

CHAPITRE 1

Environnements marins et santé humaine

Sentinelle
Nord



Sentinelle Nord



UNIVERSITÉ
LAVAL



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

Canada



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

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

Ce document doit être cité comme suit :

Sentinelles Nord. (2023). Environnements marins arctiques et subarctiques en changement et les implications pour la santé humaine. Compendium de recherche 2017-2022. Environnement, Santé, Innovation. Sentinelles Nord, Université Laval, Québec, Québec, Canada. ISBN: 978-1-7380285-6-6 (PDF). URL : hdl.handle.net/20.500.11794/123784

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

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

TABLE DES MATIÈRES



Introduction
7

Adaptation du phytoplancton
aux conditions extrêmes
11

Transmission de la lumière
à travers la glace de mer arctique
15

Déterminants de la
qualité nutritionnelle
des producteurs primaires
17

Changement du milieu marin
et de la répartition des espèces
19

Relations trophiques
et transfert d'énergie
dans le réseau trophique
21

Contaminants environnementaux
et incidences sur la santé humaine
dans le Nord
25

Des résultats de recherche
aux politiques
29

Références
39



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 pêchée 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).



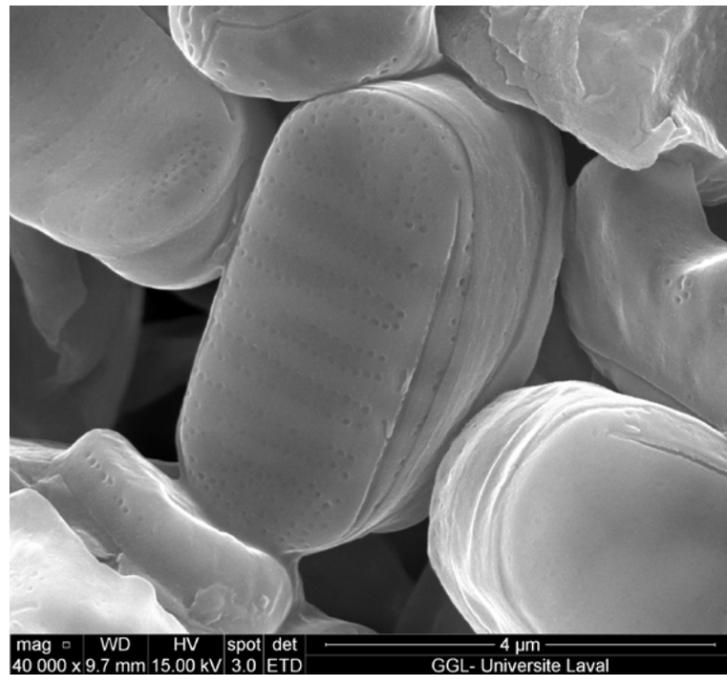
1.2 Pour approfondir nos connaissances de l'océan Arctique pendant la nuit polaire, une équipe de recherche a mis au point un capteur optique ultrasensible, en collaboration avec Biospherical Inc (Figure 1.2). Monté sur un véhicule sous-marin autonome doté de capacités de navigation sous la glace, ce 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

