs principaux : Richard Bélanger (Dép. de pédiatrie), Gina Muckle (École de psychologie)
- Recherche participative dirigée par des Inuits sur la production alimentaire et la nutrition dans l'Inuit Nunangat  
Chercheuses principales : Martine Dorais (Dép. de phytologie), Caroline Hervé (Dép. d'anthropologie)
- Systèmes d'alerte précoce pour la gestion et la surveillance de l'eau potable par l'analyse de données environnementales en ligne et en continu (NUNARISK)  
Chercheurs principaux : Manuel J. Rodriguez (École supérieure d'aménagement du territoire et de développement régional), Daniel Nadeau (Dép. de génie civil et de génie des eaux)
- Chaire de recherche en partenariat Sentinelle Nord en approches écosystémiques de la santé  
Titulaire : Mélanie Lemire (Dép. de médecine sociale et préventive)
- 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.

- **Sensor-in-fibre optical probes for molecules sensing in the gastro-intestinal tract of muridae models relevant to cardiometabolic diseases**  
Victor Azzi (bourse de maîtrise)
- **Évaluation de la qualité de l'eau potable de la source au robinet au Nunavik**  
Cristian Ruben Garcia Sanchez (bourse de maîtrise)
- **Impact de la modulation du microbiote sur l'excrétion de polluants organiques persistants lors d'une perte de poids**  
Béatrice Choi (bourse de doctorat)
- **Synthèse de nanosondes luminescentes dans l'étude *in vivo* de marqueurs du microbiote intestinal**  
Nicolas Fontaine (bourse de doctorat)
- **The association between per and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and metabolic outcomes among Nunavimmiut adults**  
Amira Aker (stage postdoctoral)
- **Déterminants de la santé cardiométabolique et des habitudes alimentaires des Inuit du Nunavik en 2017**  
Janie Allaire (stage postdoctoral)
- **Approvisionnement en eau potable dans les communautés autochtones en région arctique : suivi et évaluation des risques sanitaires**  
Alexandra Cassivi (stage postdoctoral)
- **Utilisation des phages virulents pour contrôler le microbiote du poisson-zèbre**  
Jeffrey Cornuault (stage postdoctoral)

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

• **Unité Mixte Internationale de recherche chimique et biomoléculaire du microbiome et ses impacts sur la santé métabolique et la nutrition**

Directeur : Vincenzo Di Marzo (Dép. de médecine)  
Conseil national de la recherche, Italie  
Associée à la CERC sur l'axe microbiome-endocannabinoïdome dans la santé métabolique



Consiglio Nazionale  
delle Ricerche



## 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.

- **Des systèmes alimentaires ruraux durables et résistants pour les générations futures de Nunavimmiut : promouvoir la sécurité alimentaire tout en s'adaptant aux environnements nordiques en changement**

Chercheurs principaux : Frédéric Maps (Dép. de biologie), Tiff-Annie Kenny (Dép. de médecine sociale et préventive)

- **Développement d'une infrastructure municipale résiliente de traitement des eaux usées visant la réutilisation de l'eau au Nunavik (Québec)**

Chercheuse principale : Céline Vaneeckhaute (Dép. de génie chimique)

- **Élucider les liens entre l'environnement marin et les qualités nutritives du béluga et des bivalves à Quaqtq**

Chercheurs principaux : Mélanie Lemire (Dép. de médecine sociale et préventive), Jean-Éric Tremblay (Dép. de biologie)

*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'Institut nordique du Québec*

- **Interactions entre l'environnement nordique et les chronobiotiques : impact sur la santé cardiométabolique et neurométabolique**

Chercheurs principaux : Alexandre Caron (Fac. de pharmacie), Andréanne Michaud (École de nutrition)

- **L'axe exposome-microbiote-cerveau sous le microscope pour aborder les interactions environnement-santé dans le Nord**

Chercheurs principaux : Paul De Koninck (Dép. de biochimie, de microbiologie et de bio-informatique), Pierre Ayotte (Dép. de médecine sociale et préventive)

- **Recherche participative dirigée par des Inuits sur la production alimentaire et la nutrition dans l'Inuit Nunangat**

Chercheuses principales : Martine Dorais (Dép. de phytologie), Caroline Hervé (Dép. d'anthropologie)

- **Système d'alerte précoce pour la gestion et la surveillance de l'eau potable par l'analyse de données environnementales en ligne et en continu (NUNARISK)**

Chercheurs principaux : Manuel J. Rodriguez (École supérieure d'aménagement du territoire et de développement régional), Daniel Nadeau (Dép. de génie civil et de génie des eaux)

- **Tininnimiutait : évaluer le potentiel des aliments marins locaux accessibles depuis le littoral pour accroître la sécurité alimentaire et la souveraineté au Nunavik**

Chercheurs principaux : Lucie Beaulieu (Dép. des sciences des aliments), Ladd Johnson (Dép. de biologie)

- **Zoom extrême sur la perméabilité intestinale et le régime alimentaire occidental : élucider le rôle des antigènes alimentaires sur la prévalence des maladies cardiométaboliques et mentales dans le Nord**

Chercheurs principaux : Flavie Lavoie-Cardinal (Dép. de psychiatrie et de neurosciences), Denis Boudreau (Dép. de chimie)

- **Chaire de recherche en partenariat Sentinelle Nord en approches écosystémiques de la santé**

Titulaire : Mélanie Lemire (Dép. de médecine sociale et préventive)






- **Chaire de recherche en partenariat avec Sentinelle Nord sur l'axe microbiote intestinal-système endocannabinoïde comme intégrateur d'influences environnementales extrêmes sur la bioénergétique**



Titulaire : Cristoforo Silvestri (Dép. de médecine)

- **Unité Mixte Internationale de recherche chimique et biomoléculaire du microbiome et ses impacts sur la santé métabolique et la nutrition**

Directeur : Vincenzo Di Marzo (Dép. de médecine)



- Publications issues de Sentinelle Nord
-  Garcia Sanchez, C. R. (2022). *Développement d'une démarche pour améliorer la désinfection secondaire et la qualité de l'eau potable au Nunavik : projet pilote à Kangiqsualujjuaq* [Mémoire de maîtrise, Université Laval]. Corpus UL. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/100943>
  -  Iannotti, F. A., et Di Marzo, V. (2021). The gut microbiome, endocannabinoids and metabolic disorders. *Journal of Endocrinology*, 248(2), r83-r97. <https://doi.org/10.1530/joe-20-0444>
  -  Kenny, T.-A., Little, M., Lemieux, T., Griffin, P. J., Wesche, S. D., Ota, Y., Batal, M., Chan, H. M., et Lemire, M. (2020). The retail food sector and indigenous peoples in high-income countries: A systematic scoping review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23), 8818. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238818>
  -  Lebrun, A., Fortin, H., Fontaine, N., Fillion, D., Barbier, O., et Boudreau, D. (2022). Pushing the limits of surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) with deep learning: Identification of multiple species with closely related molecular structures. *Applied Spectroscopy*, 76(5), 609-619. <https://doi.org/10.1177/00037028221077119>
  -  Manca, C., Boubertakh, B., Leblanc, N., Deschênes, T., Lacroix, S., Martin, C., Houde, A., Veilleux, A., Flamand, N., Muccioli, G. G., Raymond, F., Cani, P. D., Di Marzo, V., et Silvestri, C. (2020a). Germ-free mice exhibit profound gut microbiota-dependent alterations of intestinal endocannabinoidome signaling. *Journal of Lipid Research*, 61(1), 70-85. <https://doi.org/10.1194/jlr.RA119000424>
  - Manca, C., Shen, M., Boubertakh, B., Martin, C., Flamand, N., Silvestri, C., et Di Marzo, V. (2020b). Alterations of brain endocannabinoidome signaling in germ-free mice. *BBA - Molecular and Cell Biology of Lipids*, 1865(12), 158786. <https://doi.org/10.1016/j.bbalip.2020.158786>

- Publications issues de Sentinelle Nord
-  Morissette, A., Kropp, C., Songpadith, J.-P., Junges Moreira, R., Costa, J., Mariné-Casadó, R., Pilon, G., Varin, T. V., Dudonné, S., Boutekrabt, L., St-Pierre, P., Levy, E., Roy, D., Desjardins, Y., Raymond, F., Houde, V. P., et Marette, A. (2020). Blueberry proanthocyanidins and anthocyanins improve metabolic health through a gut microbiota-dependent mechanism in diet-induced obese mice. *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*, 318(6), 980. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00560.2019>
  - Rochefort, G., Provencher, V., Castonguay-Paradis, S., Perron, J., Lacroix, S., Martin, C., Flamand, N., Di Marzo, V., et Veilleux, A. (2021). Intuitive eating is associated with elevated levels of circulating omega-3-polyunsaturated fatty acid-derived endocannabinoidome mediators. *Appetite*, 156, 104973. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2020.104973>
  -  Rodríguez-Daza, M. C., Pulido-Mateos, E. C., Lupien-Meilleur, J., Guyonnet, D., Desjardins, Y., et Roy, D. (2021). Polyphenol-mediated gut microbiota modulation: Toward prebiotics and further. *Frontiers in Nutrition*, 8, 689456. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.689456>
  -  Roussel, C., Anunciação Braga Guebara, S., Plante, P.-L., Desjardins, Y., Di Marzo, V., et Silvestri, C. (2022). Short-term supplementation with  $\omega$ -3 polyunsaturated fatty acids modulates primarily mucolytic species from the gut luminal mucin niche in a human fermentation system. *Gut Microbes*, 14(1). <https://doi.org/10.1080/19490976.2022.2120344>
  -  Silvestri, C., Pagano, E., Lacroix, S., Venneri, T., Cristiano, C., Calignano, A., Parisi, O. A., Izzo, A. A., Di Marzo, V., et Borrelli, F. (2020). Fish oil, cannabidiol and the gut microbiota: An investigation in a murine model of colitis. *Frontiers in Pharmacology*, 11, 585096. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.585096>

