

État des mers arctiques du Canada

Andrea Niemi, Steve Ferguson, Kevin Hedges, Humfrey Melling, Christine Michel, Burton Ayles, Kumiko Azetsu-Scott, Pierre Coupel, David Deslauriers, Emmanuel Devred, Thomas Doniol-Valcroze, Karen Dunmall, Jane Eert, Peter Galbraith, Maxime Geoffroy, Grant Gilchrist, Holly Hennin, Kimberly Howland, Manasie Kendall, Doreen Kohlbach, Ellen Lea, Lisa Loseto, Andrew Majewski, Marianne Marcoux, Cory Matthews, Darcy McNicholl, Arnaud Mosnier, C.J. Mundy, Wesley Ogloff, William Perrie, Clark Richards, Evan Richardson, James Reist, Virginie Roy, Chantelle Sawatzky, Kevin Scharffenberg, Ross Tallman, Jean-Éric Tremblay, Teresa Tufts, Cortney Watt, William Williams, Elizabeth Worden, David Yurkowski, Sarah Zimmerman

Pêches et Océans Canada
L'Institut des eaux douces
501, croissant University
Winnipeg (Manitoba) R3T 2N6

2020

**Rapport technique canadien des
sciences halieutiques et aquatiques 3344**



Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques

Les rapports techniques contiennent des renseignements scientifiques et techniques qui constituent une contribution aux connaissances actuelles, mais qui ne sont pas normalement appropriés pour la publication dans un journal scientifique. Les rapports techniques sont destinés essentiellement à un public international et ils sont distribués à cet échelon. Il n'y a aucune restriction quant au sujet; de fait, la série reflète la vaste gamme des intérêts et des politiques de Pêches et Océans Canada, c'est-à-dire les sciences halieutiques et aquatiques.

Les rapports techniques peuvent être cités comme des publications à part entière. Le titre exact figure au-dessus du résumé de chaque rapport. Les rapports techniques sont résumés dans la base de données *Résumés des sciences aquatiques et halieutiques*.

Les rapports techniques sont produits à l'échelon régional, mais numérotés à l'échelon national. Les demandes de rapports seront satisfaites par l'établissement auteur dont le nom figure sur la couverture et la page titre.

Les numéros 1 à 456 de cette série ont été publiés à titre de Rapports techniques de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 457 à 714 sont parus à titre de Rapports techniques de la Direction générale de la recherche et du développement, Service des pêches et de la mer, ministère de l'Environnement. Les numéros 715 à 924 ont été publiés à titre de Rapports techniques du Service des pêches et de la mer, ministère des Pêches et de l'Environnement. Le nom actuel de la série a été établi lors de la parution du numéro 925.

Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences

Technical reports contain scientific and technical information that contributes to existing knowledge but which is not normally appropriate for primary literature. Technical reports are directed primarily toward a worldwide audience and have an international distribution. No restriction is placed on subject matter and the series reflects the broad interests and policies of Fisheries and Oceans Canada, namely, fisheries and aquatic sciences.

Technical reports may be cited as full publications. The correct citation appears above the abstract of each report. Each report is abstracted in the data base *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts*.

Technical reports are produced regionally but are numbered nationally. Requests for individual reports will be filled by the issuing establishment listed on the front cover and title page.

Numbers 1-456 in this series were issued as Technical Reports of the Fisheries Research Board of Canada. Numbers 457-714 were issued as Department of the Environment, Fisheries and Marine Service, Research and Development Directorate Technical Reports. Numbers 715-924 were issued as Department of Fisheries and Environment, Fisheries and Marine Service Technical Reports. The current series name was changed with report number 925.

Rapport technique canadien des
sciences halieutiques et aquatiques 3344

2020

ÉTAT DES MERS ARCTIQUES DU CANADA

A. Niemi¹, S. Ferguson¹, K. Hedges¹, H. Melling², C. Michel¹, B. Ayles³, K. Azetsu-Scott⁴, P. Coupel⁴, D. Deslauriers¹, E. Devred⁴, T. Doniol-Valcroze⁵, K. Dunmall¹, J. Eert², P. Galbraith⁶, M. Geoffroy⁷, G. Gilchrist⁸, H. Hennin⁸, K. Howland¹, M. Kendall⁹, D. Kohlbach¹, E. Lea¹⁰, L. Loseto¹, A. Majewski¹, M. Marcoux¹, C. Matthews¹, D. McNicholl¹, A. Mosnier⁶, C.J. Mundy¹¹, W. Ogloff¹, W. Perrie⁴, C. Richards⁴, E. Richardson¹², J. Reist¹, V. Roy⁶, C. Sawatzky¹, K. Scharffenberg¹, R. Tallman¹, J-É. Tremblay¹³, T. Tufts⁹, C. Watt¹, B. Williams², E. Worden¹, D. Yurkowski¹, S. Zimmerman²

- 1 Pêches et Océans Canada, Winnipeg (Manitoba) R3T 2N6
- 2 Pêches et Océans Canada, Sidney (Colombie-Britannique) V8L 5T5
- 3 Comité mixte de gestion de la pêche, Inuvik (Territoires du Nord-Ouest) X0E 0T0
- 4 Pêches et Océans Canada, Dartmouth (Nouvelle-Écosse) B2Y 4A2
- 5 Pêches et Océans Canada, Nanaimo (Colombie-Britannique) V9T 6N7
- 6 Pêches et Océans Canada, Mont-Joli (Québec) G5H 3Z4
- 7 Université Memorial, St. John's (Terre-Neuve-et-Labrador) A1C 5R3
- 8 Environnement et Changement climatique Canada, Ottawa (Ontario) K1A 0H3
- 9 Pêches et Chasse au phoque, gouvernement du Nunavut, Iqaluit (Nunavut) X0A 0H0
- 10 Pêches et Océans Canada, Inuvik (Territoires du Nord-Ouest) X0E 0T0
- 11 Université du Manitoba, Winnipeg (Manitoba) R3T 2M6
- 12 Environnement et Changement climatique Canada, Winnipeg (Manitoba) R3C 4W2
- 13 Université Laval, Québec (Québec) G1V 0A6

© Sa Majesté la reine du chef du Canada, 2020.

N° de cat. Fs97-6/3344F-PDF

ISBN 978-0-660-33991-7

ISSN 1488-545X

La présente publication doit être citée comme suit :