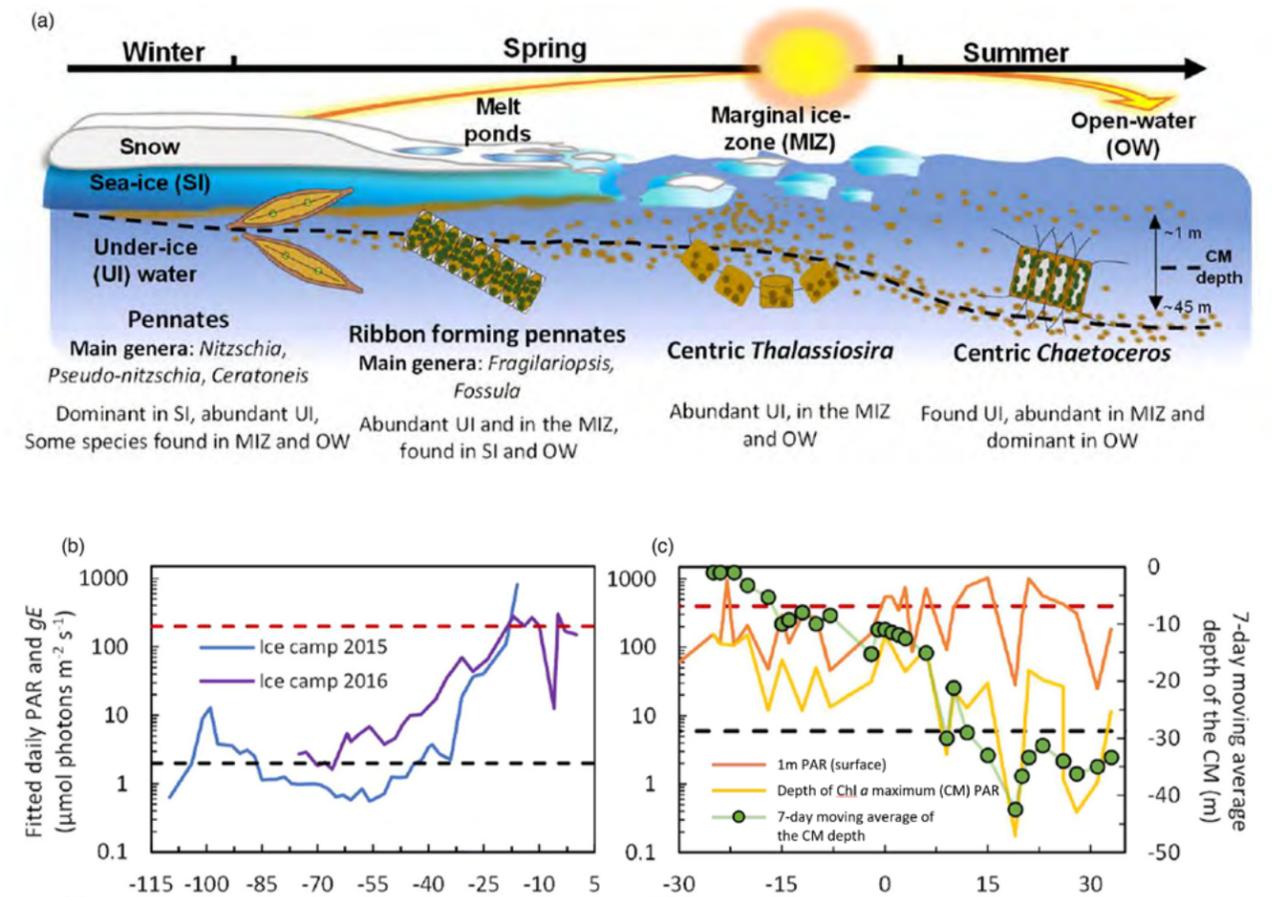


Figure 1.3 Les changements dans les optimums de lumière de croissance des espèces de diatomées favorisent leur succession pendant la floraison printanière dans l'Arctique. Les lignes horizontales en pointillé représentent le minimum (noir) ou le maximum (rouge) d'intensité lumineuse de croissance (gE) 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

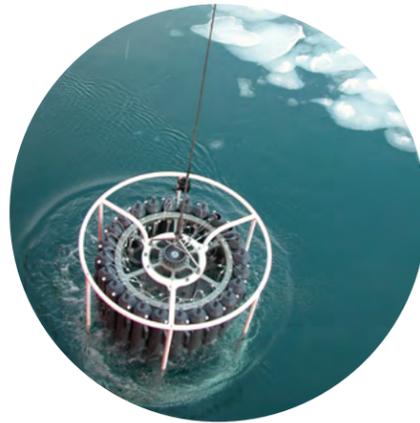
Sélection de faits saillants de la recherche

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. Ultiment, 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).