Références  
externes

- Allaire, J., Ayotte, P., Lemire, M., et Levesque, B. (2021a). Cardiometabolic Health. Nunavik Inuit Health Survey 2017 Qanuilirpitaa? How are we now? Quebec: Nunavik Regional Board of Health and Social Services (NRBHSS) et Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). [https://nrbhss.ca/sites/default/files/health\\_surveys/Cardiometabolic\\_Health\\_fullreport\\_en.pdf](https://nrbhss.ca/sites/default/files/health_surveys/Cardiometabolic_Health_fullreport_en.pdf)
- Allaire, J., Johnson-Down, L., Little, M., Ayotte, P., et Lemire, M. (2021b). Country and Market Food Consumption and Nutritional Status. Nunavik Inuit Health Survey 2017 Qanuilirpitaa? How are we now? Quebec: Nunavik Regional Board of Health and Social Services (NRBHSS) et Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). [https://nrbhss.ca/sites/default/files/health\\_surveys/Country\\_Food\\_and\\_Market\\_Food\\_Consumption\\_and\\_Nutritional\\_Status\\_fullreport\\_en.pdf](https://nrbhss.ca/sites/default/files/health_surveys/Country_Food_and_Market_Food_Consumption_and_Nutritional_Status_fullreport_en.pdf)
- Bacon, S. L., Campbell, N. R. C., Raine, K. D., Tsuyuki, R. T., Khan, N. A., Arango, M., et Kaczorowski, J. (2019). Canada's new Healthy Eating Strategy: Implications for health care professionals and a call to action. *Canadian Pharmacists Journal: CPJ*, 152(3), 151. <https://doi.org/10.1177/1715163519834891>
- Egeland, G. M., Johnson-Down, L., Cao, Z. R., Sheikh, N., et Weiler, H. (2011). Food insecurity and nutrition transition combine to affect nutrient intakes in Canadian arctic communities. *The Journal of Nutrition*, 141(9), 1746–1753. <https://doi.org/10.3945/jn.111.139006>
- Furgal, C., Pirkle C., Lemire, M., Lucas, M., Martin R. (2021). Food Security. Nunavik Inuit Health Survey 2017 Qanuilirpitaa? How are we now? Quebec: Nunavik Regional Board of Health and Social Services (NRBHSS) et Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). [https://nrbhss.ca/sites/default/files/health\\_surveys/Food\\_Security\\_report\\_en.pdf](https://nrbhss.ca/sites/default/files/health_surveys/Food_Security_report_en.pdf)
- Gagné, D., Blanchet, R., Lauzière, J., Vaissière, É., Vézina, C., Ayotte, P., Déry S., et O'Brien, H. T. (2012). Traditional food consumption is associated with higher nutrient intakes in Inuit children attending childcare centres in Nunavik. *International Journal of Circumpolar Health*, 71(1). <https://doi.org/10.3402/ijch.v71i0.18401>

Références  
externes

- ITK. (2014). Social determinants of Inuit Health in Canada. Inuit Tapiriit Kanatami, Ottawa, Canada. [https://www.itk.ca/wp-content/uploads/2016/07/ITK\\_Social\\_Determinants\\_Report.pdf](https://www.itk.ca/wp-content/uploads/2016/07/ITK_Social_Determinants_Report.pdf)
- ITK. (2021). Inuit Nunangat Food Security Strategy. ITK, Ottawa. [https://www.itk.ca/wp-content/uploads/2021/07/ITK\\_Food-Security-Strategy-Report\\_English\\_PDF-Version.pdf](https://www.itk.ca/wp-content/uploads/2021/07/ITK_Food-Security-Strategy-Report_English_PDF-Version.pdf)
- Little, M., Hagar, H., Zivot, C., Dodd, W., Skinner, K., Kenny, T.-A., Caughey, A., Gaupholm, J., et Lemire, M. (2021). Drivers and health implications of the dietary transition among Inuit in the Canadian Arctic: A scoping review. *Public Health Nutrition*, 24(9), 2650–2668. <https://doi.org/10.1017/S1368980020002402>
- Lu, H.-C., et Mackie, K. (2016). An introduction to the endogenous cannabinoid system. *Biological Psychiatry*, 79(7), 516–525. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2015.07.028>
- Rutsch, A., Kantsjö, J.B., et Ronchi, F. (2020) The gut-brain axis: How microbiota and host inflammasome influence brain physiology and pathology. *Frontiers in Immunology*, 11, 604179. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.604179>
- Sohns, A., Ford, J., Robinson, B. E., et Adamowski, J. (2019). What conditions are associated with household water vulnerability in the Arctic? *Environmental Science et Policy*, 97, 95–105. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCL.2019.04.008>
- Valdes, A. M., Walter, J., Segal, E., et Spector, T. D. (2018). Role of the gut microbiota in nutrition and health. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, 361, 2179. <https://doi.org/10.1136/bmj.k2179>

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](#) (Rodriguez-Daza et coll., 2021; Abed et coll., 2022; Forte et coll., 2020; Aker et coll. 2022a)





**Rédaction de l'introduction**

Anna Vainshtein

**Recherche et rédaction des faits saillants scientifiques**

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 :

Jehane Abed, Denis Boudreau, Vincenzo Di Marzo, Charles-Félix Fournier-Côté, Stéphanie Guilherme, Tiff-Annie Kenny, Pierre Legagneux, Mélanie Lemire, Sylvain Moineau, Manuel Rodriguez et Cristoforo Silvestri.

Nous remercions également Tiff-Annie Kenny pour ses commentaires sur l'introduction et Natalia Poliakova pour la révision du chapitre.

**Crédits photographiques**

Shanna Baker, Hakai Magazine

Pierre Coupel

Paul De Koninck

Véronique Dubos

Pierre Dunningan

Marianne Falardeau

Acacia Johnson

Chantal Langlois

Florence Lapierre-Poulin

Claude Mathieu

Polar Knowledge Canada

Manuel Rodriguez

Image par wirestock sur Freepik

**Index**

123, 162

125

138

130, 162

129, 162

128

145, 162

143, 162

141

161

141, 143

146, 147, 148

131



CHAPITRE 5

# Bien-être: des neurosciences au logement durable





## Des neurosciences au logement durable: de nouvelles avancées sur la santé et le bien-être pour le Nord

### Introduction

Le bien-être et la santé mentale constituent les fondements essentiels qui permettent aux humains de s'épanouir, de réaliser leur potentiel, de contribuer à leurs collectivités et de demeurer résilients face au stress et à l'adversité. Cependant, selon l'Organisation mondiale de la Santé, environ 970 millions de personnes vivaient avec un trouble mental en 2019, ce qui en fait l'une des principales causes d'incapacité dans le monde (GBD 2019 Mental Disorders Collaborators, 2022; Lopez et Murray, 1998). Au Canada, il a été estimé que les troubles mentaux touchaient plus de 6,7 millions de personnes en 2011, soit un Canadien sur cinq (Smetanin et coll., 2011). Les problèmes de santé mentale sont particulièrement criants dans les régions arctiques et subarctiques, où les changements sociaux et culturels rapides ont une incidence sur le bien-être des populations autochtones (Young et coll., 2012; Lehti et coll., 2009). L'organisation

nationale représentative *Inuit Tapiriit Kanatami* a désigné le mieux-être comme priorité numéro un en matière de santé (Alianait Inuit-specific Mental Wellness Task Group, 2007), ce qui se reflète également dans les résultats de l'enquête de santé *Qanuilirpitaa? 2017* au Nunavik. Quatre Nunavimmiut sur dix ont déclaré éprouver des symptômes dépressifs cliniquement significatifs (Muckle et coll., 2020a), un niveau plus de deux fois plus élevé que la population canadienne générale (Statistique Canada, 2020). Pour s'attaquer à cette situation, il est nécessaire d'adopter une approche holistique et culturellement adaptée de la santé mentale, en reconnaissant que des facteurs socioéconomiques tel que le logement jouent un rôle déterminant à l'égard de la santé, y compris de la santé mentale et du bien-être (Alianait Inuit-specific Mental Wellness Task Group, 2007). L'amélioration de notre capacité de diagnostic et de traitement pour différentes populations fait également partie de cette approche, qui rassemble les connaissances de diverses disciplines afin de fournir une nouvelle compréhension des racines biologiques des problèmes de santé mentale, de nouvelles méthodes de détection précoce, et de nouveaux mécanismes environnementaux et biologiques qui peuvent être ciblés pour une intervention (Patel et coll., 2018).



Graduellement, nous élargissons notre compréhension des facteurs qui sous-tendent la dépression, notamment le stress chronique (van Praag, 2004) et les différences liées au sexe dans la prévalence, les symptômes et le traitement de la dépression. Par exemple, les femmes sont deux fois plus susceptibles que les hommes de recevoir un diagnostic de trouble dépressif majeur (Dudek et coll., 2021), une tendance qui reflète la plus grande détresse ressentie chez les femmes Nunavimmiut (Muckle et coll., 2020a; Kirmayer et Paul, 2007). Les antidépresseurs actuellement approuvés sont inefficaces pour 30 à 50% des patients de la population générale (C. Ménard, communication personnelle). Cependant, des avancées récentes sur les mécanismes moléculaires sous-jacents aux troubles de l'humeur (Bittar et coll., 2021; Mena et Labonté, 2019) et les interactions entre les systèmes neurovasculaires et neuroimmunitaires (Dudek et coll., 2020; Dion-Albert et coll., 2022a) pourraient mener vers des traitements novateurs et un diagnostic précoce. La recherche fondamentale sur la structure du cerveau (Allard et Serrano, 2020; Zheng et coll., 2020), la technologie optogénétique utilisant des modèles animaux (Gagnon-Turcotte et coll., 2020) et l'identification de biomarqueurs (Gagné et coll., 2020; Arsenault et coll., 2021) élargissent nos connaissances et ouvrent la voie à des progrès diagnostiques et thérapeutiques. Plus particulièrement, la mise au point de biomarqueurs capables de diagnostiquer des maladies à un stade précoce serait d'une importance capitale pour s'attaquer aux problèmes de santé mentale.

La complexité des facteurs environnementaux, socioculturels et physiologiques qui déterminent la santé mentale nécessite une « approche écosystémique » qui fait appel à de multiples acteurs communautaires pour favoriser le bien-être (Paquin et coll., 2020). Dans le cadre de cette compréhension holistique du

bien-être, l'accès au logement joue un rôle majeur. En 2016, plus de la moitié des Inuits vivant dans le Nord habitaient dans des logements surpeuplés (ITK, 2019), un problème qui semble être lié à la détresse psychologique dans les communautés nordiques (Pepin et coll., 2018; Perreault et coll., 2022). Non seulement les communautés nordiques manquent de logements, mais la qualité de ces derniers est également problématique. Étant donné que cette crise du logement se déroule dans un contexte nordique unique, les solutions nécessiteront la conception et la construction de logements adaptés à la culture et à l'environnement (Bayle, 2020; Vachon, 2020). Par exemple, la collaboration entre les architectes et les communautés a mené à l'élaboration d'outils de planification durable des villages du Nord. La « conception biophilique », qui vise à intégrer l'environnement bâti dans l'environnement naturel (Kellert et coll., 2011), semble également être une approche prometteuse pour répondre au besoin biologique et psychologique de lumière naturelle dans les régions subarctiques (Parsaee et coll., 2019, 2020, 2021).

Les liens entre le logement et la santé sont multiples et recoupent non seulement la santé mentale, mais aussi les maladies respiratoires et leurs facteurs de risque. Les enfants inuits sont touchés de façon disproportionnée par les infections respiratoires. Les causes des taux élevés de telles infections comprennent la pauvreté, le surpeuplement et les logements nécessitant des réparations majeures et une meilleure ventilation (Kovesi, 2012). Le tabagisme aggrave ces effets néfastes sur la santé respiratoire et concerne particulièrement les habitants du Nord, qui ont un taux de tabagisme plus élevé que la moyenne nationale (Bélangier et coll., 2020).

Le présent chapitre rassemble les résultats de recherche de Sentinelle Nord provenant d'un large éventail de disciplines qui contribuent à aborder les problèmes de santé mentale et le bien-être dans les communautés du Nord. Des neurosciences à l'architecture, ces perspectives interdisciplinaires visent à améliorer notre compréhension des problèmes de santé mentale, à identifier de nouveaux biomarqueurs pour un diagnostic et un traitement précoces, à encourager une approche écosystémique de la santé mentale, et à prévenir les problèmes de santé grâce à des mesures culturellement adaptées sur les déterminants de la santé, comme le logement.