Niemi, A., Ferguson, S., Hedges, K., Melling, H., Michel, C., Ayles, B., Azetsu-Scott, K., Coupel, P., Deslauriers, D., Devred, E., Doniol-Valcroze, T., Dunmall, K., Eert, J., Galbraith, P., Geoffroy, M., Gilchrist, G., Hennin, H., Howland, K., Kendall, M., Kohlbach, D., Lea, E., Loseto, L., Majewski, A., Marcoux, M., Matthews, C., McNicholl, D., Mosnier, A., Mundy, C.J., Ogloff, W., Perrie, W., Richards, C., Richardson, E., Reist, R., Roy, V., Sawatzky, C., Scharffenberg, K., Tallman, R., Tremblay, J-É., Tufts, T., Watt, C., Williams, W., Worden, E., Yurkowski, D., Zimmerman, S. 2020. État des mers arctiques du Canada. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 3344 : xvi + 205 p.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	vi
RÉSUMÉ	xiv
ABSTRACT	xv
REMERCIEMENTS	xvi
1.0 Les rapports sur l'état des océans	1
1.1 Éléments nécessaires à la description de l'état de l'océan Arctique canadien	1
1.2 Limites de la région visée par le rapport sur l'océan Arctique	3
ÉTUDE DE CAS 1 : En quoi la région arctique canadienne est-elle si particulière?	5
2.0 Messages clés	8
3.0 Facteurs de stress des écosystèmes de l'océan Arctique	15
3.1 Introduction d'espèces dans l'Arctique – modélisation et évaluation des risques	19
ÉTUDE DE CAS 2 : Acidification de l'océan Arctique canadien	22
ÉTUDE DE CAS 3 : Les changements du paysage sonore de l'Arctique	24
ÉTUDE DE CAS 4 : Le phoque annelé et le déclin de la glace de mer	27
4.0 Structure de l'écosystème de l'océan Arctique	30
4.1 Où vit la vie : L'environnement océanique de l'Arctique	30
4.1.1 Limites océanographiques de l'Arctique	30
4.1.2 Le paysage sous-marin	30
4.1.3 Sources d'eau de mer	31
4.1.4 Mouvement d'eau de mer	33
4.1.5 Glace de mer	35
4.1.6 Marées	38
ÉTUDE DE CAS 5 : Observations des collectivités du Nunavut sur les changements de la glace côtière	40
4.2 Aperçu des nutriments, les éléments constitutifs de la productivité des écosystèmes	42
4.3 Aperçu des réseaux trophiques de l'Arctique	44
ÉTUDE DE CAS 6 : Les changements au sein des réseaux trophiques de la baie Cumberland	46
ÉTUDE DE CAS 7 : La glace de mer – un écosystème en évolution	48
4.4 Liens avec l'habitat	50
4.4.1. La glace de mer	50
4.4.2 Sous la glace	53
4.4.3 La colonne d'eau	54

4.4.4. Le plancher océanique	58
ÉTUDE DE CAS 8 : Les eaux du Nord – Sanctuaire de forte productivité et la biodiversité qui y est associée.....	60
ÉTUDE DE CAS 9 : An Apex Predator’s Response to Sea-ice Habitat Declines in Western Hudson Bay.....	62
4.5 Une année dans l’Arctique – Saisonnalité de l’Arctique.....	65
ÉTUDE DE CAS 10 : Changements dans la phénologie du phytoplancton des plateaux aux bassins.....	71
4.6 Biodiversité.....	73
4.6.1. Adaptation et résilience.....	73
ÉTUDE DE CAS 11 : Biodiversité des poissons de l’Arctique marin du Canada.....	76
5.0 Variabilité des écosystèmes	80
5.1 Variations atmosphériques dans l’Arctique	81
5.2 Variations dans l’environnement océanique.....	85
5.2.1 Bassin Canada.....	86
5.2.2. Plateau du Mackenzie, golfe d’Amundsen	88
5.2.3. Plateau polaire canadien	93
5.2.4. Baie de Baffin	97
5.2.5. Baie d’Hudson	98
5.3 Réponses régionales dans la production primaire : expansion vers le nord et points chauds	100
5.4 Variabilité des poissons et des invertébrés	103
5.4.1 Poissons anadromes	103
5.4.2 Poissons de mer commerciaux.....	108
5.4.3. Stocks de crevettes commerciales.....	110
5.5 Stabilité des populations de mammifères marins : observations et tendances.....	111
ÉTUDE DE CAS 12: Variabilité de l’écosystème dans le sud de la mer de Beaufort au Canada	113
ÉTUDE DE CAS 13 : Les interactions des écosystèmes influent sur la variabilité observée dans le nord de la baie d’Hudson – glace de mer, œufs et ours.....	116
6.0 Connexions de voisinage	118
6.1 Flux entrants et sortants	118
6.2 Nutriments : sources, diminution et effets en aval.....	119
6.3 Habitudes de déplacement des poissons marins et connectivité.....	121
6.4 Connectivité et concurrence.....	122
6.5 Migrations des oiseaux marins – Matières océaniques multiples.....	123

ÉTUDE DE CAS 14 : Extension des aires de répartition et présence de nouvelles espèces..	126
ÉTUDE DE CAS 15: Points chauds des mammifères marins : points focaux de transfert énergétique dans l'Arctique canadien	130
ÉTUDE DE CAS 16 : Association entre les dates de migration des bélugas et l'évolution des régimes des glaces révélée par les observations terrestres inuites	133
7.0 Écosystèmes côtiers	135
7.1 Connexion terrestre – Changements dans l'écosystème Beaufort-Mackenzie	135
7.2 Poissons et habitats côtiers de l'ouest de l'Arctique (delta du Mackenzie, versant nord du Yukon et zones côtières marines)	137
7.3 Habitat dans les eaux estuariennes et saumâtres	142
7.4 Utilisation des estuaires par les bélugas.....	142
8.0 Cogestion pour l'océan Arctique canadien	144
ÉTUDE DE CAS 17: Lier le savoir écologique traditionnel, la science occidentale, la gestion de l'environnement et la gestion des pêches dans l'ouest de l'Arctique canadien	145
ÉTUDE DE CAS 18: Science participative à la mode de l'Arctique	148
ÉTUDE DE CAS 19: Surveillance écologique et gestion du béluga, et relations humaines..	151
ANNEXE A : Dépendance entre la glace de mer et les mammifères marins dans l'Arctique canadien.	154
ANNEXE B. Situation de résidence, répartition saisonnière, disponibilité des estimations de l'abondance et tendances de l'abondance des mammifères marins dans l'Arctique canadien ..	155
9.0 RÉFÉRENCES	160

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques physiques de la région arctique canadienne.	6
Tableau 2. Situation actuelle de certains facteurs de stress anthropiques ayant une incidence directe sur les écosystèmes marins de l'Arctique canadien.	18
Tableau 3. Évaluations et études récentes sur la biodiversité dans la région arctique canadienne.	74
Tableau 4. Estimations de l'abondance, indices biologiques et tendances des principaux stocks de poissons anadromes pêchés dans l'Arctique canadien.....	107
Tableau 5. Noms en siglit des poissons que l'on trouve dans l'estuaire du fleuve Mackenzie associés à leurs noms courants et scientifiques.....	141

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Frontières de la région de l'océan Arctique canadien et des zones dont il est question dans le rapport sur l'état de l'océan Arctique.	3
Figure 2. Connectivité entre la région arctique canadienne et les régions arctiques et subarctiques avoisinantes.	4
Figure 3. Vue de la région arctique canadienne depuis l'espace.	5
Figure 4. Tendances de la glace de mer à l'échelle de l'Arctique : A) anomalies de l'étendue de glace de mer en mars et en septembre par rapport aux conditions moyennes pour cette même période de 1981 à 2010; B) déclin de la glace de mer pluriannuelle épaisse (excluant le plateau continental polaire canadien), d'où une couverture de glace de mer plus mince et plus jeune dans l'Arctique; C) débâcle se produisant plus tôt et englacement se produisant plus tard dans l'année (1929-2017).....	16
Figure 5. Total annuel des arrivées de navires (a) et des rejets d'eaux de ballast (b), corrigé pour tenir compte de l'échange d'eau de ballast en haute mer entre 2005 et 2008 dans l'Arctique canadien.	20
Figure 6. Prévion d'un habitat adéquat pour accueillir huit espèces exotiques envahissantes possibles dans l'Arctique canadien, selon les conditions environnementales actuelles et futures. La variation du pourcentage prévu de chaque habitat adéquat entre aujourd'hui et 2050 est indiquée dans le coin inférieur gauche de chaque case.....	21

