

CHAPITRE 2

Pergélisol et systèmes d'eau douce

Sentinelle
Nord





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

Canada



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

Québec

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

Ce document doit être cité comme suit :

Sentinelle Nord. (2023). Environnements pergélisolés et systèmes d'eau douce dans un Nord en changement : vers une compréhension intégrée. Compendium de recherche 2017-2022. Environnement, Santé, Innovation. Sentinelle Nord, Université Laval, Québec, Québec, Canada. ISBN : 978-1-7380285-7-3 (PDF). URL : hdl.handle.net/20.500.11794/123785

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 durable 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 des pairs, qui ont été intégrés dans cinq chapitres interdisciplinaires traitant des principaux enjeux nordiques. Malgré l'ampleur et la complexité de ces enjeux, chaque chapitre du compendium vise à apporter de nouvelles perspectives grâce au processus d'intégration et à combler les lacunes fondamentales dans nos connaissances sur le Nord en changement.

TABLE DES MATIÈRES



Introduction
7

Dégradation du pergélisol
et ses impacts sur le paysage
et les infrastructures
11

Mares de thermokarst et dynamique
du carbone associée à la dégradation
du pergélisol
13

La détection des émissions
de gaz à effet de serre *in situ*
15

À la découverte des virus des lacs
et des mares nordiques
17

Les lacs de l'Arctique, sentinelle
des changements
19

De nouvelles technologies
pour suivre les lacs arctiques
21

Des régimes hydrologiques
en changement
23

Des changements
dans le manteau neigeux
25

Importance de la cryobiodiversité
dans un contexte de réchauffement
climatique
27

Références
39



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^e et au début du 21^e 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 (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂) 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 CH₄ et du CO₂ vers l'atmosphère dès leur formation. Les résultats obtenus indiquent que les taux de diffusion du CO₂ et du CH₄ 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 CH₄ et du CO₂ 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).

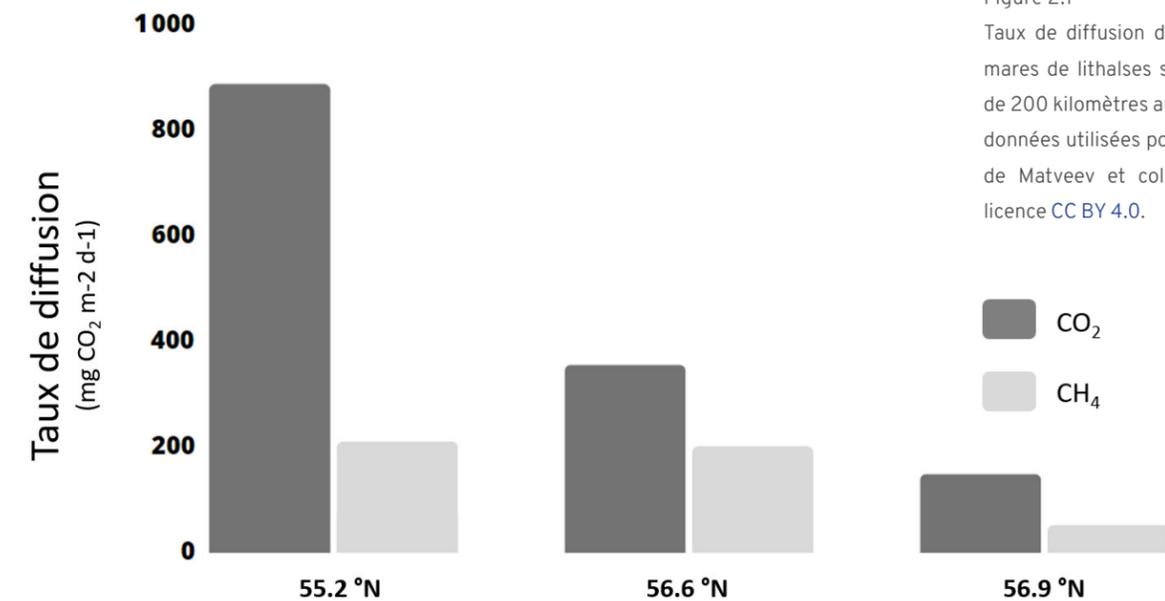


Figure 2.1

Taux de diffusion de CO₂ et de CH₄ 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 CH₄ 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 (CH₄), 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 Ga₂O₃ 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.