#### 🔍 MOTS CLÉS:

Bien-être, Santé mentale, Neurosciences, Stress, Résilience, Planification du logement, Qualité de l'air, Déterminants de la santé, Recherche-action, Architecture nordique, Biophilie



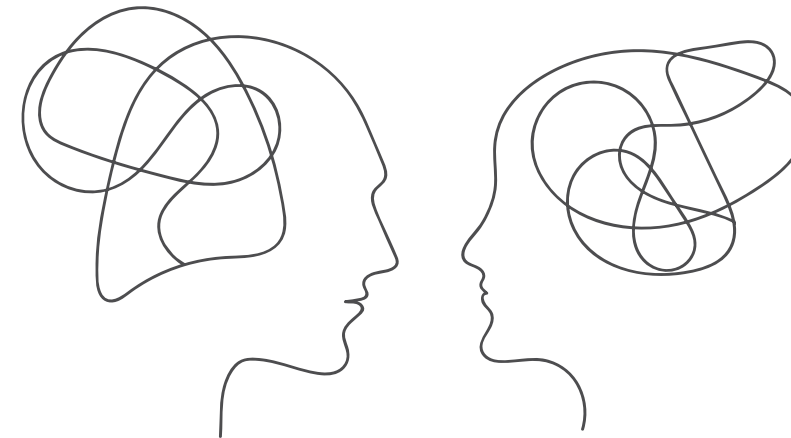


## 1. Les conséquences du stress sur la santé mentale

Sélection de faits saillants de la recherche

L'enquête de santé *Qanuilirpitaa ? 2017* révèle que la plupart des Inuits du Nunavik ont vécu des événements sociaux et historiques stressants pouvant avoir un impact négatif sur leur vie (Muckle et coll., 2020b). Ces événements peuvent être associés à du stress chronique, c'est-à-dire une exposition prolongée et répétée à une source de stress, qui peut mener à l'apparition ou la progression de problèmes de santé mentale. Afin d'améliorer l'efficacité des traitements proposés, il est essentiel d'acquérir une compréhension globale des effets du stress chronique, ainsi que des mécanismes moléculaires et fonctionnels qui sous-tendent son impact, tant chez les hommes que chez les femmes.

1.1 Le dimorphisme sexuel observé dans le trouble dépressif majeur semble provenir d'altérations moléculaires spécifiques au sexe affectant les voies fonctionnelles qui permettent de faire face au stress quotidien. Des changements transcriptionnels associés aux altérations épigénétiques ont été observés dans les cerveaux d'hommes et de femmes souffrant de dépression. Des changements similaires ont également été décrits chez des modèles animaux ayant des comportements de type dépressif induits par le stress ([Mena et Labonté, 2019](#)).



1.2 Chez les souris, les comportements dépressifs survenant à la suite d'une exposition prolongée au stress seraient causés par des altérations des interactions moléculaires au sein du circuit dopaminergique. Ce circuit régule la plasticité des voies mésocorticale et mésolimbique. Des différences de mécanismes moléculaires ont été observées entre les sexes opposés chez les animaux, ce qui pourrait expliquer les différences cliniques notées chez les hommes et les femmes ([Quessy et coll., 2021](#)).

1.3 Le cortex préfrontal médian est une région du cerveau impliquée dans les réponses au stress. Les comportements dépressifs induits par une exposition chronique au stress chez les souris mâles et femelles résultent de changements spécifiques des voies contrôlant les propriétés morphologiques et synaptiques de l'activité transcriptionnelle au cortex préfrontal. La nature de ces changements diffère entre les mâles et les femelles ([Bittar et coll., 2021](#)).

1.4 Certains mécanismes liés à l'inflammation pourraient favoriser la perte d'intégrité de la barrière hémato-encéphalique impliquée dans différents troubles mentaux, notamment le trouble dépressif majeur, la schizophrénie et les troubles bipolaires. De plus, les hormones sexuelles modulent l'intégrité neurovasculaire en régulant l'inflammation neuronale et en affectant directement les fonctions des astrocytes et des cellules endothéliales. Les altérations du flux sanguin cérébral et des voies transcriptionnelles spécifiques au sexe pourraient être la clé pour découvrir de nouveaux marqueurs des troubles mentaux ainsi que des outils de diagnostic prometteurs ([Dion-Albert et coll., 2022a](#)).



## 2. Comprendre la résilience au stress

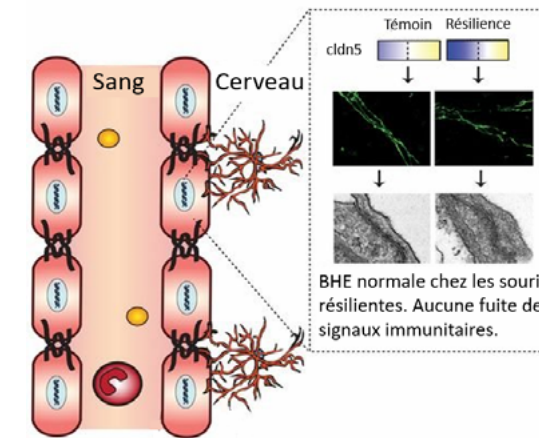
Sélection de faits saillants  
de la recherche

À la suite de l'expérience d'un stress chronique ou d'un traumatisme, certaines personnes ne développent pas de changements physiques, psychologiques ou comportementaux; elles demeurent résilientes face à l'adversité. La résilience est ainsi définie comme la capacité de résister ou de récupérer rapidement face à des conditions difficiles (Smith et coll., 2008).

2.1 La barrière hémato-encéphalique (BHE) constitue l'ultime frontière entre le cerveau et les toxines nocives ou les signaux inflammatoires circulant dans le sang. Le stress chronique altère l'intégrité de cette barrière, ce qui peut mener à des comportements dépressifs. Des changements moléculaires dans la BHE associés à la résilience au stress ont été identifiés et pourraient jouer un rôle protecteur pour le système neurovasculaire (Figure 2.1). Ces résultats soulignent l'importance d'étudier les pathologies neurovasculaires induites par le stress pour identifier de nouvelles cibles thérapeutiques afin de traiter les troubles de l'humeur et favoriser la résilience (Dudek et coll., 2020).

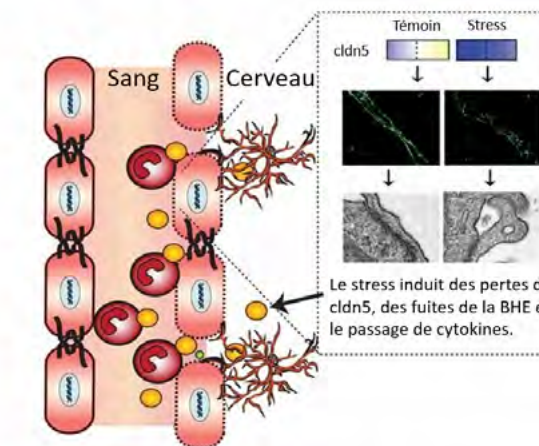
2.2 Les changements épigénétiques tels que l'acétylation, la méthylation des histones, ou la méthylation de l'ADN interviennent dans la réponse au stress. La modification épigénétique des gènes impliqués dans la plasticité synaptique, les systèmes endocrinien, immunitaire et vasculaire sont liés à la résilience. L'identification des changements épigénétiques centraux et périphériques favorisant la résilience au stress représente de nouvelles cibles prometteuses dans le développement de la médecine préventive et personnalisée (Dudek et coll., 2021).

### Résilience au stress chronique



Comportement social et  
d'adaptation au stress normal

### Susceptibilité au stress



Comportements de  
type dépressif

Figure 2.1  
Claudine 5 (cldn5) est une protéine responsable des jonctions serrées de la barrière hémato-encéphalique (BHE). La régulation épigénétique permissive de la claudine 5 est associée au maintien de l'intégrité de la BHE et à la résistance au stress, tandis que l'absence d'adaptations moléculaires endothéliales et l'inflammation entraînent la perte de la claudine 5, des fuites dans la BHE et des comportements de type dépressif. Figure tirée de Dudek et coll., 2020, un article sous licence CC BY 4.0.



### 3. Vers un diagnostic précoce des principales maladies psychiatriques

Sélection de faits saillants de la recherche

Le trouble dépressif majeur est la conséquence la plus commune du stress chronique et une importante cause d'invalidité dans le monde (Vos et coll., 2020). Toutefois, le diagnostic de la dépression n'est effectué que sur la base de symptômes auto-rapportés. Il est important de concevoir des biomarqueurs fiables afin d'identifier les individus à risque de développer la maladie et d'assurer une prise en charge plus rapide, efficace et adaptée.

3.1 Le stress chronique altère la barrière hémato-encéphalique (BHE) à différents endroits selon le sexe. Chez la souris femelle, le stress altère la BHE du cortex préfrontal (Figure 3.1), ce qui induit de l'anxiété et des comportements dépressifs. Ces femelles ont présenté des changements de taux de sélectine E soluble en cas de stress chronique. Chez l'être humain, les mêmes changements de taux de sélectine E soluble, d'expression des gènes de la BHE et de morphologie ont été observés dans le sérum sanguin et les échantillons de cerveau post-mortem de femmes ayant reçu un diagnostic de trouble dépressif majeur. La sélectine E soluble en circulation pourrait donc constituer un biomarqueur d'intérêt pour le diagnostic de la dépression majeure chez les femmes (Dion-Albert et coll., 2022b).

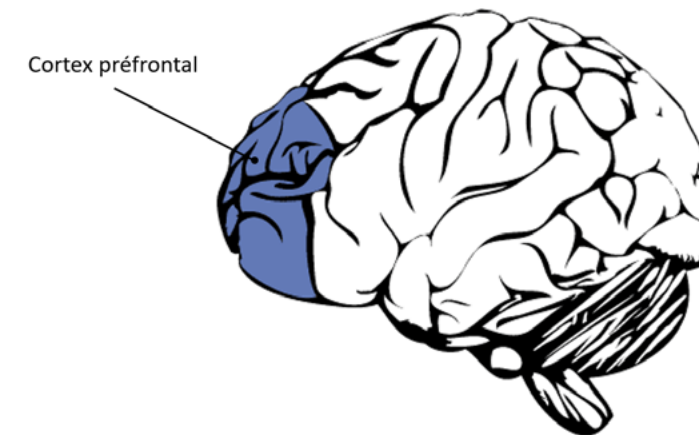


Figure 3.1  
Cortex préfrontal du cerveau. Figure modifiée de Erik Lundström, sous licence CC BY-SA 3.0.

3.2 La rétine peut être utilisée pour déceler les désordres psychiatriques puisqu'elle fait partie du système nerveux central et que les deux partagent la même origine embryonnaire. L'électrorétinogramme (ERG) est un signal généré par la rétine en réponse à un flash lumineux et représente une approche non invasive et fiable. Chez les modèles murins, l'ERG a prédit avec une efficacité pouvant atteindre 71% (Figure 3.2) l'expression de la susceptibilité et de la résilience avant l'exposition à un stress chez les mâles et les femelles (Arsenault et coll., 2021).