Figure 7. Images obtenues par microscope électronique de coquilles de limace de mer recueillies dans la mer de Beaufort présentant des signes de dommages causés par l'acidification de l'océan	23
Figure 8. Schéma saisonnier des vocalisations de mammifères marins près de Sachs Harbour (T.N.-O.) par rapport aux concentrations de glace de mer	25
Figure 9. Phoque annelé sur la glace de mer	27
Figure 10. Concentration de glace de mer pour chaque jour de l'année de 2003 à 2013 dans la baie d'Hudson.	27
Figure 11. a) Taux annuel d'ovulation pour chaque année (notez le faible taux enregistré en 2011), b) Pourcentage annuel de petits dans le prélèvement (représentation du recrutement des petits; notez la récente tendance à la baisse), c) Relation entre l'état corporel du phoque et l'année (notez la baisse), d) Relation entre le niveau de cortisol (stress) et l'année (notez la hausse au fil du temps).....	28
Figure 12. Blanchon annelé	29
Figure 13. Ours polaire mangeant un phoque capturé sur le rivage au nord de Churchill, en octobre 2010, une année inhabituelle où des phoques annelés étaient sortis de l'eau et s'étaient aventurés près des ours polaires en attendant le retour de la glace de mer.....	29
Figure 14. Variation de la température et de la salinité selon la profondeur de l'eau de la mer dans le bassin Canada de l'Arctique. Les domaines des principales masses d'eau sont indiqués.	32
Figure 15. Présence des différents types d'eau de mer dans la région arctique canadienne	33
Figure 16. Vue schématique du mouvement des eaux de surface dans la région arctique canadienne.....	34
Figure 17. Couverture de la glace de mer dans la région arctique canadienne au moment où elle atteint presque son étendue maximale	36
Figure 18. Couverture de la glace de mer de la région arctique canadienne au moment où elle atteint presque son étendue minimale.....	37
Figure 19. Emplacements des polynies (zones bleu-vert délimitées par le rouge) dans la région arctique canadienne.....	37
Figure 20. Régions de glace épaisse dans la région arctique canadienne	38
Figure 21. Zones avec des courants de marée forts dans la région de l'Arctique canadien.	38

Figure 22. Lisières de dislocation des glaces à la fin de l’hiver ou au début du printemps selon les descriptions des collectivités.....	41
Figure 23. Répartition de l’acide silicique, un élément nutritif essentiel à la croissance des diatomées, le long du transect entre deux plateaux dans le détroit de Dolphin-et-Union (l’encadré rouge), dans la mer de Beaufort à la fin de l’été 2017.....	42
Figure 24. Diagramme de flux de l’écosystème de la baie Cumberland, modélisé en utilisant l’approche Ecopath.....	44
Figure 25. Aperçu des réseaux trophiques microbiens et classiques qui fonctionnent dans différents types de réseaux trophiques de l’Arctique.....	45
Figure 26. Relations entre le régime alimentaire du béluga (gris), du phoque annelé (rose), du flétan du Groenland (vert) et de l’omble chevalier (bleu) dans la baie Cumberland, déterminées selon les modèles de mélange des isotopes stables.....	46
Figure 27. Dimensions des niches isotopiques pour le béluga, le phoque annelé, le flétan du Groenland et l’omble chevalier entre 1990 et 2002 (lignes continues; [a]) et 2005-2012 (lignes en tirets; [b]).	47
Figure 28. Contribution proportionnelle du carbone produit par les algues de glace et le phytoplancton au bilan de carbone des espèces marines vivant sous la glace de l’océan Arctique à la fin de l’été.....	49
Figure 29. Images microscopiques de colonies arborescentes de la diatomée pennée <i>Nitzschia frigida</i> (a) et de la diatomée centrique <i>Melosira arctica</i> (b).....	51
Figure 30. Date médiane de la ponte des femelles de l’eider à duvet en réaction au moment de la période de débâcle, selon l’état corporel au moment de l’arrivée.	52
Figure 31. Probabilité moyenne de retour des canetons femelles d’eider à duvet dans leur colonie de reproduction une fois adultes, par rapport à leur date relative d’éclosion au cours d’une année donnée, où la date relative d’éclosion 0 = eaux libres de glace.....	53
Figure 32. Pourcentage estimatif des régions couvertes de glace de l’Arctique qui sont propices à une floraison phytoplanctonique sous la glace	54
Figure 33. Assemblages de poissons marins et habitats de masse d’eau connexes sur le plateau continental et le talus de la partie canadienne de la mer de Beaufort.	57
Figure 34. (a) Richesse de la méga-épifaune observée dans le cadre des relevés de crevette de la NSRF et du MPO utilisant les chaluts Campelen et Cosmos de 12,8 mm chacun (2 572 stations de 2005 à 2016; profondeur de 100 à 900 m); (b) Richesse de la méga-épifaune observée dans le cadre des relevés du flétan du Groenland du MPO utilisant le chalut Alfredo de 30 mm) (1 034 stations de 2004 à 2016; profondeur de 400 et 1 500 m).....	59

Figure 35. Série chronologique de la biomasse (a) et de la production primaire (b) de <i>chl a</i> fractionnée par taille de 1999 à 2011, à l'automne dans la baie de Baffin.	61
Figure 36. Ours polaire sur les rives de la baie d'Hudson	62
Figure 37. (a) Arrivée précoce de la débâcle à long terme et (b) prolongation de la période sans glace dans l'ouest de la baie d'Hudson au Canada.	63
Figure 38. Le déclin à long terme de la taille de la population d'ours polaires de l'ouest de la baie d'Hudson de 1987 à 2011 s'explique par une réduction de la disponibilité de la glace de mer. ..	64
Figure 39. La lithographie intitulée « Nunavut Qajanartuk » illustre une année dans l'Arctique du point de vue d'une collectivité côtière	65
Figure 40. Connaissances traditionnelles sur la présence de narvals près de Pond Inlet (NU) recueillies en 2016 dans le cadre de l'initiative d'inventaire côtier du Nunavut.....	66
Figure 41. Exemple d'utilisation saisonnière de l'habitat (jours passés dans une même zone) que font les baleines boréales de la population allant de l'est du Canada à l'ouest du Groenland; au printemps (a), en été (b), en automne (c) et en hiver (d)	69
Figure 42. Changements phénologiques de la production primaire de la glace de mer et de la colonne d'eau dans des conditions habituelles (panneau supérieur) et réduites (panneau inférieur) de couverture de glace sur les plateaux et dans les bassins de l'Arctique.	72
Figure 43. Nombre d'espèces de poissons marins et anadromes par région de la zone à l'étude. 76	
Figure 44. Répartition géographique de l'oscillation arctique.....	82
Figure 45. Variation de l'indice de l'oscillation arctique au fil du temps	82
Figure 46. Variation de l'indice du Pacifique Nord au fil du temps.....	83
Figure 47. Polygones (rouges) délimitant certaines parties de la région arctique canadienne où les observations permettent de décrire certains aspects de l'état de l'environnement océanique.	85
Figure 48. Emplacement du Beaufort Gyre Exploration Project (BGEP) dans le bassin Canada	86
Figure 49. Variation de la banquise mesurée par un sonar de profilage de la glace sur le site D (figure 48) de l'Observatoire du tourbillon de Beaufort.	86
Figure 50. Volume d'eau douce diluée dans diverses masses d'eau de mer présentes dans le tourbillon de Beaufort.	87