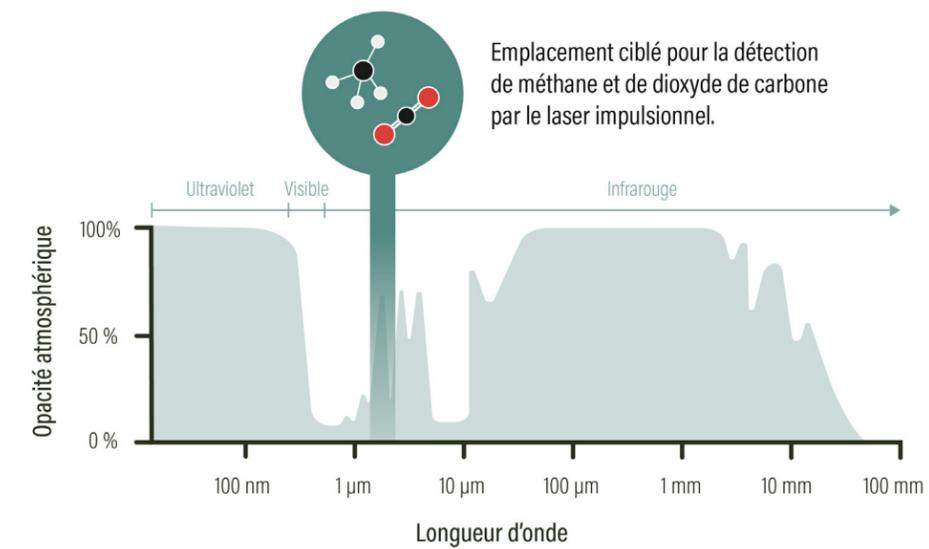


Figure 3.1
Emplacement ciblé pour la détection du méthane et du dioxyde de carbone par un laser à impulsion. © Sarah Dandois et Élodie Ouellet-Belleau.



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](#)).

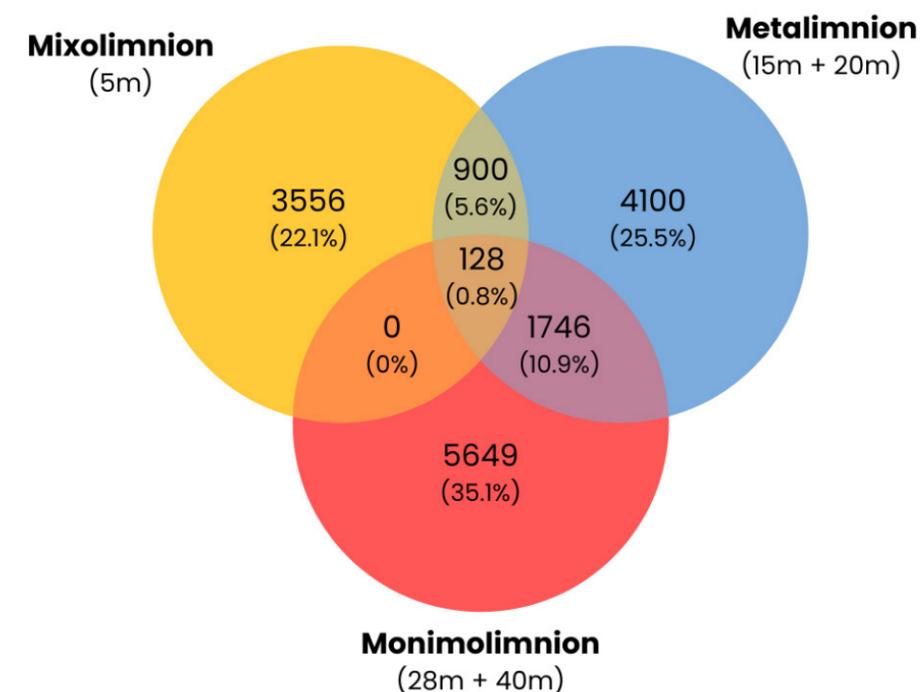


Figure 4.3
Diversité virale en fonction de la profondeur dans un lac hautement stratifié du Haut-Arctique. Figure tirée de Labbé et coll., 2020, un article sous licence [CC-BY-4.0](#).