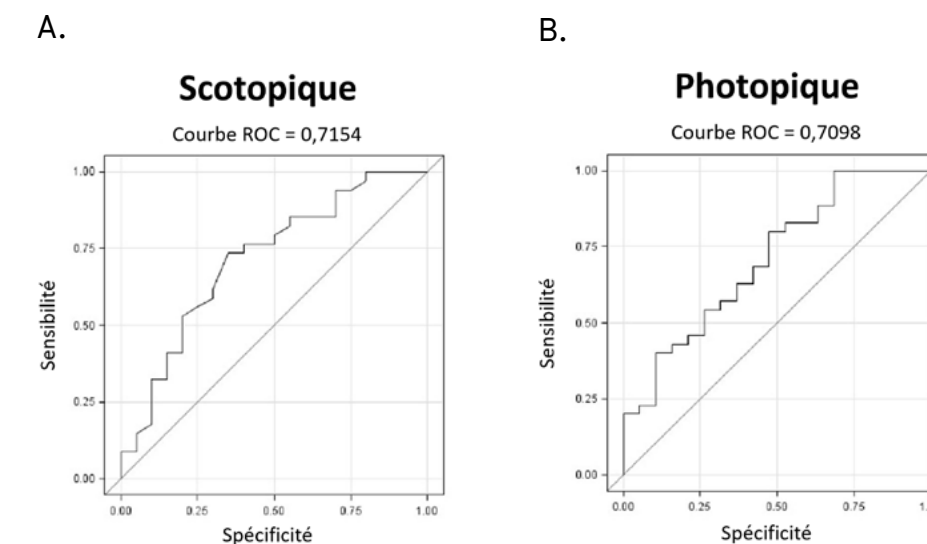


Figure 3.2  
L'électrorétinogramme peut prédire l'expression de la sensibilité au stress et de la résilience chez les souris. (A) Le modèle scotopique (associé aux bâtonnets) a une fonction d'efficacité du récepteur (courbe ROC) de 0,7154 ( $p < 0,05$ ) et (B) le modèle photopique (associé aux cônes) a une courbe ROC de 0,7098 ( $p < 0,05$ ). Figure tirée de Arsenault et coll., 2021, un article sous licence CC BY 4.0.



3.3 Les enfants présentant un haut risque génétique de développer une schizophrénie, un trouble bipolaire ou un trouble dépressif majeur ont montré une réponse anormale des cônes et des bâtonnets lors de l'électrorétinogramme (ERG), à l'instar de ce qui a été rapporté chez des patients adultes atteints de ces maladies. Ces résultats suggèrent que certaines caractéristiques de l'ERG en tant qu'endophénotype de risque pourraient faire partie de la définition d'un syndrome de risque infantile (Gagné et coll., 2020).

3.4 Des données préliminaires ont révélé que les enfants à risque de développer l'une des grandes maladies psychiatriques montrent des difficultés en ce qui concerne le transfert intermodal, c'est-à-dire le transfert de l'information sensorielle obtenue par un sens vers un autre sens. Chez ces mêmes enfants, des difficultés d'intégration multisensorielle et de traitement émotionnel corporel ont également été observées. Les travaux devront se poursuivre pour déterminer si ces résultats peuvent mener à l'identification de nouveaux biomarqueurs de risque ou endophénotypes (P. Marquet, communication personnelle).

3.5 L'analyse fine des fibroblastes de patients atteints d'un trouble bipolaire a permis l'identification d'un biomarqueur cellulaire spécifique prometteur qui pourrait servir d'aide au diagnostic précoce. Ces observations ont été réalisées à l'aide de la microscopie de phase quantitative basée sur la microscopie holographique numérique, une technique non invasive. Les études de validation d'un test diagnostique compagnon en vue de sa commercialisation sont en cours (P. Marquet, communication personnelle).





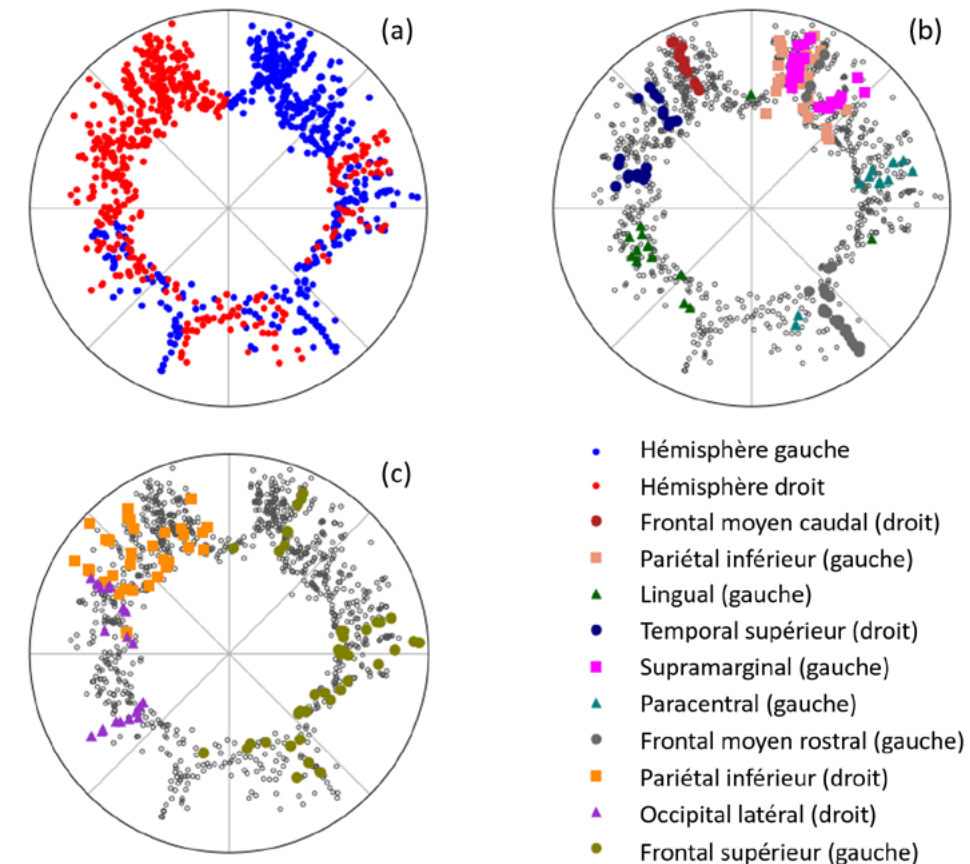
#### 4. Des outils pour une meilleure compréhension du cerveau

Sélection de faits saillants de la recherche

Pour mieux comprendre le fonctionnement du cerveau, plusieurs approches sont élaborées. Que ce soit par l'optimisation du modèle animal du poisson-zèbre, l'utilisation de l'optogénétique ou encore la science des réseaux, les connaissances évoluent pour permettre d'éventuelles nouvelles approches thérapeutiques.

4.1 Pour comprendre comment certaines expositions d'un individu au cours du développement embryonnaire affectent la santé mentale, des équipes de recherche ont utilisé le modèle animal du poisson-zèbre. Sa transparence à l'état larvaire permet d'observer, à l'aide de technologie neurophotonique et optogénétique de pointe, l'activité de tous les neurones du cerveau du poisson. Ce modèle permettra ainsi d'étudier les effets de facteurs environnementaux sur des processus fondamentaux du fonctionnement du cerveau, tels que l'intégration sensorielle, le comportement et l'apprentissage (P. De Koninck, communication personnelle).

4.2 Un système optogénétique multicanal capable de fonctionner en boucle fermée a été conçu pour suivre l'activité neurale de souris. Ce système fonctionne avec l'optogénétique, une technologie qui permet d'utiliser la lumière pour activer sélectivement les neurones d'animaux génétiquement modifiés pour en observer l'effet sur de grands réseaux biologiques. Ces travaux permettent d'accélérer le développement de nouvelles approches thérapeutiques pour contrer les maladies du cerveau (Gagnon-Turcotte et coll., 2020).



4.3 Des modèles de réseaux plongés dans des espaces hyperboliques ont permis de représenter de façon quasi parfaite la structure du connectome, soit l'ensemble des connexions neuronales (Figure 4.3). Ainsi les connectomes humains, mais aussi ceux de diverses espèces ont été représentés. Ces travaux offrent une nouvelle perspective pour cartographier l'organisation de diverses régions du cerveau (Allard et Serrano, 2020).

4.4 Un semi-groupe de renormalisation défini sur des réseaux plongés dans un espace hyperbolique a permis de reproduire les propriétés à multi-échelles des connectomes humains. Les résultats soutiennent que les mêmes principes régissent la connectivité cérébrale à différentes échelles et conduisent à une décentralisation efficace. Les retombées de ces travaux permettent le développement d'outils pour simplifier la reconstruction numérique et la simulation du cerveau (Zheng et coll., 2020).

Figure 4.3

(a) Carte hyperbolique obtenue pour le connectome Human5. Les nœuds appartenant aux deux hémisphères sont représentés en bleu et en rouge. (b) et (c) Un échantillon de régions neuroanatomiques représentatives est superposé aux positions déduites des nœuds représentés en (a). La plupart des régions neuroanatomiques de Human5 sont localisées dans des régions étroites de l'espace de similarité du disque hyperbolique. Figure modifiée de Allard et Serrano, 2020, un article sous licence CC BY 4.0.