Figure 51. Variation de l'indice d'oscillation de l'océan Arctique indiquant les intervalles de l'alternance du sens de la rotation depuis 1945.	87
Figure 52. Valeurs d'un indice Ω dans les eaux de surface du bassin Canada.	88
Figure 53. Anomalie sur 3 mois de la salinité de l'eau de mer près du plancher océanique du plateau du Mackenzie dans le sud de la mer de Beaufort.	89
Figure 54. Anomalie sur 3 mois de la température de l'eau de mer près du plancher océanique du plateau du Mackenzie.	89
Figure 55. Distance parcourue annuellement dans le sens ascendant par les eaux près du plancher océanique au milieu du plateau du Mackenzie.	90
Figure 56. Anomalie mensuelle de la couverture fractionnelle de la glace de mer ou de la concentration de la glace, au milieu du plateau continental du Mackenzie.	91
Figure 57. Carte des glaces de la mi-mai 2016 montrant une vaste étendue d'eau libre dans le sud-est de la mer de Beaufort.	91
Figure 58. La variation de la banquise mesurée par un sonar de profilage de la glace sur le site 1 de l'Observatoire de Beaufort du MPO (milieu du plateau du Mackenzie)	92
Figure 59. Fraction de glace pluriannuelle (rouge) dans des sous-zones du plateau polaire canadien où la fraction de la glace pluriannuelle moyenne est de 20 % ou plus.	93
Figure 60. Épaisseur de glace fixée en fin d'hiver dans trois stations sur le plateau polaire canadien depuis la fin des années 1940.	94
Figure 61. Fractions de volume de la banquise à chaque épaisseur de glace dans le détroit de Byam Martin.	94
Figure 62. Valeurs moyennes d'épaisseur de la glace sur 25 km à la lisière sud du « dernier refuge de glace » pendant 4 étés récents.	95
Figure 63. Mesures du débit de l'eau de mer allant de l'Arctique à l'Atlantique dans les détroits de Lancaster, de Nares et de Davis.	96
Figure 64. (a) acidité océanique moyenne dans le détroit de Davis de 1997 à 2015, en termes d'état de saturation Ω de l'aragonite, une forme de calcaire; (b) variation temporelle de Ω à 50-100 m.	97
Figure 65. Couverture fractionnelle par type de glace dans la baie de Baffin à la mi-juin.	97
Figure 66. Couverture de glace fractionnelle dans le nord-ouest de la baie de Baffin début avril.	98

Figure 67. Couverture fractionnelle par type de glace dans la baie d’Hudson à la mi-juin.....	99
Figure 68. Couverture de glace fractionnelle dans le nord-ouest de la baie d’Hudson au début d’avril.....	99
Figure 69. Production primaire (PP) moyenne dans l’Arctique canadien dérivée des images MODIS L3 pour trois périodes : a) 2002 à 2004, b) 2005 à 2009 et c) 2010 à 2014	100
Figure 70. Tendances annuelles de la productivité primaire (PP) au cours de la période de floraison phytoplanctonique printanière (FPP) estimées à partir de données satellitaires sur la couleur des océans entre les 70° et 90°N.....	101
Figure 71. Tendances de a) la profondeur de la nitracline et b) la réduction du NO ₃ dans la mer de Beaufort de 2003 à 2011	102
Figure 72. Lien entre l’état corporel de l’omble chevalier de la rivière Kuujua et le recul des glaces dans la mer de Beaufort.	104
Figure 73. Vulnérabilité à la pêche relative des stocks d’omble chevalier au Nunavut établie à l’aide d’une analyse productivité-sensibilité	106
Figure 74. Total des prises autorisées et total annuel des prises débarquées (en milliers de tonnes) (A) pour le flétan du Groenland, et indice de biomasse (B) dans la baie de Baffin et le détroit de Davis ensemble.	109
Figure 75. Zones d’évaluation de l’est et de l’ouest pour les espèces de crevettes commerciales dans la région de Baffin de l’Arctique canadien.....	110
Figure 76. Total des prises autorisées, total annuel des prises débarquées et indice de biomasse pour les crevettes nordiques et ésopep pêchées dans les zones d’évaluation de l’ouest (ZEO) et de l’est (ZEE) de la baie de Baffin.	111
Figure 77. Cartes thermiques de l’observation de la présence de mammifères marins près de Hall Beach (Nt).	112
Figure 78. Biomasse mésopélagique de la morue polaire dans le sud de la mer de Beaufort canadienne calculée à partir de données hydroacoustiques	113
Figure 79. Béluga ayant la bouche pleine de lançons.....	113
Figure 80. Concentrations de chlorophylle <i>a</i> dans la mer de Beaufort, intégrées pour la zone euphotique, en 2013, en 2014 et en 2017.....	115
Figure 81. Diminution de la durée de la glace de mer dans le nord de la baie d’Hudson de 1988 à 2012.....	116

Figure 82. Au fil des ans, on prévoit un déclin de l'état corporel des ours polaires au stade subadulte, tant chez les mâles que chez les femelles.	116
Figure 83. Effets multiples des changements climatiques sur les eiders à duvet	117
Figure 84. Vision à grande échelle de l'indice de suffisance en azote à une profondeur où la concentration de phosphate est de 0,8 µm.	120
Figure 85. Composition moyenne en pourcentage des proies fréquemment présentes dans l'estomac des phoques annelés (n = 65) et des phoques du Groenland (n = 18) capturés dans la baie Cumberland de 2008 à 2016 pendant la période des eaux libres.	123
Figure 86. Mouvements migratoires annuels (migration automnale vers les aires d'hivernage, vers le Groenland ou vers le Sud) des eiders à duvet (A) et des eiders à tête grise (B), mâles et femelles. Chaque couleur représente un individu distinct.	124
Figure 87. Mouvements migratoires vers le Sud (points bleus) et haltes migratoires (points jaunes) des goélands argentés qui nichent dans la baie de l'Est.	125
Figure 88. Charlie Erigaktoak et Danny Gordon Jr. avec un saumon qu'ils ont pêché en 2016 à Shingle Point, au Yukon.	126
Figure 89. Nombre de chaque espèce de saumon du Pacifique obtenu par le programme de surveillance communautaire du saumon de l'Arctique auprès des pêcheurs dans l'ensemble de l'Arctique canadien de 2000 à 2017	127
Figure 90. Épaulard dans le détroit d'Éclipse, au Nunavut, à l'été 2018	128
Figure 91. Répartition spatiale de la densité du nombre unique d'espèces sur 21 espèces par maille de grille de 50 km x 50 km dans chacune des trois zones géographiques pendant les périodes été-automne (a, c, e) et hiver-printemps (b, d, f).....	131
Figure 92. Points chauds (rouge) et points froids (bleu) de la diversité des espèces par période été-automne (a) et hiver-printemps (b) relativement à l'ensemble des espèces surveillées par maille de grille de 50 km x 50 km dans l'ensemble de la zone d'étude	132
Figure 93. Lieu des sources d'observation terrestres (c.-à-d. les communautés inuites de Kangiqsujuaq et de Quaqtq) et zone prise en compte pour calculer les dates de débâcle et de prise des glaces.	133
Figure 94. Tendances des dates des migrations du printemps (points verts) et de l'automne (points orange) du béluga dans le détroit d'Hudson et les dates de débâcle (ligne grise inférieure) et de prise des glaces (ligne grise supérieure).....	134

Figure 95. Inuit Nunangat, la patrie inuite, comprend quatre régions inuites : le Nunavut, le Nunavik, le Nunatsiavut et la région désignée des Inuvialuit.....	135
Figure 96. Éboulement dans le delta du Mackenzie.	136
Figure 97. Image satellitaire du delta du fleuve Mackenzie MODIS (spectroradiomètre imageur à résolution moyenne) et caractéristiques de l’habitat associé accessible aux poissons côtiers....	138
Figure 98. Modèle visuel de la relation entre les CET, les connaissances scientifiques occidentales et la prise de décisions en matière de gestion de l’environnement et des pêches. .	147
Figure 99. Brandon Green et Steve Illasiak en train de traiter des échantillons de poissons et d’enregistrer des données biologiques dans la zone de protection marine d’Anguniaqvia niqiqyuam, Territoires du Nord-Ouest, 2018.....	148
Figure 100. Modèle établi pour la science participative afin de surveiller l’évolution de l’Arctique canadien.....	150
Figure 101. Processus suivi pour sélectionner les indicateurs de santé des bélugas avec les localités d’Inuvik, de Tuktoyaktuk et de Paulatuk.....	151
Figure 102. Fiche de surveillance des bélugas du CMGP/MPO (feuille 1 de 2) qui comprend des indicateurs fondés sur les CET.	152
Figure 103. Récolte annuelle de bélugas par la bande Aklavik de 1975 à 2019.	153