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](#)).

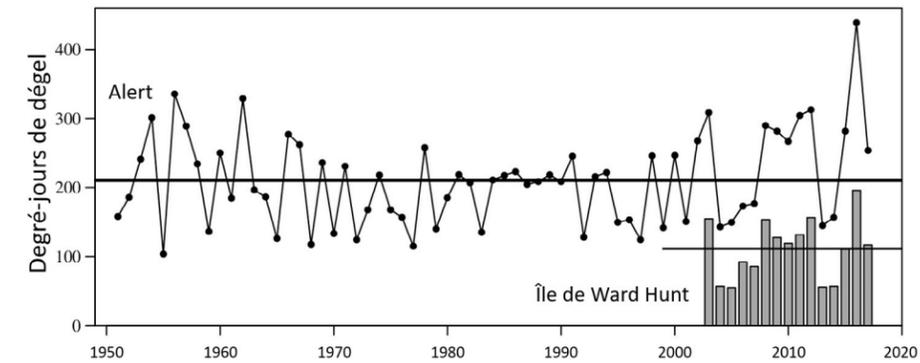
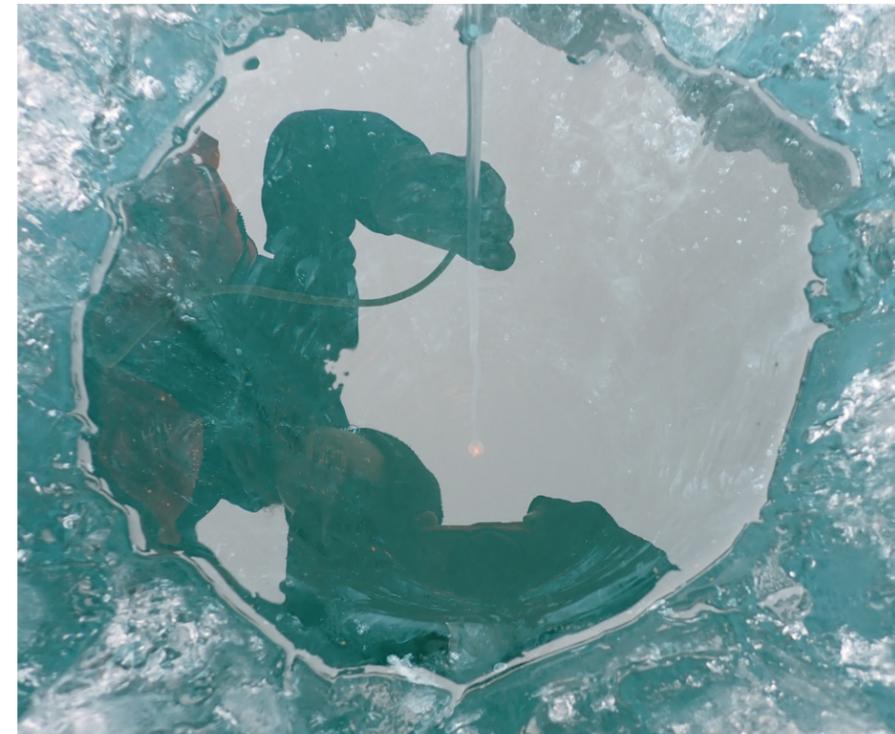
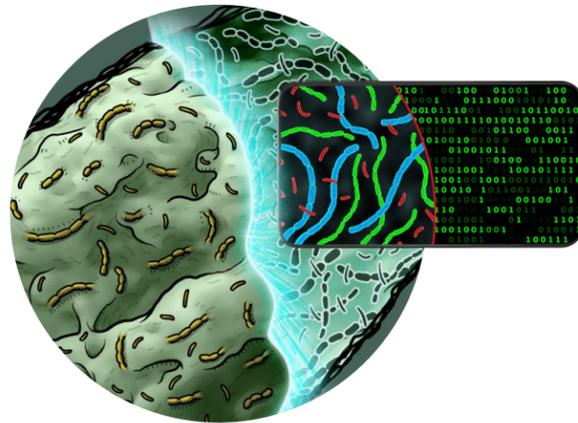