## 5. Développer une approche écosystémique de la santé mentale

Sélection de faits saillants de la recherche

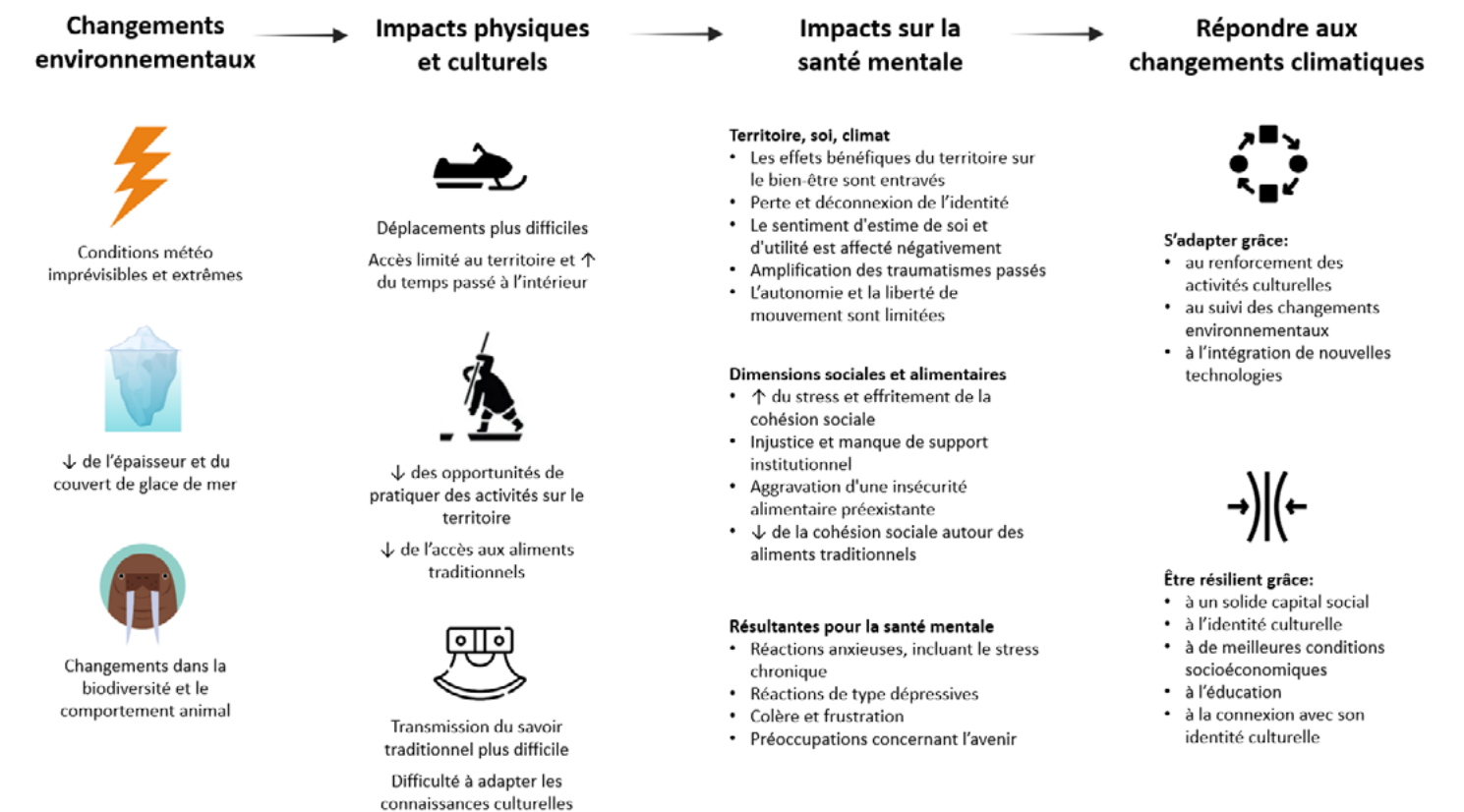
La santé mentale et le bien-être nécessitent une vision holistique et une approche globale, en vertu de laquelle les communautés et les organisations travaillent ensemble pour faire face à ces enjeux. Plusieurs déterminants de la santé, notamment des facteurs socioculturels et environnementaux, influencent la santé mentale et doivent être pris en compte dans cette approche, en particulier dans les communautés nordiques.

5.1 Une approche écosystémique permet de tenir compte des interactions entre les facteurs socioculturels, écologiques et biologiques de la santé. Les risques de développer la schizophrénie étant multifactoriels et interdépendants, une approche écosystémique qui intègre les différents savoirs et implique les communautés concernées est nécessaire (Paquin et coll., 2020).

5.2 Une équipe de recherche a analysé l'association entre différents facteurs socioculturels et la santé mentale chez les Inuits du Nunavik. Les résultats ont montré qu'une cohésion familiale plus forte et la pratique régulière de la chasse et de la pêche étaient associées à des scores de dépressions plus faibles. Ces facteurs socioculturels méritent donc davantage d'attention dans le cadre de programmes de prévention et de promotion de la santé mentale chez les Inuits (Poliakova et coll., 2022).

5.3 Le bien-être et la santé mentale des communautés autochtones nordiques sont étroitement liés au territoire. Or, l'importance des changements climatiques dans les régions arctiques et subarctiques limite l'accès au territoire et affecte les moyens de subsistance. Les changements liés à la perte d'identité et de culture, l'insécurité alimentaire, le stress, les conflits interpersonnels et les problèmes de logement engendrent également des effets sur la santé mentale (Figure 5.3). Les cliniciens et cliniciennes en santé peuvent jouer un rôle dans la reconnaissance et le soutien des personnes affectées par ces enjeux (Lebel et coll., 2022).

Figure 5.3  
Impacts des changements environnementaux sur la santé mentale dans le Nord circumpolaire. Figure modifiée de Lebel et al., 2022, un article sous licence CC BY 4.0. Figure produite avec BioRender.



5.4 Un nouveau modèle combinant des facteurs de risque génétiques et socioéconomiques permet d'améliorer les prédictions du développement de troubles psychiatriques, comme la schizophrénie et les troubles bipolaires. Les résultats indiquent notamment qu'une augmentation de l'indice de Blishen (indice mesurant le statut socioéconomique) de 1 unité est associée à une réduction du risque de développer ces mêmes troubles ([Bahda, 2022](#)).

#### Une approche plus inclusive pour la recherche sur le cerveau

Des chercheurs et chercheuses en neurosciences de Sentinelle Nord se sont engagés dans une approche multiculturelle avec les communautés autochtones, dans le cadre de la Stratégie canadienne de recherche sur le cerveau. Le but de cette initiative est de poursuivre les recherches sur le système nerveux central de manière à mieux refléter la diversité de la population canadienne. Les recherches pourront intégrer les savoirs autochtones et ainsi mieux répondre aux besoins de ces populations ([Perreault et coll., 2023](#)).





## 6. Revoir la planification et la création du logement pour le bien-être des populations nordiques

Sélection de faits saillants de la recherche

L'accès à un logement durable et adapté à la culture favorise une meilleure santé physique et mentale. Il est nécessaire de travailler en collaboration avec les communautés locales et de renforcer leurs capacités afin de développer et faciliter l'accès à de tels logements.

6.1 Un outil d'aide à la décision a été élaboré afin de soutenir la planification durable et résiliente des villages du Nunavik. Avec une approche multidisciplinaire et en collaboration avec la communauté de Kangiqsualujjuaq, le projet a déterminé des principes d'aménagement durable adaptés aux aspirations locales des Inuits. Un des principes consiste à contribuer au bien-être des communautés, notamment en visant un environnement bâti favorable à la santé physique et psychologique. L'outil est accessible en ligne : [Pinasuqatigiitsuta.org](http://Pinasuqatigiitsuta.org).

6.2 La complexité des processus relatifs à la production de logements au Nunavik encourage une logique basée sur le fait «de construire» et sur la rationalité technique plutôt que sur une perspective considérant le fait «d'habiter» le Nord, incluant les considérations sociales, culturelles et symboliques. Lier et intégrer les façons de construire et d'habiter les bâtiments en travaillant de concert avec les acteurs locaux pourrait permettre de créer des logements mieux ancrés dans les réalités, les aspirations et les façons d'habiter des communautés inuit ([Vachon, 2020](#)).

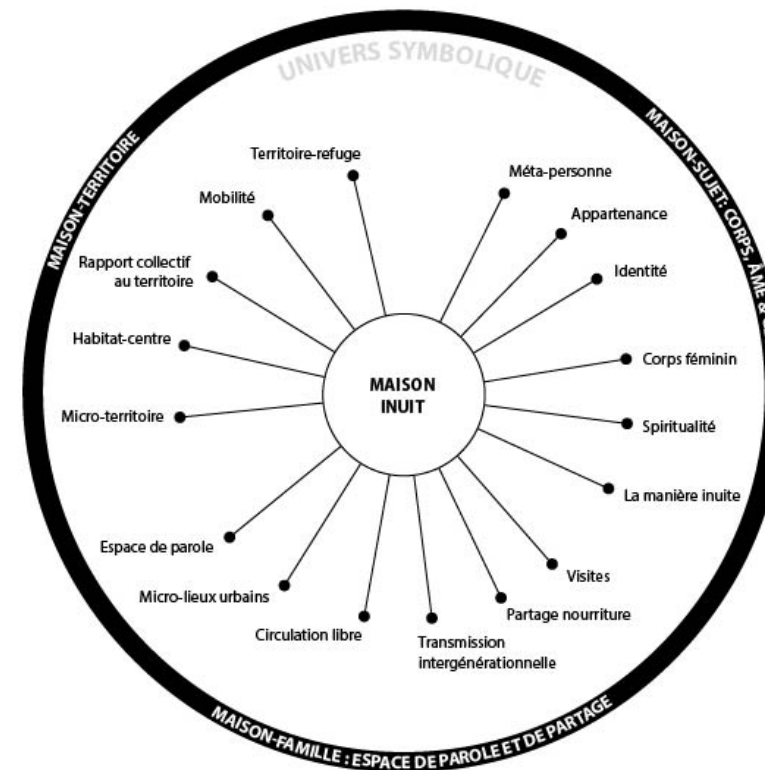


Figure 6.3

La définition de la maison est présentée selon trois grands thèmes qui sont les plus présents dans la littérature étudiée : 1) la maison-territoire (harmonie entre le lieu et le chez-soi); 2) la maison-sujet (un corps protecteur des gestes et des corps); et 3) la maison-famille (l'espace social et l'espace de parole). Traduction libre.

© Myrtille Bayle

6.3 Une revue de littérature a permis de mieux comprendre la signification de la maison dans une perspective inuite. La maison symbolique inuit se définit ainsi comme un corps protecteur, un espace de refuge et un lieu de support à la transmission de la culture (Figure 6.3). Pour que l'environnement bâti reflète les préoccupations et la vision du monde inuit, il est important de favoriser l'intégration de l'habitant inuit dans la création de son logement ([Bayle, 2020](#)).

### Une nécessaire évaluation des pratiques dans la recherche partenariale en contexte autochtone

Une modélisation conceptuelle de la recherche collaborative a permis de révéler les acteurs impliqués et d'identifier les facteurs qui déterminent l'authenticité des partenariats de recherche entre universités et communautés autochtones. Les facteurs incluent notamment la qualité de la relation entre les partenaires, le niveau de confiance envers les acteurs et les organisations qu'ils représentent, la durée du partenariat et un processus de médiation adéquat pour établir des buts et objectifs partagés. Ce modèle fournit une meilleure compréhension des processus qui déterminent le succès de la recherche avec les communautés autochtones ([Gouin, 2020](#)).

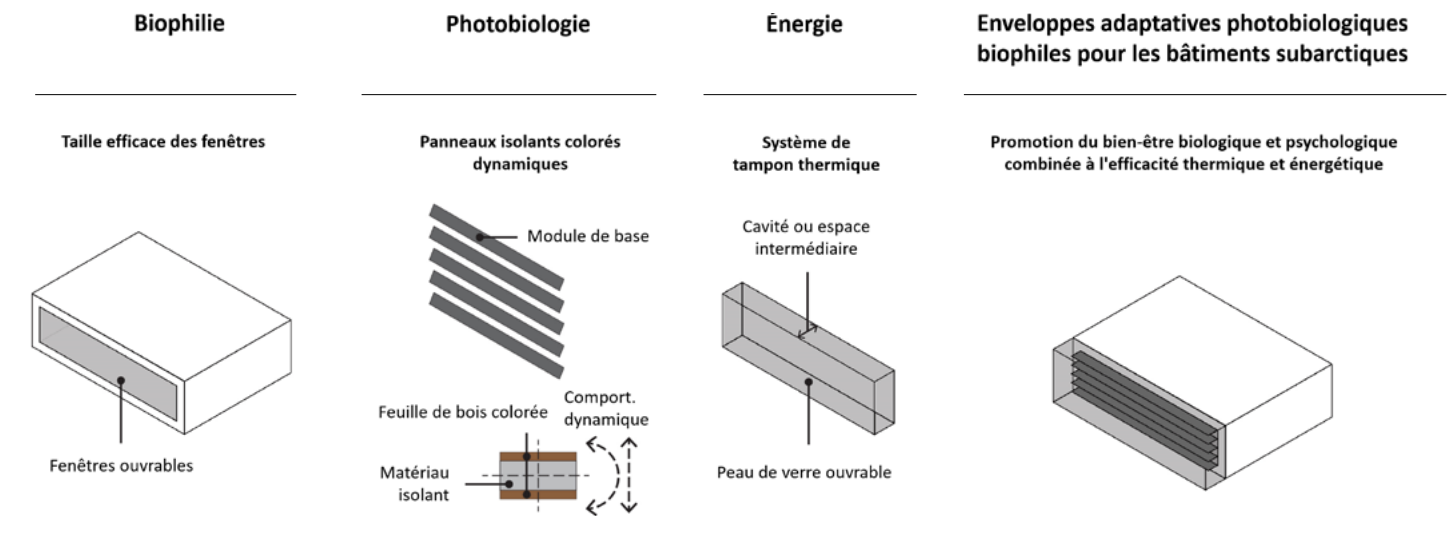


## 7. Une approche architecturale axée sur la nature pour le bien-être des habitants et habitantes

Sélection de faits saillants de la recherche

Avec une disponibilité limitée en lumière naturelle et une photopériode particulière, les régions arctiques et subarctiques présentent des défis pour la conception architecturale. L'approche biophilique vise notamment à intégrer la lumière naturelle dans les stratégies de conception architecturale pour améliorer la qualité et l'habitabilité des espaces intérieurs tout en augmentant leur relation avec l'extérieur. Cette approche, culturellement adaptée aux populations locales, peut ainsi contribuer à la santé et au bien-être des habitants et des habitantes.