RÉSUMÉ

Niemi, A., Ferguson, S., Hedges, K., Melling, H., Michel, C., Ayles, B., Azetsu-Scott, K., Coupel, P., Deslauriers, D., Devred, E., Doniol-Valcroze, T., Dunmall, K., Eert, J., Galbraith, P., Geoffroy, M., Gilchrist, G., Hennin, H., Howland, K., Kendall, M., Kohlbach, D., Lea, E., Loseto, L., Majewski, A., Marcoux, M., Matthews, C., McNicholl, D., Mosnier, A., Mundy, C.J., Ogloff, W., Perrie, W., Richards, C., Richardson, E., Reist, R., Roy, V., Sawatzky, C., Scharffenberg, K., Tallman, R., Tremblay, J-É., Tufts, T., Watt, C., Williams, W., Worden, E., Yurkowski, D., Zimmerman, S. 2020. État des mers arctiques du Canada. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 3344 : xvi + 205 p.

Dans le cadre d'une initiative lancée en 2016, Pêches et Océans Canada (MPO) s'est engagé à produire des rapports sur l'état des écosystèmes dans le but d'informer la population canadienne de l'état des trois océans du Canada. Le présent rapport fournit une synthèse des connaissances actuelles sur la région arctique canadienne, en particulier celles acquises au cours des cinq dernières années. Cette information comprend les renseignements issus des programmes de recherche scientifique et des évaluations des connaissances inuites. On y décrit également les éléments structurants de l'océan Arctique afin de situer le contexte actuel du fonctionnement des écosystèmes et des changements qui s'y produisent. Parmi les principaux thèmes abordés dans ce rapport, il sera notamment question de la variabilité des écosystèmes et de la connectivité entre les écosystèmes avoisinants, alors que certaines sections portent sur la cogestion et les écosystèmes côtiers. Les études de cas, quant à elles, fournissent des exemples thématiques de l'état actuel des écosystèmes. Enfin, les messages clés rendent compte de notre nouvelle compréhension de base de la région arctique canadienne et de la façon dont les écosystèmes réagissent actuellement aux changements qui touchent les conditions de glace de mer.

ABSTRACT

Niemi, A., Ferguson, S., Hedges, K., Melling, H., Michel, C., Ayles, B., Azetsu-Scott, K., Coupel, P., Deslauriers, D., Devred, E., Doniol-Valcroze, T., Dunmall, K., Eert, J., Galbraith, P., Geoffroy, M., Gilchrist, G., Hennin, H., Howland, K., Kendall, M., Kohlbach, D., Lea, E., Loseto, L., Majewski, A., Marcoux, M., Matthews, C., McNicholl, D., Mosnier, A., Mundy, C.J., Ogloff, W., Perrie, W., Richards, C., Richardson, E., Reist, R., Roy, V., Sawatzky, C., Scharffenberg, K., Tallman, R., Tremblay, J-É., Tufts, T., Watt, C., Williams, W., Worden, E., Yurkowski, D., Zimmerman, S. 2020. État des mers arctiques du Canada. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 3344 : xvi + 205 p.

Fisheries and Oceans Canada (DFO) committed to informing Canadians on the state of Canada's three oceans as part of an Ecosystem Reporting initiative established in 2016. This report presents a synthesis of current knowledge, focusing primarily on information from the past five years, for the Canadian Arctic region. Information from scientific research programs and Inuit knowledge assessments is included. Structuring elements of the Arctic Ocean are discussed to provide the context for how ecosystems are currently functioning and/or changing. Ecosystem variability and neighbourhood connectivity are key themes presented in the report and specific sections focus on co-management and coastal ecosystems. Case studies provide theme-based examples of current ecosystem status. Key messages identify new baseline understanding of the Canadian Arctic region and current ecosystem responses to changes in sea-ice conditions.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Charles Hannah, Ph. D., de l'Institut des sciences océaniques de Pêches et Océans Canada, ainsi que Ken Drinkwater, Ph. D., de l'Institut de recherche maritime de Bergen, en Norvège, pour leur révision constructive du présent rapport.

Les connaissances réunies dans le présent rapport sont le fruit des efforts déployés par de nombreux chercheurs, techniciens, équipages de navires, conseils de cogestion et membres des collectivités. Nous soulignons l'engagement de tous ceux et celles qui s'investissent pour renforcer notre compréhension des écosystèmes de l'Arctique.

Merci
Nakurmiik
ᓃᓂᓃᓃᓃᓃᓃᓃ
Quyanainni
Thank you

1.0 Les rapports sur l'état des océans

Dans le cadre de son engagement à informer la population canadienne de l'état actuel des océans du Canada, Pêches et Océans Canada (MPO) présente régulièrement des rapports sur les écosystèmes des océans Pacifique, Atlantique et Arctique. L'initiative de rapports sur l'état des écosystèmes des trois océans du Canada, qui a été lancée en 2016, vise principalement à produire de l'information accessible au public et fondée sur des connaissances spécialisées. Dans le présent rapport technique, nous avons recours à la fois aux connaissances scientifiques et aux connaissances inuites pour décrire notre compréhension collective actuelle – principalement depuis les cinq dernières années – de l'état de la vaste région arctique canadienne.

La structure du présent rapport s'appuie sur une approche écosystémique intégrée. Plutôt que de présenter les niveaux trophiques et les espèces selon un ordre séquentiel, nous avons opté pour une approche thématique. Ainsi, l'état de l'écosystème est décrit selon divers sujets qui représentent des aspects clés de la connectivité et la fonction des écosystèmes.

1.1 Éléments nécessaires à la description de l'état de l'océan Arctique canadien

Ce rapport décrit l'état de l'océan Arctique, plus particulièrement dans la région arctique canadienne. Cela étant dit, qu'entendons-nous exactement par « état » et comment l'avons-nous évalué? Dans un contexte écologique, l'*état* se définit comme l'ensemble des conditions abiotiques et biotiques observées par rapport à un écosystème donné ou à une composante de cet écosystème. L'évaluation de la variabilité de l'écosystème est étroitement liée à la description des conditions. Les conditions abiotiques et biotiques sont-elles stables ou changeantes (c.-à-d., les tendances) par rapport à un moment précis dans le temps ou à une moyenne de la condition évaluée? Pour déterminer scientifiquement que l'état d'un écosystème a subi un changement, il faut réaliser des analyses statistiques à l'aide de données adéquates et pertinentes. Le « fardeau de la preuve » relatif aux changements qui touchent les écosystèmes de l'Arctique représente un défi, car on dispose de peu de données adéquates portant sur plusieurs échelles spatiales et temporelles.

État : ensemble des caractéristiques utilisées pour décrire l'état d'un écosystème dans l'espace et le temps en ce qui concerne une zone géographique précise. Dans le cas d'un système déterministe, l'*état* représente les valeurs des variables utilisées pour décrire ce système, alors que dans le cas d'un système stochastique, l'*état* pourrait représenter soit la distribution de probabilités relative de ces variables d'état, soit les valeurs réalisées de ces variables d'état. En pratique, les définitions de l'état d'un système comprennent à la fois la moyenne et la variabilité des systèmes (Ratajczak et coll., 2018).