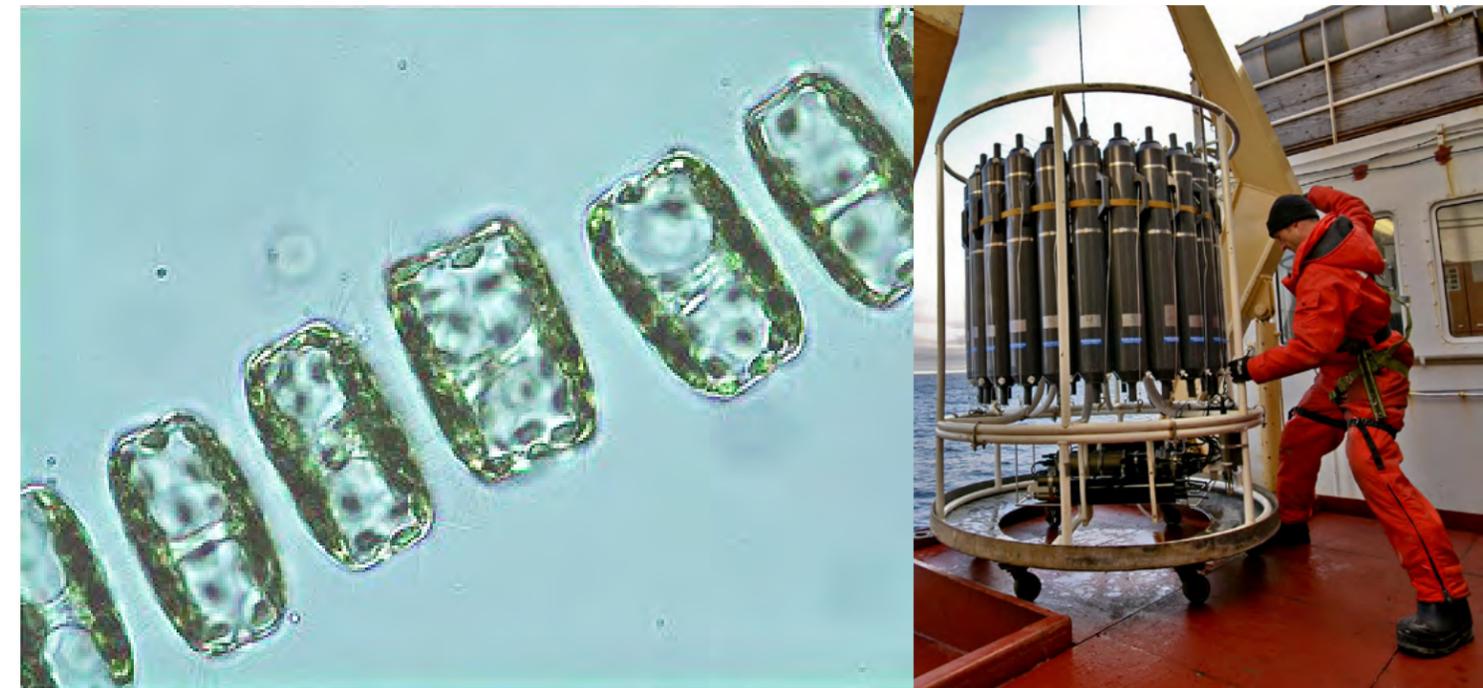
3. Déterminants de la qualité nutritionnelle des producteurs primaires

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).

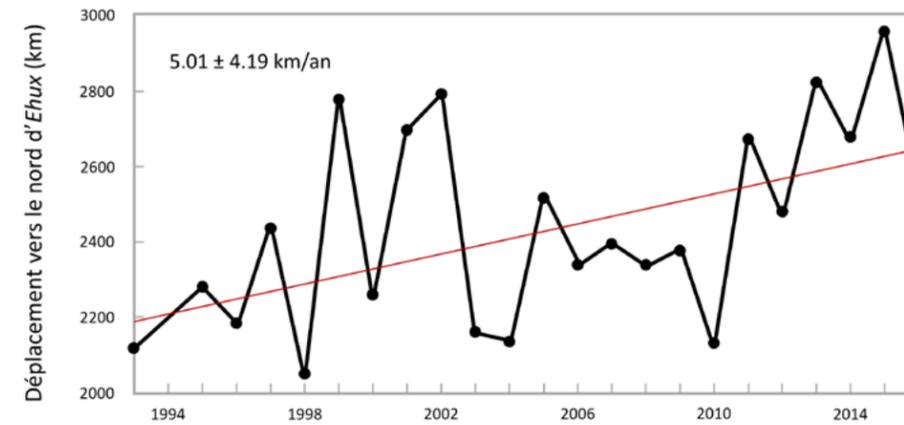


Figure 4.1 Déplacement vers le nord d'*Emiliana huxleyi* (EHux). Figure tirée de Oziel et coll., 2020, un article sous licence CC BY 4.0.



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).