7.1 Un outil numérique a été conçu pour permettre la visualisation des aspects qualitatifs et quantitatifs de la lumière en utilisant des images HDR (*High Dynamic Range*). Ces images créent des cartes de luminance, rendent avec précision la perception humaine et génèrent des cartes de dominance photopiques/mélanopiques. Les représentations spatiales qui en découlent permettent une communication améliorée entre les architectes et les autres acteurs du bâtiment et favorisent une meilleure intégration de la lumière du jour dans de futurs projets d'architecture (Lalande et coll., 2020).



7.2 Pour les habitants et les habitantes des territoires nordiques, la conception biophilique doit être adaptée aux climats extrêmement froids afin de répondre à leurs besoins. Un modèle fondamental d'enveloppes adaptatives multi-peau (Figure 7.2) basé sur les principaux indicateurs biophiliques et photobiologiques pour les bâtiments subarctiques a été élaboré afin de permettre des liens efficaces entre l'intérieur et l'extérieur (Parsaee et coll., 2019; Parsaee et coll., 2020; Parsaee et coll., 2021).

7.3 Une recherche-action menée par des professeurs en architecture et réalisée en partenariat avec la communauté d'Ikaluktutiak, au Nunavut, a permis d'intégrer des concepts bioclimatiques visant l'autonomie alimentaire et la santé des occupants, en tenant compte du savoir traditionnel. L'objectif était de concevoir des bâtiments à faible consommation énergétique en mesure de résister aux conditions climatiques rigoureuses de la région. Dans le cadre de cette recherche, plusieurs projets d'étudiants et d'étudiantes de maîtrise professionnelle ont été primés au concours de *The American Institute of Architects Committee on the Environment* (C. Demers, communication personnelle).

Figure 7.2  
Schéma du modèle d'enveloppe adaptative biophilique-photobiologique pour les bâtiments subarctiques, y compris les composants et configurations essentiels. Figure adaptée de Parsaee, 2021.



## 8. Le rôle de la ventilation pour la qualité de l'air intérieur des logements

Sélection  
de faits saillants  
de la recherche

Entre 2007 et 2012, le taux d'hospitalisation des enfants âgés de moins d'un an en raison de maladies du système respiratoire était presque 7 fois plus important au Nunavik comparativement à l'ensemble du Québec (NRHBSS et INSPQ, 2015). Plusieurs facteurs influencent la santé respiratoire, notamment la qualité de l'air intérieur et les systèmes de ventilation des logements.

8.1 Au Nunavik, des interventions réalisées sur les systèmes de ventilation ont mené à une diminution des infections respiratoires ainsi qu'à une amélioration de la qualité de l'air intérieur. Ces résultats suggèrent qu'une utilisation et un entretien adéquats des systèmes de ventilation résidentiels pourraient contribuer à réduire le nombre d'infections respiratoires chez les enfants du Nunavik. Toutefois, la santé respiratoire des enfants est le résultat d'une combinaison de multiples facteurs. Ainsi, le travail concerté entre les autorités locales de santé et du logement est essentiel pour réduire les inégalités en matière de santé affectant les communautés du Nord ([Poulin et coll., 2022](#)).

8.2 Les effets de trois systèmes de ventilation différents et de leur optimisation sur les communautés microbiennes dans les bioaérosols et les poussières ont été étudiés dans 54 logements récemment construits ou rénovés au Nunavik. Le type de ventilation et son optimisation n'avaient aucune incidence sur les communautés microbiennes, qui étaient probablement plus touchées par les activités humaines, principale source d'émission de particules biologiques dans le cadre de l'étude ([Degois et coll., 2021](#)).



## 9. Un environnement intérieur sans fumée pour la santé des habitants et des habitantes

Sélection  
de faits saillants  
de la recherche

Le tabagisme et l'exposition à la fumée secondaire sont prévalents au Nunavik. L'enquête de santé *Qanuilirpitaa? 2017* a révélé qu'une proportion importante des Nunavimmiuts âgés de 16 ans et plus fument (Bélanger et coll., 2020). Il est important de faire face à cet enjeu de santé publique.

9.1 Les niveaux de benzène, de toluène et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) se sont révélés significativement supérieurs chez les adultes inuits comparativement aux adultes du reste du Canada ou des États-Unis. Les résultats suggèrent que la haute prévalence du tabagisme au Nunavik constitue une source importante d'exposition au benzène et aux HAP. Cela renforce l'importance des efforts régionaux déployés pour réduire le tabagisme et encourager un environnement intérieur sans fumée dans les maisons du Nunavik. Des investigations devraient également être menées pour déterminer d'autres sources possibles d'exposition ([Caron-Beaudoin et coll., 2022](#)).

9.2 Des travaux ont démontré que lors d'une exposition à la fumée de cigarette, l'inflammation est marquée par une infiltration rapide et soutenue des neutrophiles IL-1 $\alpha$ , ainsi que par la libération et l'altération de l'homéostasie du surfactant pulmonaire. Des résultats ont montré que les neutrophiles jouent un rôle crucial dans le maintien de l'homéostasie pulmonaire lors de l'exposition aiguë à la fumée de cigarette ([Milad et coll., 2021](#)).

9.3 Les vapeurs de cigarettes électroniques, sans nicotine ni saveur, peuvent être nocives et influencer la réaction des poumons à l'exposition à la fumée de cigarette de tabac chez les utilisateurs doubles, modifiant potentiellement l'évolution pathologique du tabagisme. Cette double exposition mène à une augmentation de la résistance des voies respiratoires ([Lechasseur et coll., 2020](#)).



## 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.

- **Cultures de la lumière nordique: optimisation de la biophilie en climat extrême par l'architecture**  
Chercheurs principaux: Claude Demers (École d'architecture), Marc Hébert (Dép. d'ophtalmologie et d'oto-rhino-laryngologie – chirurgie cervico-faciale)
- **Développement, implantation et utilisation de technologies portables miniatures pour la prévention, l'évaluation et le traitement de maladies chroniques en région nordique**  
Chercheur principal: Laurent Bouyer (Dép. de réadaptation)
- **Faire les choses différemment: un atlas des meilleures pratiques pour des milieux de vie durables et culturellement adaptés au Nunavik**  
Chercheurs principaux: Geneviève Vachon (École d'architecture), Michel Allard (Dép. de géographie)

- **Impact des conditions environnementales sur le microbiote des voies respiratoires et la santé respiratoire dans le Nord**  
Chercheurs principaux: François Maltais (Dép. de médecine), Marc Ouellette (Dép. de microbiologie-infectiologie et d'immunologie)
- **Signatures biologiques des réponses au stress et potentialité d'un régime alimentaire enrichi en acides gras n-3 pour favoriser un état de santé mentale positif malgré l'adversité**  
Chercheuse principale: Caroline Ménard (Dép. de psychiatrie et de neurosciences)
- **Utilisation des microalgues diatomées pour améliorer le traitement des dysfonctionnements de l'horloge biologique liés à la lumière chez les habitants de l'Arctique**  
Chercheur principal: Johann Lavaud (Dép. de biologie)
- **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 en partenariat Sentinelle Nord en approches écosystémiques de la santé**  
Titulaire: Mélanie Lemire (Dép. de médecine sociale et préventive)
- **Chaire de recherche en partenariat Sentinelle Nord en économie et santé du cerveau**  
Titulaire: Maripier Isabelle (Dép. d'économique)
- **Chaire de recherche en partenariat Sentinelle Nord en neurobiologie moléculaire des troubles de l'humeur**  
Titulaire: Benoît Labonté (Dép. de psychiatrie et de neurosciences)
- **Chaire de recherche Sentinelle Nord sur la neurobiologie du stress et de la résilience**  
Titulaire: Caroline Ménard (Dép. de psychiatrie et de neurosciences)
- **Chaire de recherche sur les relations avec les sociétés Inuit**  
Titulaire: Caroline Hervé (Dép. d'anthropologie)

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.

- Repenser le rôle de l'habitant dans le logement social au Nunavik: vers une intégration des valeurs Inuit  
Myrtille Bayle (bourse de maîtrise)
- Effets d'une exposition prénatale et postnatale aux contaminants et nutriments issues d'une alimentation traditionnelle Inuit sur le développement cognitif d'enfant d'âge scolaire  
Mireille Desrochers-Couture (bourse doctorale)
- Les processus de réalisation des projets d'habitations au Nunavik: vers une conception inclusive des acteurs locaux  
Marika Vachon (bourse doctorale)
- Recherche partenariale en aménagement dans les milieux nordiques: évaluation des processus participatifs en contexte innu  
Élisa Gouin (bourse doctorale)
- Role of the endocannabinoid system in stress resilience and depression: A master regulator of neurovascular and gut health  
Katarzyna Anna Dudek (bourse de doctorat)
- Amélioration de la qualité de l'air intérieur dans les habitations du Nunavik: projet d'optimisation de la ventilation  
Jodelle Degois (stage postdoctoral)
- Role of blood-brain barrier transport in depression  
Fernanda Neutzling-Kaufmann (stage postdoctoral)

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

- **Unité mixte internationale de recherche en neuro-développement et psychiatrie de l'enfant**

Directeur: Pierre Marquet (Dép. de psychiatrie et de neurosciences)  
Université de Lausanne, Suisse  
Associée à la CERC en neurophotonique







## 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.

- **Design biophilique dans l'Arctique: co-crédation communautaire immersive pour concilier bien-être et performance énergétique dans l'architecture d'Ikaluktutiak**

Chercheurs principaux: Claude Demers (École d'architecture), Marc Hébert (Dép. d'ophtalmologie et d'oto-rhino-laryngologie – chirurgie cervico-faciale), Jean-François Lalonde (Dép. de génie électrique et de génie informatique)