La variation des conditions environnementales au fil du temps (section 5) complique le calcul des conditions moyennes à partir desquelles évaluer le changement. Si cette variabilité se manifeste de façon évidente dans les différences saisonnières spectaculaires entre les conditions hivernales et estivales des eaux de l'Arctique, d'importants changements sont également observés d'une année à l'autre et entre regroupements d'années, un phénomène que l'on appelle respectivement variation interannuelle et variation interdécennale. Il est relativement facile de

déterminer une condition moyenne lorsque les observations sont continues dans le temps. Cependant, bon nombre des campagnes d'observation des océans conduites annuellement sont biaisées selon les saisons et de courte durée, s'échelonnant parfois sur à peine quelques semaines en été. Néanmoins, si les observations sont répétées chaque année au même moment du cycle annuel, nous pouvons les utiliser pour décrire l'état d'un écosystème pour cette période précise de l'année. Si les observations ne sont pas répétées chaque année, si la période saisonnière d'observation varie de façon notable d'une année à l'autre (c.-à-d. d'un mois ou plus en été), ou si l'emplacement géographique s'est modifié d'une année à l'autre, nous serons moins en mesure de fournir une description fiable des conditions moyennes et, en fin de compte, de l'état d'un écosystème.

Dans une région pauvre en données comme l'Arctique canadien, arriver à établir une distinction fiable entre un changement progressif et les influences de la variabilité cyclique représente un défi de taille. L'océan Arctique canadien s'étend sur 4 millions de km², ce qui équivaut à 41 % de la superficie terrestre du Canada. Puisqu'il s'agit d'une région où les conditions océaniques varient de façon considérable (étude de cas 1), il était important que le présent rapport tienne compte de chaque zone géographique pour laquelle un ensemble d'observations donné était représentatif ou pertinent. La taille d'une zone varie en fonction des variables d'intérêt, de sa profondeur et des caractéristiques géographiques (plateau, pente, bassin, détroit, etc.) qui y sont associées.

En tenant pleinement compte des lacunes dans les données et les connaissances, de la variabilité environnementale et des défis liés à l'étendue de cette région, notre rapport sur l'état de l'océan Arctique présente : 1) les moyennes et les tendances statistiquement significatives relatives aux composantes des écosystèmes pour lesquelles il existe des données adéquates; 2) les connaissances actuelles de la structure et du fonctionnement de l'océan Arctique, qui sont fondées sur des études scientifiques récentes et sur les connaissances inuites recueillies. Notre rapport fait état des connaissances actuelles portant sur les cinq dernières années. Les conditions actuelles sont décrites en fonction de thèmes clés, notamment les liens avec l'habitat, la saisonnalité, la biodiversité, la variabilité des écosystèmes, la connectivité et les processus écosystémiques côtiers.

1.2 Limites de la région visée par le rapport sur l'océan Arctique



Figure 1. Frontières de la région de l'océan Arctique canadien et des zones dont il est question dans le rapport sur l'état de l'océan Arctique.

Le présent rapport se concentre sur une région immense (51-86° de latitude nord, figure 1) qui englobe les cinq biorégions marines de l'Arctique (MPO, 2009) définies par le MPO dans le cadre du plan de conservation. L'étude de cas 1 décrit les caractéristiques et les enjeux uniques de cette vaste région géographique. Le présent rapport met principalement l'accent sur les habitats marins et les espèces marines, mais il comprend également des connaissances pertinentes sur les espèces anadromes (p. ex. les ombles). Alors que nous présentons les connaissances actuelles de chacune des cinq biorégions, l'information proviendra inévitablement davantage des régions plus accessibles et de leurs zones d'intérêt. Les emplacements dont il est question dans les messages clés sont indiqués à la figure 1. L'état des écosystèmes des régions côtières et l'emplacement des collectivités de l'Arctique canadien sont abordés à la section 7. Les données côtières sont généralement recueillies dans un rayon de 5 km du littoral, ne dépassant pas l'isobathe de 20 m. Dans les régions côtières de l'Arctique, qui sont généralement les plus éclairées par le savoir inuit, les données et les connaissances recueillies proviennent souvent des programmes de surveillance communautaires.

Le présent rapport souligne que la région arctique canadienne est reliée aux océans Pacifique et Atlantique, et qu'elle fonctionne dans un système plus vaste que l'Arctique (figure 2). Toutefois, les tendances et les conditions observées dans la région arctique canadienne ne sont pas nécessairement les mêmes que dans les autres régions de l'Arctique.

La « région arctique canadienne » décrite dans ce rapport ne délimite pas les frontières de la nouvelle région de l'Arctique du MPO. Le terme « région arctique canadienne » désigne la zone

d'étude du présent rapport, qui comprend une partie de l'océan Arctique ainsi que le plateau continental polaire canadien, la baie de Baffin et le complexe de la baie d'Hudson.



Figure 2. Connectivité entre la région arctique canadienne et les régions arctiques et subarctiques avoisinantes.

ÉTUDE DE CAS 1 : En quoi la région arctique canadienne est-elle si particulière?



Figure 3. Vue de la région arctique canadienne depuis l'espace (source : MODIS).

L'océan Arctique est le plus petit des océans et compte pour moins de 1 % du volume total des océans de la Terre. À la différence des autres océans, l'océan Arctique constitue un bassin semi-fermé qui est entouré de masses terrestres, n'étant relié aux océans Pacifique Nord et Atlantique Nord qu'à quelques endroits. Comparativement aux autres océans, l'océan Arctique est touché de façon disproportionnée par le débit fluvial, alors qu'environ 10 % de l'eau des fleuves de la Terre se déverse le long de ses vastes plateaux continentaux. Il en résulte d'importants gradients en ce qui concerne les propriétés biogéochimiques du système plateau-bassin, ce qui influence sur la répartition et l'abondance des ressources marines, comme on peut l'observer dans la région arctique canadienne (Monier et coll., 2014; Coupel et coll., 2015; Ardyna et coll.,

2017). L'océan Arctique diffère également des autres océans par l'extrême saisonnalité des conditions où, sous l'effet des gradients latitudinaux, l'hiver est marqué par des froids extrêmes et des journées plongées dans la noirceur 24 heures par jour pendant plusieurs mois, alors que l'été, les températures montent au-dessus de zéro et il fait clair 24 heures par jour.

L'Arctique canadien est une région vaste aux caractéristiques physiques diversifiées (tableau 1). Cette région s'étend sur plus de 30° de latitude, du sud de la baie James (51° N.) jusqu'à la zone économique exclusive (ZEE) du Canada, au large d'Alert, au Nunavut (86° N.). La région arctique canadienne englobe une grande variété d'écosystèmes, notamment : le plateau du Mackenzie, une vaste plate-forme dont la productivité biologique est alimentée par de grands apports fluviaux; le bassin arctique, un habitat oligotrophe; l'archipel arctique canadien, constitué d'îles entourées d'une série de canaux étroits, de seuils et d'eaux peu profondes ; la baie de Baffin, un bassin profond dont la taille est relativement petite; et la baie d'Hudson, une mer semi-fermée. Dans la région arctique canadienne, le temps de séjour des eaux de surface (jusqu'à une centaine de mètres sous la surface) est plutôt court (Rudels 1986), depuis l'entrée des eaux du Pacifique dans la mer de Beaufort jusqu'à leur sortie par la baie de Baffin, et au sud, vers la mer du Labrador. Pendant cette période de transition, les nutriments disponibles dans l'eau soutiennent l'ensemble de l'écosystème marin, depuis les plus petites algues jusqu'aux niveaux trophiques les plus élevés. L'une des principales caractéristiques de l'océan Arctique, la glace de mer, est omniprésente dans la région arctique canadienne, malgré la grande étendue latitudinale de cette région. Fait important, la glace de mer joue un rôle clé dans la biodiversité, l'écologie et les cycles biochimiques de la région arctique canadienne, en plus d'être un élément essentiel de la culture autochtone.