Figure 5.1
Degré-jours de dégel à Alert (ligne et points noirs) et à l'île de Ward Hunt (barres). Les lignes horizontales représentent les valeurs moyennes pour les deux sites. Figure tirée de [Bégin et coll., 2021a](#), un article sous licence [CC BY-NC 4.0](#)

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](#)).

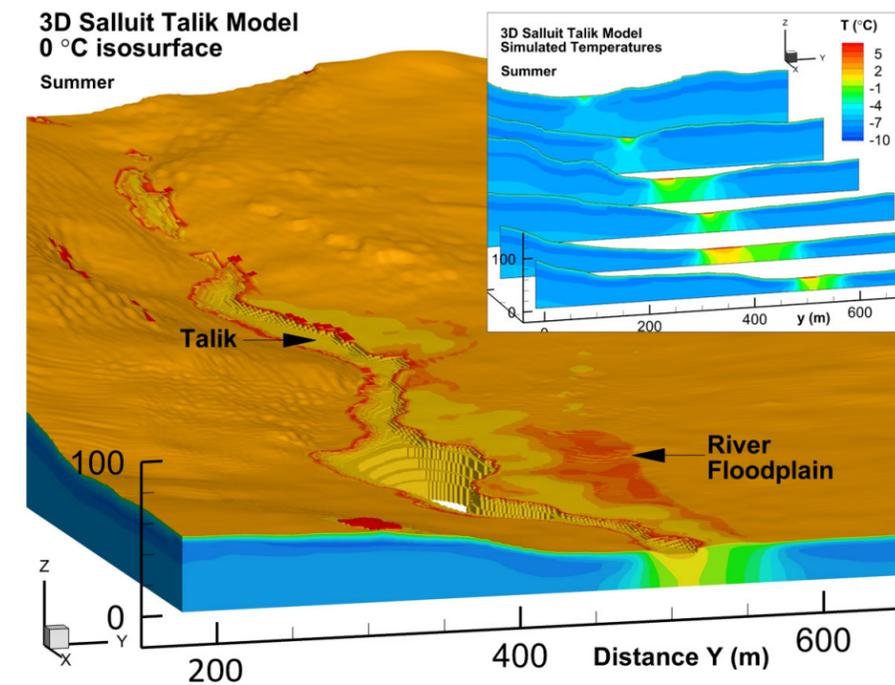


Figure 7.2

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).