- **Habitation et transition énergétique au Nunavik: mieux comprendre les enjeux humains, techniques et environnementaux**

Chercheur principal: Louis Gosselin (Dép. de génie mécanique)  
*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'Institut nordique du Québec*

- **L'axe exposome-microbiote-cerveau sous le microscope pour aborder les interactions environnement-santé dans le Nord**

Chercheurs principaux: Paul De Koninck (Dép. de biochimie, de microbiologie et de bio-informatique), Pierre Ayotte (Dép. de médecine sociale et préventive)

- **Signatures biologiques des réponses au stress et potentialité d'un régime alimentaire enrichi en acides gras n-3 pour favoriser un état de santé mentale positif malgré l'adversité**

Chercheuse principale: Caroline Ménard (Dép. de psychiatrie et de neurosciences)

- **Solutions technico-sociales pour étendre, de Whapmagoostui-Kuujjuarapik, l'utilisation des énergies renouvelables vers d'autres régions du Nunavik**

Chercheur principal: Jasmin Raymond (INRS)  
*Projet financé conjointement par Sentinelle Nord et l'Institut nordique du Québec*

- **Zoom extrême sur la perméabilité intestinale et le régime alimentaire occidental: élucider le rôle des antigènes alimentaires sur la prévalence des maladies cardiométaboliques et mentales dans le Nord**

Chercheurs principaux: Flavie Lavoie-Cardinal (Dép. de psychiatrie et de neurosciences), Denis Boudreau (Dép. de chimie)

- **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 en partenariat Sentinelle Nord en approches écosystémiques de la santé**

Titulaire: Mélanie Lemire (Dép. de médecine sociale et préventive)

- **Chaire de recherche en partenariat Sentinelle Nord en économie et santé du cerveau**

Titulaire: Maripier Isabelle (Dép. d'économique)

- **Chaire de recherche en partenariat Sentinelle Nord en neurobiologie moléculaire des troubles de l'humeur**

Titulaire: Benoît Labonté (Dép. de psychiatrie et de neurosciences)

- **Chaire de recherche en partenariat Sentinelle Nord en pharmacométabolisme du sommeil**

Titulaire: Natalie Jane Michael (Fac. de pharmacie)

- **Chaire de recherche Sentinelle Nord sur la neurobiologie du stress et de la résilience**

Titulaire: Caroline Ménard (Dép. de psychiatrie et de neurosciences)

- **Chaire de recherche sur les relations avec les sociétés Inuit**

Titulaire: Caroline Hervé (Dép. d'anthropologie)

- **Unité mixte internationale de recherche en neuro-développement et psychiatrie de l'enfant**

Directeur: Pierre Marquet (Dép. de psychiatrie et de neurosciences)

## Références

Publications  
issues de  
Sentinelle Nord

- Ⓢ Allard, A., et Serrano, M. Á. (2020). Navigable maps of structural brain networks across species. *PLoS Computational Biology*, 16(2), e1007584. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007584>
- Ⓢ Arsenault, E., Lavigne, A.-A., Mansouri, S., Gagné, A.-M., Francis, K., Bittar, T. P., Quessy, F., Abdallah, K., Barbeau, A., Hébert, M., et Labonté, B. (2021). Sex-specific retinal anomalies induced by chronic social defeat stress in mice. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 15(183), 714810. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2021.714810>
- Ⓢ Bahda, M. (2022). *Modèle prédictif des troubles psychiatriques en combinant scores de risque génétique et variables socio-économiques*. [Mémoire de maîtrise, Université Laval]. Corpus UL. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/73372>
- Ⓢ Bayle, M. (2020). Réflexions pour une architecture significative: Univers symbolique et matériel de la maison chez les Inuit du Nunavik (Note de recherche). *Études Inuit Studies*, 44(1-2), 161-182. <https://doi.org/10.7202/1081801ar>
- Bittar, T. P., Pelaez, M. C., Hernandez Silva, J. C., Quessy, F., Lavigne A.-A., Morency D., Blanchette L.-J., Arsenault, E., Cherasse, Y., Seigneur J., Timofeev, I., Sephton, C. F., Proulx, C. D., et Labonté, B. (2021). Chronic stress induces sex-specific functional and morphological alterations in corticoaccumbal and corticostriatal pathways. *Biological Psychiatry*, 90(3), 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2021.02.014>
- Ⓢ Caron-Beaudoin, É., Ayotte, P., Aker, A., Blanchette, C., Ricard, S., Gilbert, V., Avaré, E., et Lemire, M. (2022). Exposure to benzene, toluene and polycyclic aromatic hydrocarbons in Nunavimmiut aged 16 years and over (Nunavik, Canada) - Qanuilirpitaa 2017 survey. *Environmental Research*, 206, 112586. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112586>
- Degois, J., Veillette, M., Poulin, P., Lévesque, B., Aubin, D., Ouazia, B., Brisson, M., Maltais, F., et Duchaine, C. (2021). Indoor air quality assessment in dwellings with different ventilation strategies in Nunavik and impacts on bacterial and fungal microbiota. *Indoor Air*, 31(6), 2213-2225. <https://doi.org/10.1111/ina.12857>
- Ⓢ Dion-Albert, L., Bandeira Binder, L., Daigle, B., Hong-Minh, A., Lebel, M., et Menard, C. (2022a). Sex differences in the blood-brain barrier: Implications for mental health. *Frontiers in Neuroendocrinology*, 65, 100989. <https://doi.org/10.1016/j.yfrne.2022.100989>

Ⓢ Libre accès

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

Publications  
issues de  
Sentinelle Nord

- Ⓢ Dion-Albert, L., Cadoret, A., Doney, E., Kaufmann, F. N., Dudek, K. A., Daigle, B., Parise, L. F., Cathomas, F., Samba, N., Hudson, N., Lebel, M., Campbell, M., Turecki, G., Mechawar, N., et Menard, C. (2022b). Vascular and blood-brain barrier-related changes underlie stress responses and resilience in female mice and depression in human tissue. *Nature Communications*, 13(1), 164. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27604-x>
- Ⓢ Dudek, K. A., Dion-Albert, L., Lebel, M., LeClair, K., Labrecque, S., Tuck, E., Ferrer Perez, C., Golden, S. A., Tamminga, C., Turecki, G., Mechawar, N., Russo, S. J., et Menard, C. (2020). Molecular adaptations of the blood-brain barrier promote stress resilience vs. depression. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(6), 3326. <https://doi.org/10.1073/pnas.1914655117>
- Dudek, K. A., Neutzling Kaufmann, F., Lavoie, O., et Menard, C. (2021). Central and peripheral stress-induced epigenetic mechanisms of resilience. *Current Opinion in Psychiatry*, 34(1), 1-9. <https://doi.org/10.1097/ycp.0000000000000664>
- Gagné, A.-M., Moreau, I., St-Amour, I., Marquet, P., et Maziade, M. (2020). Retinal function anomalies in young offspring at genetic risk of schizophrenia and mood disorder: The meaning for the illness pathophysiology. *Schizophrenia Research*, 219, 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2019.06.021>
- Ⓢ Gagnon-Turcotte, G., Bilodeau, G., Tsiakaka, O., et Gosselin, B. (2020). Smart autonomous electro-optic platforms enabling innovative brain therapies. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 20(4), 28-46. <https://doi.org/10.1109/MCAS.2020.3027220>
- Gouin, E. (2021). Research partnerships in planning and architecture in Indigenous contexts: Theoretical premises for a necessary evaluation. *Journal of Community Practice*, 29(2), 133-152. <https://doi.org/10.1080/10705422.2021.1938769>
- Lalande, P., Demers, C. M. H., Lalonde, J.-F., Potvin, A., et Hébert, M. (2021). Spatial representations of melanopic light in architecture. *Architectural Science Review*, 64(6), 522-533. <https://doi.org/10.1080/00038628.2020.1785383>
- Ⓢ Lebel, L., Paquin, V., Kenny, T.-A., Fletcher, C., Nadeau, L., Chachamovich, E., et Lemire, M. (2022). Climate change and Indigenous mental health in the Circumpolar North: A systematic review to inform clinical practice. *Transcultural Psychiatry*, 59(3), 312-336. <https://doi.org/10.1177/13634615211066698>

- Publications issues de Sentinelle Nord
- Lechasseur, A., Huppé, C.-A., Talbot, M., Routhier, J., Aubin, S., Beaulieu, M.-J., Duchaine, C., Marsolais, D., et Morissette, M. C. (2020). Exposure to nicotine-free and flavor-free e-cigarette vapors modifies the pulmonary response to tobacco cigarette smoke in female mice. *American Journal of Physiology. Lung Cellular and Molecular Physiology*, 319(4), 727. <https://doi.org/10.1152/ajplung.00037.2020>
- Mena, F., et Labonté, B. (2019). Molecular programs underlying differences in the expression of mood disorders in males and females. *Brain Research*, 1719, 89-103. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2019.05.016>
- Milad, N., Pineault, M., Lechasseur, A., Routhier, J., Beaulieu, M.-J., Aubin, S., et Morissette, M. C. (2021). Neutrophils and il-1 $\alpha$  regulate surfactant homeostasis during cigarette smoking. *Journal of Immunology*, 206(8), 1923-1931. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.2001182>
- Paquin, V., Lemire, M., et King, S. (2020). Ecosystem approaches to the risk for schizophrenia. *Schizophrenia Research*, 220, 278-280. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2020.03.057>
- Parsaee, M., Demers, C. M. H., Hébert, M., Lalonde, J.-F., et Potvin, A. (2019). A photobiological approach to biophilic design in extreme climates. *Building and Environment*, 154, 211-226. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.027>
- Parsaee, M., Demers, C. M. H., Hébert, M., Lalonde, J.-F., et Potvin, A. (2020). Biophilic, photobiological and energy-efficient design framework of adaptive building facades for Northern Canada. *Indoor and Built Environment*, 30(5), 665-691. <https://doi.org/10.1177/1420326X20903082>
- Parsaee, M., Demers, C. M. H., Potvin, A., Lalonde, J.-F., Inanici, M., et Hébert, M. (2021). Biophilic photobiological adaptive envelopes for sub-Arctic buildings: Exploring impacts of window sizes and shading panels' color, reflectance, and configuration. *Solar Energy*, 220, 802-827. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.065>