Les espèces qui peuplent la région arctique canadienne ont su s'adapter à la présence de la glace de mer, mais aussi en profiter. Certaines espèces sont aussi spécialement adaptées à la saisonnalité extrême de la région. Par exemple, le phytoplancton s'est adapté physiologiquement aux 24 heures d'ensoleillement par jour des mois d'été grâce à une augmentation de ses pigments de photoprotection (Neukermans et coll., 2016). De plus, la vie prolifère même pendant la longue période d'obscurité hivernale (Berge et coll., 2009; Darnis et coll., 2017). Durant l'été, de nombreuses espèces d'oiseaux et de mammifères marins migrent vers l'Arctique canadien pour se reproduire et se nourrir de ses abondantes ressources marines (Hauser et coll., 2017a).

Tableau 1. Caractéristiques physiques de la région arctique canadienne.

Zone océanique de la région arctique canadienne	Près de 4 millions de km ² , soit l'équivalent de 41 % de la masse terrestre du Canada
Zone océanique canadienne sus-jacente au plateau continental	3,2 millions de km ² , excluant les îles
Ligne de côte (continentale)	Plus de 176 000 km (du Yukon au Labrador), soit plus de 70 % de toutes les côtes canadiennes
Collectivités	58 collectivités, soit plus de 70 000 personnes, dont la plupart sont des Inuits
Îles	94 grandes îles (plus de 130 km ²) et approximativement 36 470 petites îles, dont la superficie totale cumulée est de 1,4 million de km ² . L'île de Baffin est 18 fois plus grande que l'île de Vancouver.
Glace de rive	L'archipel arctique canadien abrite la plus vaste étendue de glace de rive de l'Arctique.
Glace pluriannuelle	En été, la région arctique canadienne renferme 1,12 million de km ² de glace pluriannuelle (selon les données de 2015, excluant la frontière nord de l'archipel arctique canadien), soit environ 30 % de la superficie totale de glace pluriannuelle dans tout l'océan Arctique.

L'Arctique subit actuellement de profondes transformations liées au réchauffement climatique et à un développement économique accru. Dans plusieurs régions de l'Arctique, l'un des changements les plus drastiques est sans doute le déclin rapide de la glace de mer, qui concerne autant l'étendue et le type de glace de mer que la durée de la couverture de la glace, ce qui entraîne des répercussions en cascade dans l'ensemble des réseaux trophiques. Ce déclin de la glace de mer ne s'est pas produit au même rythme dans les différentes régions de l'Arctique canadien (p. ex. Howell et coll., 2008). En effet, pour la période de 1968 à 2015, des tendances à la baisse statistiquement significatives ont été observées dans toutes ces régions en ce qui concerne l'étendue minimale de glace de mer annuelle, allant d'une diminution de 3 % par décennie dans le bassin de Kane (au nord de la baie de Baffin) à une diminution de 17 % par

décennie dans le nord de la mer du Labrador (Environnement et Changement climatique Canada, 2016). Les tendances régionales actuelles de la glace de mer sont décrites à la section 5.2.

Dans la région arctique canadienne, les périodes d'eaux libres sont désormais plus longues. La saison des eaux libres étant plus longue, les producteurs primaires seront de plus en plus des organismes pélagiques proliférant dans les eaux libres. (Ardyna et coll., 2014). Par ailleurs, une plus grande transmission de la lumière en raison de la couche de glace plus mince peut stimuler le potentiel de floraison phytoplanctonique sous la glace (Arrigo et coll., 2012; Assmy et coll., 2017; Johnsen et coll., 2018), modifiant l'emplacement et le moment de cette production ainsi que la prévisibilité des ressources primaires, ce qui a une incidence pour les brouteurs et les ressources halieutiques. Des changements touchant la répartition et l'abondance des principales espèces, qui se dispersent sur de plus grandes étendues, entraînent des effets en cascade sur les interactions entre les espèces qui ont été observés à différents endroits à l'échelle de la région arctique canadienne. Ces changements modifient l'architecture des écosystèmes marins de l'Arctique, ce qui rend nécessaire la mise en place d'un réseau étendu d'observatoires océaniques et une surveillance globale afin d'éclairer la gestion adaptative des ressources ainsi que les mesures de conservation.

2.0 Messages clés

Dans l'Arctique, depuis le milieu des années 1960, la température de l'air en surface a augmenté deux fois plus rapidement que le taux moyen à l'échelle mondiale, notamment sous l'effet des émissions de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre d'origine humaine.

L'écosystème marin adapté aux glaces de l'Arctique réagit à de nombreux changements environnementaux, en particulier à la diminution de l'étendue et de l'épaisseur de la glace de mer et aux fluctuations des durées saisonnières. De façon directe ou indirecte, la variabilité du climat et les changements climatiques ont déjà eu d'importantes répercussions sur les écosystèmes de l'Arctique, et continueront d'en avoir dans un avenir prévisible.

La région arctique canadienne faisant partie du système de l'océan Arctique, on y retrouve les mêmes éléments moteurs et les mêmes facteurs de stress que dans le reste de l'Arctique, mais les réactions à ces facteurs varient entre les lieux géographiques (p. ex. entre le centre de l'océan Arctique et la mer de Barents). Ainsi, les tendances et les généralisations relatives à une autre région de l'océan Arctique ne décrivent pas nécessairement l'état de la région arctique canadienne.

Notre connaissance des changements écologiques qui se sont opérés dans la région arctique canadienne au cours de la dernière décennie s'appuie sur des sources autochtones et scientifiques. Toutes ces sources révèlent que les conditions varient de façon importante d'une année à l'autre, d'une décennie à l'autre et entre les régions de l'Arctique canadien. La grande variabilité naturelle qui caractérise les milieux marins arctiques limite notre capacité de cerner les changements que subissent les composantes physiques, chimiques ou biologiques de l'écosystème. Cette variabilité naturelle complique également notre compréhension des mécanismes de changements. Alors que la surveillance des océans constitue, depuis plusieurs décennies, un élément solide de la gestion des océans Atlantique et Pacifique du Canada, on ne pourrait pas en dire autant de la région arctique canadienne, ce qui rend difficile toute évaluation exhaustive de l'état et des tendances de cet écosystème.

Dans le cadre du présent rapport, nos messages clés sur l'état de la région arctique canadienne se divisent en deux catégories : 1) la connaissance des conditions de base relatives à la biodiversité, à l'utilisation de l'habitat, aux points névralgiques écologiques et à la connectivité des écosystèmes; 2) les changements observés dans les écosystèmes de l'Arctique qui constituent des effets en cascade découlant des changements dans la glace de mer. La première catégorie fait état de l'insuffisance de données exhaustives sur les conditions de base ayant trait à la structure des écosystèmes, aux liens entre les réseaux trophiques, aux processus écosystémiques et à la variabilité des systèmes dans la plus grande partie de la région arctique canadienne. La deuxième catégorie fait état du fait que la majorité des changements écosystémiques documentés sont liés aux changements de la glace de mer.

Messages clés concernant les progrès réalisés dans la compréhension de base

- Les efforts collectifs et soutenus déployés par les scientifiques et les peuples autochtones n'ont pas encore produit les connaissances globales adéquates permettant d'orienter la gestion en lien avec les changements écosystémiques dans la région arctique canadienne. À

l'échelle de l'Arctique canadien dans son ensemble, les connaissances de base sont inégales et ont été recueillies de façon sporadique au fil du temps. Le savoir inuit, qui est le plus à même de fournir une perspective continue et de longue durée, se limite généralement aux régions côtières.