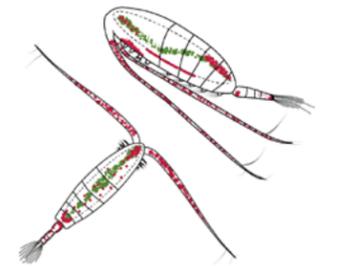


Illustration de copépodes arctiques. © Laure Vilgrain

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).

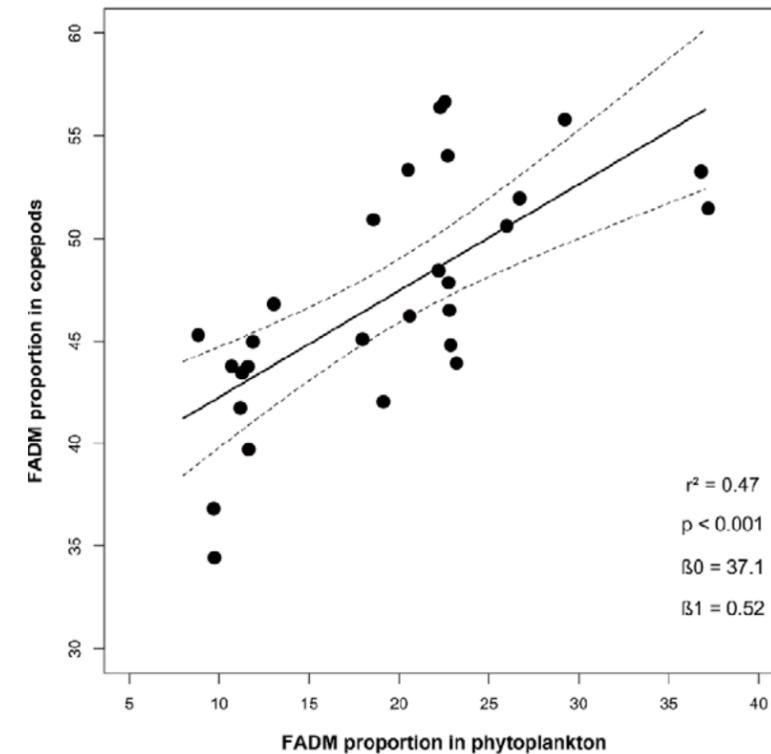


Figure 5.1 Relation entre les marqueurs d'acides gras de diatomées (FADM) du phytoplancton et des copépodes. Les lignes en pointillé représentent l'intervalle de confiance à 95%. Figure adaptée de Marmillot, 2023, © Vincent Marmillot.

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).

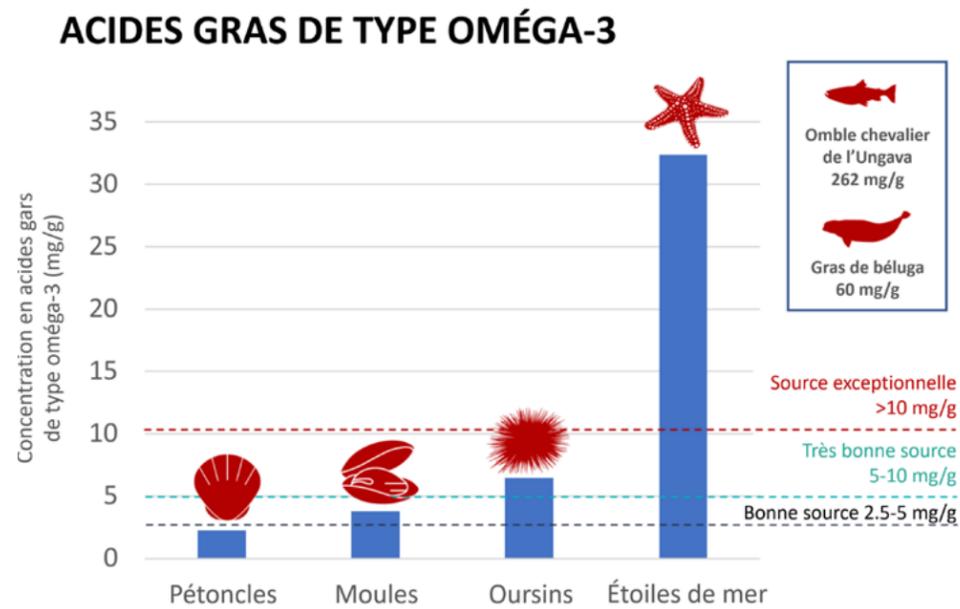


Figure 5.3 Les étoiles de mer sont des sources exceptionnelles d'oméga-3. © Chaire Littoral