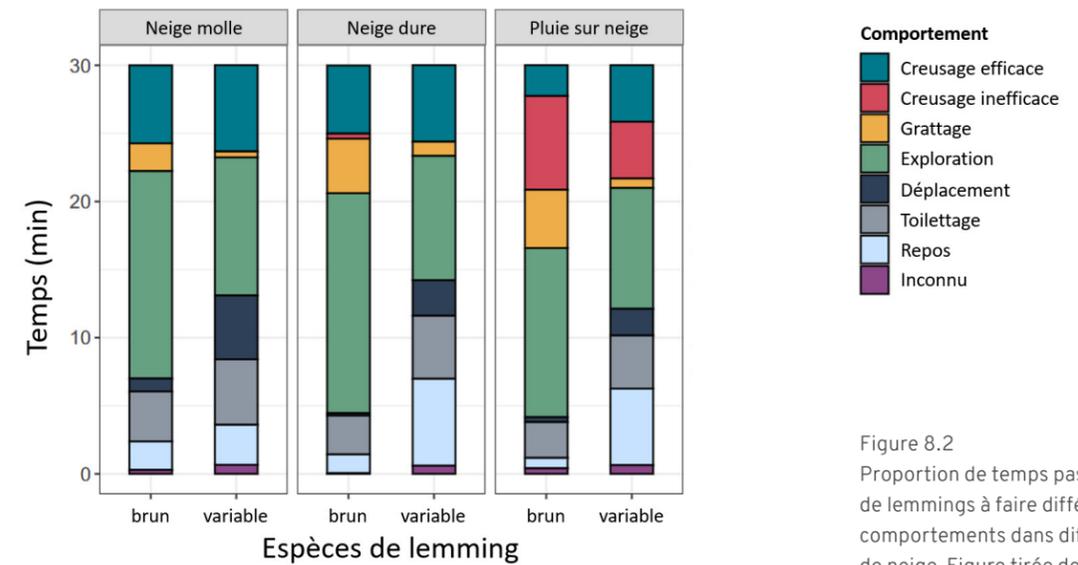


Figure 8.2 Proportion de temps passé par deux espèces de lemmings à faire différents comportements dans différents types de neige. Figure tirée de Poirier et coll., 2021, un article sous licence CC BY 3.0.



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°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 π -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)



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

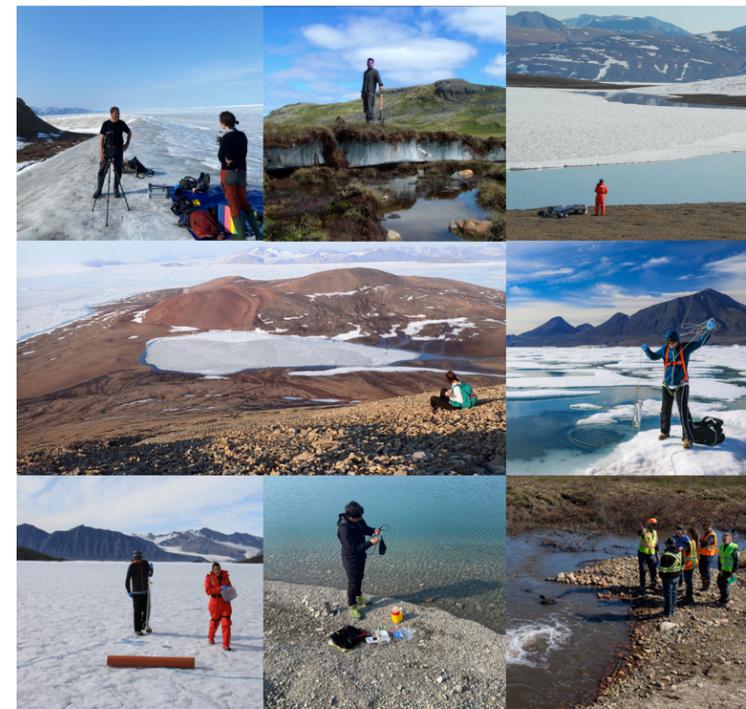
Les membres des équipes de recherche suivantes ont contribué à la révision des faits saillants scientifiques présentés dans ce chapitre :

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

Crédits photographiques	Index
Martin Bernier	12
Karel Cadoret	17, 38
Fabrice Calmels	29
Centre d'études nordiques	31, 38
Leslie Coates/ArcticNet	4
Pierre Coupel	15, 23, 35
Raoul-Marie Couture	7, 20
Martin Fortier/ArcticNet	13, 27, 28
Jesse Greener	21
Emmanuel L'Hérault	Couverture
Martin Lipman © Musée canadien de la nature	29
Fritz Mueller	47
Weronika Murray	12, 38
Renaud Philippe	5, 9, 10
Denis Sarrazin	19, 37, 38
Marie-Audrey Spain Tassitano	25
Warwick Vincent	22, 30, 38



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>

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 Ga₂O₃-BaO-GeO₂ 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>

Ⓞ Libre accès

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

- 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., Basiliako, 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
- Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H. H., Dashtseren, A., Delaloye, R., Elberling, B., Eitzelmueller, 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 km² 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
- 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).