- Publications issues de Sentinelle Nord
- Parsaee, M. (2021). *Biophilic and photobiological developments of adaptive high-performance building envelopes for Northern Canada*. [Thèse de doctorat, Université Laval]. Corpus UL. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/68405>
- Perreault, M. L., King, M., Gabel, C., Mushquash, C. J., De Koninck, Y., Lawson, A., Marra, C., Ménard, C., Young, J. Z., et Illes, J. (2023). An Indigenous lens on priorities for the Canadian Brain Research Strategy. *Canadian Journal of Neurological Sciences*, 50(1), 96-98. <https://doi.org/10.1017/cjn.2021.501>
- Poliakova, N., Riva, M., Fletcher, C., Desrochers-Couture, M., Courtemanche, Y., Moisan, C., Fraser, S., Pépin, C., Bélanger, R. E., et Muckle, G. (2022). Sociocultural factors in relation to mental health within the Inuit population of Nunavik. *Canadian Journal Public Health*. <https://doi.org/10.17269/s41997-022-00705-w>
- Poulin, P., Marchand, A., Lévesque, B., Dubé, M., Aubin, D., Ouazia, B., Duchaine, C., et Brisson, M. (2022). Impact of improved indoor air quality in Nunavik homes on children's respiratory health. *Indoor Air*, 32(2), 13009. <https://doi.org/10.1111/ina.13009>
- Quesy, F., Bittar, T., Blanchette, L. J., Lévesque, M., et Labonté, B. (2021). Stress-induced alterations of mesocortical and mesolimbic dopaminergic pathways. *Scientific Reports*, 11(1), 11000. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90521-y>
- Vachon, M. (2020). Habiter le Nunavik: considérer le système de production du logement en envisageant la complexité. *Études Inuit Studies*, 44(1-2), 301-321. <https://doi.org/10.7202/1081807ar>
- Zheng, M., Allard, A., Hagmann, P., Alemán-Gómez, Y., et Serrano, M. Á. (2020). Geometric renormalization unravels self-similarity of the multiscale human connectome. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(33), 20244-20253. <https://doi.org/10.1073/pnas.1922248117>

Références  
externes

- Alianait Inuit-specific Mental Wellness Task Group. (2007). *Alianait Inuit Mental Wellness – Action Plan*. ITK, Ontario, Canada. <https://www.itk.ca/wp-content/uploads/2009/12/Alianait-Inuit-Mental-Wellness-Action-Plan-2009.pdf>
- Bélanger, R., Muckle, G., Courtemanche, Y., et Poliakova, N. (2020). *Substance Use. Nunavik Inuit Health Survey 2017 Qanuilirpitaa? How are we now?* Quebec: Nunavik Regional Board of Health and Social Services (NRBHSS) et Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). [https://nrbhss.ca/sites/default/files/health\\_surveys/A12332\\_RESI\\_Substance\\_Use\\_EP5.pdf](https://nrbhss.ca/sites/default/files/health_surveys/A12332_RESI_Substance_Use_EP5.pdf)
- GBD 2019 Mental Disorders Collaborators. (2022). Global, regional, and national burden of 12 mental disorders in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 9(2), 137-150. [https://doi.org/10.1016/S2215-0366\(21\)00395-3](https://doi.org/10.1016/S2215-0366(21)00395-3)
- Inuit Tapiriit Kanatami. (2014). *Social determinants of Inuit health in Canada*. ITK, Ontario, Canada. [https://www.itk.ca/wp-content/uploads/2016/07/ITK\\_Social\\_Determinants\\_Report.pdf](https://www.itk.ca/wp-content/uploads/2016/07/ITK_Social_Determinants_Report.pdf)
- Inuit Tapiriit Kanatami. (2016). *National Inuit Suicide Prevention Strategy*. ITK, Ontario, Canada. <https://www.itk.ca/wp-content/uploads/2016/07/ITK-National-Inuit-Suicide-Prevention-Strategy-2016.pdf>
- Inuit Tapiriit Kanatami. (2019). *Inuit Nunangat Housing Strategy*. ITK, Ontario, Canada. <https://www.itk.ca/wp-content/uploads/2019/04/2019-Inuit-Nunangat-Housing-Strategy-English.pdf>
- Kellert, S. R., Heerwagen, J., et Mador, M. (2011). *Biophilic Design: The Theory, Science and Practice of Bringing Buildings to Life*. John Wiley et Sons, New Jersey, USA.
- Kirmayer, L. J., et Paul, K. (2007). *Qanuippitaa? How are We? Mental health, social support and community wellness*. Institut national de santé publique du Québec et Nunavik Regional Board of Health and Social Services. Québec, Canada. <https://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/46571>
- Kovesi, T. (2012). Respiratory disease in Canadian First Nations and Inuit children. *Paediatrics Child Health*, 17(7), 376–380. <https://doi.org/10.1093/pch/17.7.376>

Références  
externes

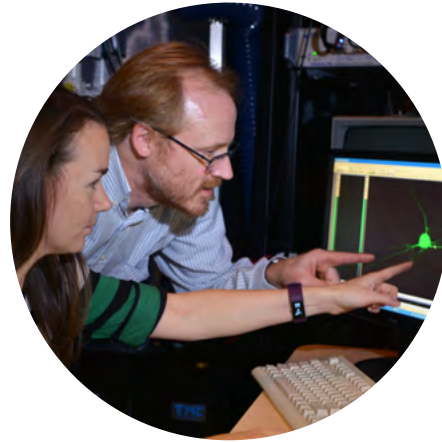
- Lehti, V., Niemelä, S., Hoven, C., Mandell, D., et Sourander, A. (2009). Mental health, substance use and suicidal behaviour among young Indigenous people in the Arctic: A systematic review. *Social Science et Medecine*, 69(8), 1194-1203. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2009.07.045>
- Lopez, A., et Murray, C. (1998). The global burden of disease, 1990–2020. *Nature Medecine*, 4, 1241–1243. <https://doi.org/10.1038/3218>
- Muckle, G., Fraser, S., Desrochers-Couture, M., Pépin, C., Bélanger, R., Fletcher, C., Poliakova, N., et Moisan, C. (2020a). *Mental Health and Wellness. Nunavik Inuit Health Survey 2017 Qanuilirpitaa? How are we now?* Quebec: Nunavik Regional Board of Health and Social Services (NRBHSS) et Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). [https://nrbhss.ca/sites/default/files/health\\_surveys/A12528\\_RESI\\_Mental\\_Health\\_and\\_Wellness\\_EP5.pdf](https://nrbhss.ca/sites/default/files/health_surveys/A12528_RESI_Mental_Health_and_Wellness_EP5.pdf)
- Muckle, G., Fletcher, C., Riva, M., Desrochers-Couture, M., Pépin, C., Poliakova, N., Moisan, C., Bélanger, R., et Fraser, S. (2020b). *Sociocultural determinants of health and wellness. Nunavik Inuit Health Survey 2017 Qanuilirpitaa? How are we now?* Quebec: Nunavik Regional Board of Health and Social Services (NRBHSS) et Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). [https://nrbhss.ca/sites/default/files/health\\_surveys/A12343\\_RESI\\_Sociocultural\\_Determinant\\_EP5.pdf](https://nrbhss.ca/sites/default/files/health_surveys/A12343_RESI_Sociocultural_Determinant_EP5.pdf)
- Nunavik Regional Board of Health and Social Services (NRBHSS), in collaboration with Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). (2015). *Nunavik Health Profile 2014: Young Children and Their Families*. Government of Québec. [https://nrbhss.ca/sites/default/files/Profile\\_Enfants\\_Famille\\_EN.pdf](https://nrbhss.ca/sites/default/files/Profile_Enfants_Famille_EN.pdf)
- Patel, V., Saxena, S., Lund, C., Thornicroft, G., Baingana, F., Bolton, P., Chisholm, D., Collins, P. Y., Cooper, J. L., Eaton, J., Herrman, H., Herzallah, M. M., Huang, Y., Jordans, M. J. D., Kleinman, A., Medina-Mora, M. E., Morgan, E., Niaz, U., Omigbodun, O., Prince, M., Rahman, A., Saraceno, B., Sarkar, B. K., De Silva, M., Singh, I., Stein, D. J., Sunkel, C., et Unützer, J. (2018). The Lancet Commission on global mental health and sustainable development. *The Lancet Commissions*, 392(10157), 1553-1298. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31612-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31612-X)

Références  
externes

- Pepin, C., Muckle, G., Moisan, C., Forget-Dubois, N., et Riva, M. (2018). Household overcrowding and psychological distress among Nunavik Inuit adolescents: A longitudinal study. *International Journal of Circumpolar Health*, 77, 1. <https://doi.org/10.1080/22423982.2018.1541395>
- Perreault, K., Dufresne, P., Potvin, L., et Riva, M. (2022). Housing as a determinant of Inuit mental health: Associations between improved housing measures and decline in psychological distress after rehousing in Nunavut and Nunavik. *Canadian Journal of Public Health*, 114, 241-253. <https://doi.org/10.17269/s41997-022-00701-0>
- Smetanin, P., Stiff, D., Briante, C., Adair, C.E., Ahmad, S. et Khan, M. (2011). *The life and economic impact of major mental illnesses in Canada: 2011 to 2041*. RiskAnalytica, on behalf of the Mental Health Commission of Canada. [https://www.mentalhealthcommission.ca/wp-content/uploads/drupal/MHCC\\_Report\\_Base\\_Case\\_FINAL\\_ENG\\_0\\_0.pdf](https://www.mentalhealthcommission.ca/wp-content/uploads/drupal/MHCC_Report_Base_Case_FINAL_ENG_0_0.pdf)
- Smith, B. W., Dalen, J., Wiggins, K., Tooley, E., Christopher, P., et Bernard, J. (2008). The brief resilience scale: Assessing the ability to bounce back. *International Journal of Behavioral Medicine*, 15(3), 194-200. <https://doi.org/10.1080/10705500802222972>
- Statistique Canada. (2020). *Canadian Community Health Survey, 2019*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/en/daily-quotidien/200806/dq200806a-eng.pdf?st=09juPkhD>
- Van Praag, H. M. (2004). Can stress cause depression? *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 28(5), 891-907. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2004.05.031>
- Vos, T., Lim, S. S., Abbafati, C., Abbas, K. M., Abbasi, M., Abbasifard, M., Abbasi-Kangevari, M., Abbastabar, H., Abd-Allah, F., Abdelalim, A., Abdollahi, M., Abdollahpour, I., Abolhassani, H., Aboyans, V., Abrams, E. M., Abreu, L. G., Abrigo, M. R. M., Abu-Raddad, L. J., Abushouk, A. I., ... Alanzi, T. M. (2020). Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990-2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 396, 1204-1222. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30925-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30925-9)
- Young, T. K., Rawat, R., Dallman, W., Chatwood, S., et Bjerregaard, P. (2012). *Circumpolar Health Atlas*. The University of Toronto Press, Ontario, Canada.

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-SA 3.0 (Erik Lundström), CC BY 4.0 (Dudek et coll., 2020; Arsenault et coll., 2021; Allard et Serrano, 2020; Lebel et coll., 2022)



**Rédaction de l'introduction**

Mary Thaler

**Recherche et rédaction  
des faits saillants scientifiques**

Marie-Andrée Bellavance  
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 :

Antoine Allard, Myrtille Bayle, Myriam Blais, Claude Demers, Caroline Duchaine, Paul De Koninck, Benoît Gosselin, Maripier Isabelle, Benoît Labonté, Mélanie Lemire, Caroline Ménard, Mathieu Morissette, Gina Muckle, François Paquet-Mercier, Martin Roy et Geneviève Vachon.

Nous remercions également Caroline Ménard et Gina Muckle pour leurs commentaires sur l'introduction ainsi que Natalia Poliakova pour la révision de l'ensemble du chapitre.

**Crédits photographiques**

	<b>Index</b>
Myrtille Bayle	193, 204
Dominic Beaudoin	168, 183, 204
Pierre Coupel	163
Martin Fortier/ArcticNet	185
Acacia Johnson	167, 204
Renaud Philippe	165, 169, 204
Émilie Pinard	189
Marc Robitaille	175, 203
Anthony Zerafa/ArcticNet	171, 204



Sentinelle  
Nord