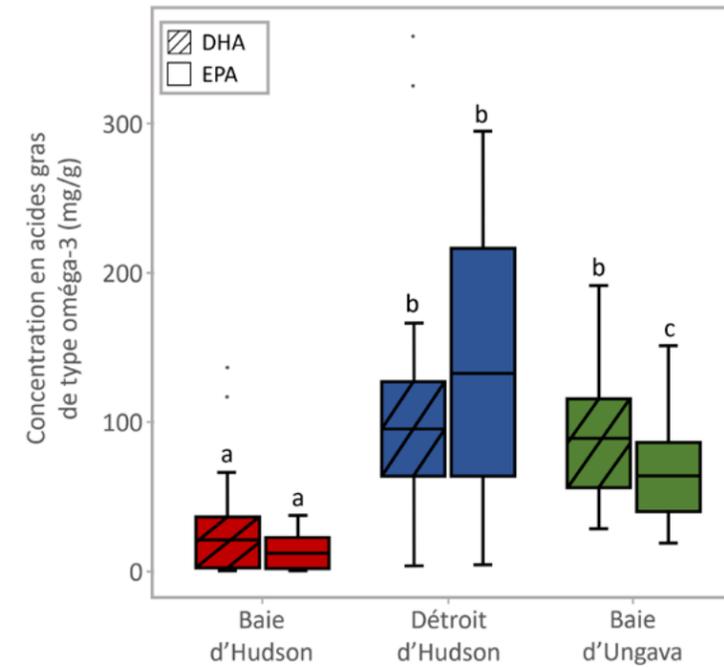


Figure 5.4 Teneur en oméga-3 de l'omble chevalier des trois régions marines du Nunavik. Les boîtes à moustaches représentent les moyennes arithmétiques des concentrations en oméga-3 et l'erreur type des moyennes. © Sara Bolduc

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](#)).

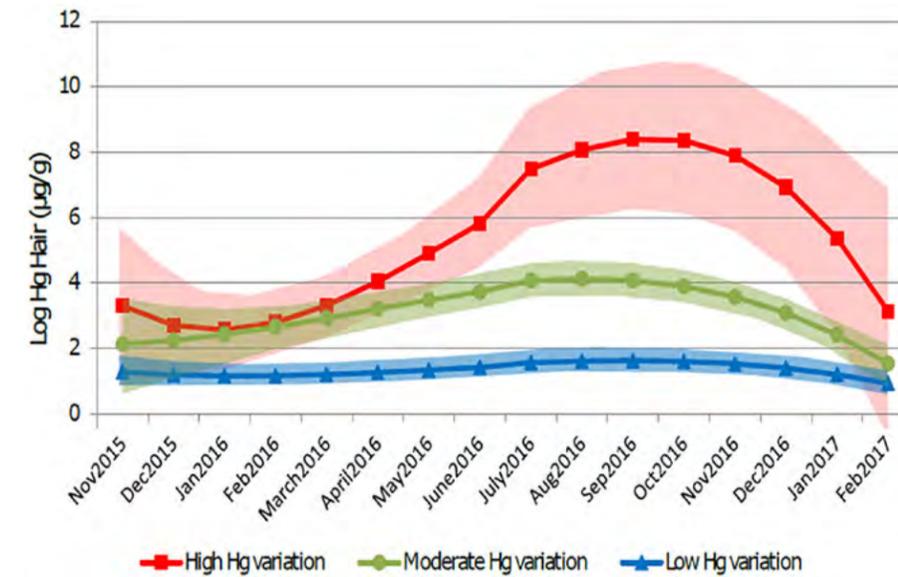


Figure 6.1
Variation mensuelle de la concentration de mercure dans les cheveux de trois groupes de femmes enceintes du Nunavik. Les zones ombragées représentent l'intervalle de confiance à 95%. Figure tirée de de Moraes Pontual et coll., 2021, un article sous licence CC BY-NC-ND 4.0.

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](#)).

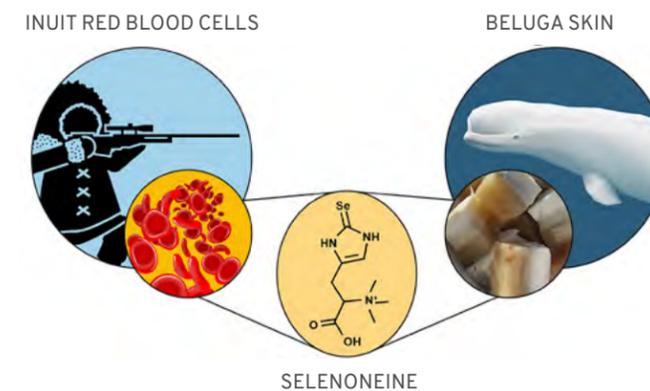


Figure 6.2
La sélénoneine se trouve en forte concentration dans les globules rouges des Inuits et le mattaaq de béluga. Figure tirée de Achouba et al., 2019, un article sous licence CC BY-NC-ND 4.0.

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).

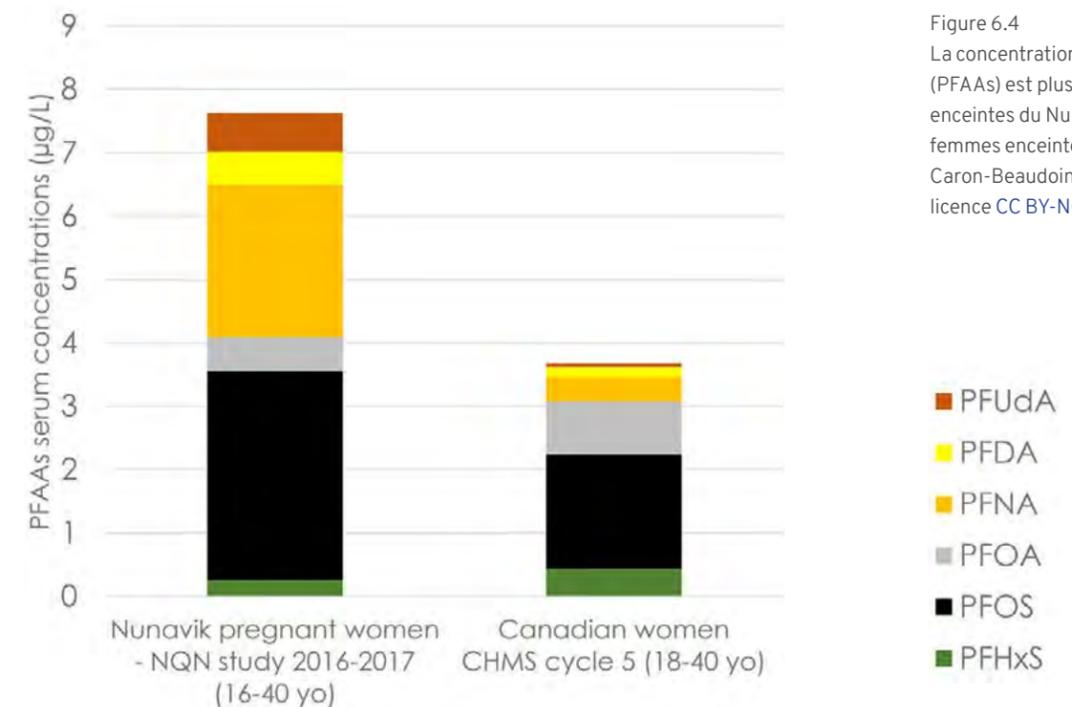


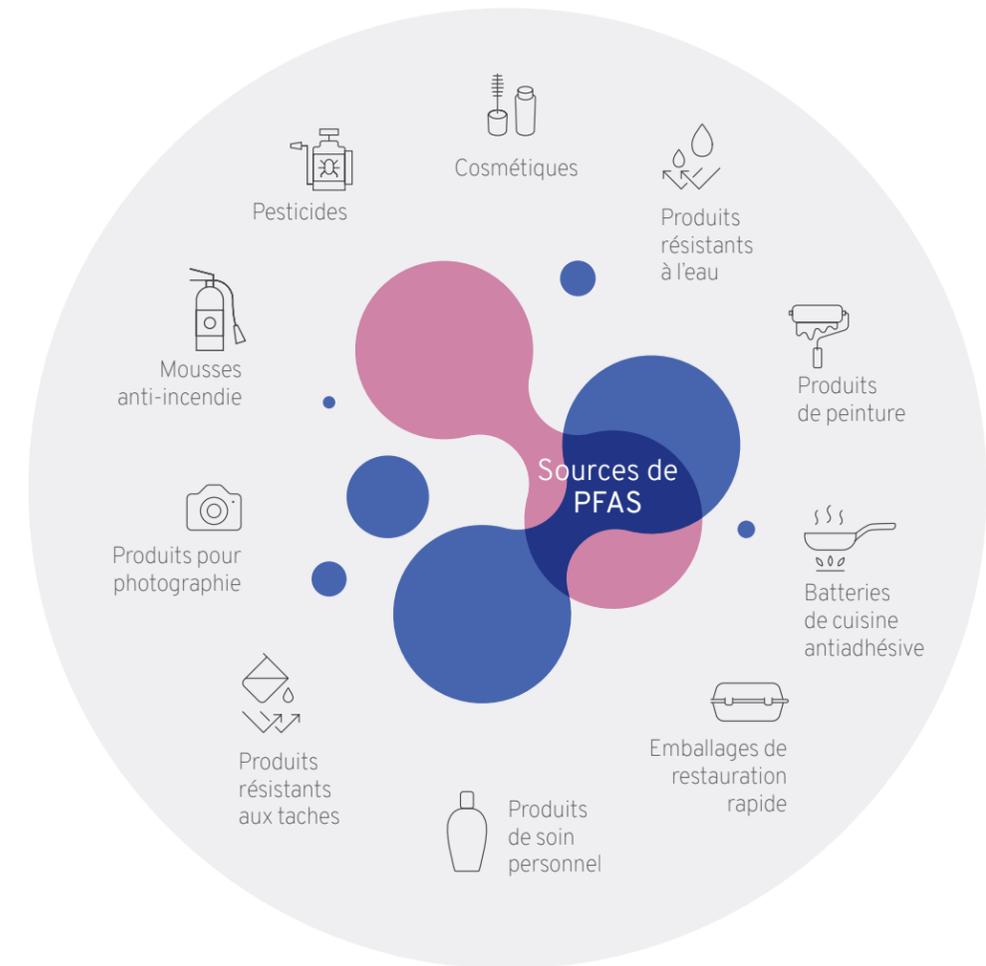
Figure 6.4 La concentration d'acides perfluoroalkyliques (PFAAs) est plus élevée chez les femmes enceintes du Nunavik que pour la moyenne des femmes enceintes canadiennes. Figure tirée de Caron-Beaudoin et al., 2020, un article sous licence CC BY-NC-ND 4.0.

Des résultats de recherche aux politiques

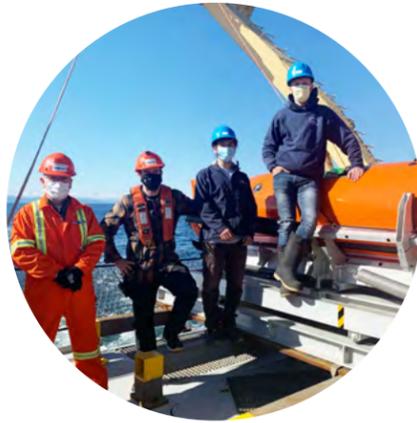
Les résultats obtenus grâce au partenariat entre des scientifiques de Sentinelle Nord et des Inuits du Nunavik ont été essentiels pour la proposition du Canada à la Convention de Stockholm visant à réglementer les acides perfluorocarboxyliques (PFCA) à longue chaîne, leurs sels et leurs précurseurs, 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)



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	18
Mark Aspland	15, 16, 38
Philippe Bourseiller/ArcticNet	11
Leslie Coates/ArcticNet	4
Suzie Côté et Adèle Luthi-Marie	13
Gérald Darnis	19, 20
Ariel Estulin/ArcticNet	11, 38
Marie-Hélène Forget	31
Martin Fortier/ArcticNet	7, 9, 17, 18, 20, 21, 25, 34, 37, 38, 45
Cindy Grant	22
Keith Lévesque/ArcticNet	10
Lisa Matthes	12
Tommy Pontbriand	Cover, 38
Marc Robitaille	12
Sarah Schembri	5
Natasha Thorpe	27
Imalirijit/Nunami Sukuijainiq 2022 Science and Culture Land Camp	29



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 Hg²⁺-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 Hg²⁺-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
- 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).