Biodiversité

- Si nos connaissances de la biodiversité des composantes clés des écosystèmes (c.-à-d. les algues adaptées à la glace, les invertébrés benthiques et les poissons marins) se sont élargies au cours des dernières années, ces connaissances ne sont pas exhaustives à l'échelle spatiale, et encore moins à l'échelle temporelle (variations interannuelles et interdécennales). Les évaluations locales ont facilité l'identification d'habitats et de régions benthiques uniques (p. ex. l'estuaire Churchill) qui sont vulnérables à l'introduction de nouvelles espèces par des navires ou d'autres facteurs. Nous disposons aussi de plus en plus de renseignements sur la capacité des espèces arctiques de s'adapter aux changements, nous permettant d'évaluer la résilience des écosystèmes marins de l'Arctique canadien.

Écosystèmes côtiers

- Les programmes de surveillance communautaires permettent graduellement de compiler de nouvelles données sur les mouvements et la répartition de poissons anadromes et côtiers le long des rives de la mer de Beaufort, de la région de Kitikmeot au centre du Nunavut et de la baie de Baffin ainsi que les fjords adjacents. La présence et l'abondance du saumon du Pacifique (espèce *Oncorhynchus*) font également l'objet d'un suivi dans l'ouest de l'Arctique canadien, aux points les plus éloignés de leur aire de répartition.
- La surveillance communautaire nous permet d'élargir la fenêtre d'observation saisonnière des écosystèmes côtiers. Cette surveillance, qui s'est principalement concentrée sur l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) et le béluga (*Delphinapterus leucas*) – deux espèces importantes pour les collectivités – consiste aussi depuis tout récemment à recueillir des observations environnementales. Les connaissances inuites ont également guidé le choix des mesures à utiliser dans les programmes de surveillance (p. ex., les indicateurs de la santé et de l'état corporel des bélugas dans l'ouest de l'Arctique canadien).

Habitat

- Une corrélation solide a été établie entre la profondeur de l'eau et la présence de poissons marins (au large) dans la mer de Beaufort et la baie de Baffin, alors que certaines espèces (p. ex., la morue polaire [*Boreogadus saida*]) préfèrent les zones de transition entre les masses d'eau, ce qui indique que les changements dans la structure de la colonne d'eau se traduisent pour plusieurs espèces par des changements dans la disponibilité de l'habitat.

Connectivité

- Des observations continues ont maintenant montré que les eaux qui affluent du Pacifique vers l'Arctique par le détroit de Bering sont devenues plus acides, ce qui met en évidence la connectivité des facteurs de stress entre les océans.
- Des études télémétriques sur un grand nombre de prédateurs marins mobiles ont révélé la dynamique du flux énergétique au sein de l'Arctique canadien, y compris les points névralgiques précis de l'écosystème en été et en automne par rapport à l'hiver et au printemps. De telles données révèlent la dynamique du flux énergétique ainsi que les connectivités spatiales et temporelles des habitats qui pourront servir à guider les efforts de conservation.
- La surveillance des espèces migratoires très mobiles (p. ex., le béluga, le flétan du Groenland (*Reinhardtius hippoglossoides*) et le goéland argenté [*Larus argentatus*]) permet de déterminer à quel endroit et à quel moment l'énergie (c'est-à-dire la productivité) pénètre dans la région arctique canadienne et en ressort. Les stratégies et les voies migratoires diffèrent entre les espèces et les individus d'une même espèce. Le fait de connaître les différences en matière de connectivité contribue à mieux évaluer les effets des changements environnementaux et des activités humaines dans les milieux de reproduction et d'alimentation de l'Arctique et dans les aires d'hivernage éloignées.
- Le fait de connaître les déplacements des poissons marins et les séparations génétiques éclaire les stratégies de gestion des espèces pêchées, dont le flétan du Groenland et le sébaste (espèce *Sebastes*), ainsi que les stratégies de conservation des espèces rares et des populations à risque, dont le loup de mer (espèce *Anarhichas*). Contrairement aux autres taxons, les habitudes de déplacement des poissons marins de l'Arctique canadien ne sont pas directement influencées par la glace de mer, car ces poissons réagissent plutôt à la température de l'eau et à la répartition des autres espèces.

Variabilité

- La détection des changements dans l'environnement et dans les écosystèmes de la région arctique canadienne est entravée par d'importantes variations d'une année à l'autre et d'une décennie à l'autre, de même que par les variabilités spatiales. Pour pouvoir faire la distinction entre la variabilité et le changement avec un certain niveau de confiance, on doit normalement disposer de séries de données échelonnées sur 20 ans. Puisque de telles bases de données de longue durée ne sont généralement pas disponibles, des programmes de surveillance à long terme appropriés seront nécessaires.
- Dans la région arctique canadienne, la principale source d'éléments nutritifs favorisant la productivité marine est une couche d'eau qui provient du Pacifique et qui se situe à une profondeur d'environ 150 m. Les endroits où cette couche s'élève plus près de la zone d'ensoleillement stimulent la productivité primaire. Au cours des 15 dernières années, cette couche d'eau a été poussée plus loin vers les profondeurs du centre de la mer de Beaufort, alors qu'elle a plutôt été poussée vers le haut dans les eaux peu profondes du plateau

continental et de la pente de la mer de Beaufort. La réaction des producteurs primaires aux changements touchant l'approvisionnement en nutriments s'opère à l'échelle locale et régionale, avec de possibles hausses de la production primaire dans le plateau continental de la mer de Beaufort.

Messages clés concernant les réactions écosystémiques aux changements de la cryosphère :

Quels sont les changements qui s'opèrent dans le système de glace?

- Si l'on examine l'Arctique dans son ensemble, à la fin de l'été, la portion de glace de mer a diminué d'environ 40 % au cours des 20 dernières années, ce qui touche à la fois les mers périphériques de l'Arctique et ses bassins centraux. La diminution de l'épaisseur moyenne de la banquise arctique, qui est composée d'une combinaison de glace pluriannuelle et saisonnière, se rattache au fait qu'une grande partie de la glace pluriannuelle plus épaisse a été remplacée par de la glace saisonnière.
- La portion de glace à la fin de l'hiver a aussi diminué d'environ 10 %, ce phénomène ayant surtout touché les mers subarctiques (d'Okhotsk, de Béring, du Labrador, du Groenland, de Barents) et les baies (d'Hudson, de Baffin, du Saint-Laurent).
- Dans l'Arctique canadien, l'épaisseur de la glace sur la partie nord du plateau continental polaire semble avoir peu changé par rapport aux années 1970. Malgré la disparition d'une grande partie de la vieille glace de mer épaisse de la région centrale de l'océan Arctique, le vent dominant continue de pousser ce qu'il en reste vers les eaux canadiennes, soit dans l'est du bassin Canada et le nord du plateau continental polaire. Dans l'Arctique canadien, la persistance du vent dominant favorise la survie d'un écosystème associé à la glace qui est unique sur Terre.
- Les changements qui s'opèrent dans la zone de glace de mer saisonnière varient à l'échelle de la région arctique canadienne. En général, la glace se dissipe désormais plus tôt au cours de l'été (c.-à-d. qu'elle fond et se brise) et se reforme plus tard en automne. Il en résulte, dans l'ensemble, un allongement de la période d'eaux libres.
- Il existe très peu de données sur l'épaisseur de la glace saisonnière. Toutefois, selon ce que suggèrent les données recueillies depuis un demi-siècle sur la glace fixée de la région côtière, ainsi que les seules données de longue durée compilées au sujet de la banquise saisonnière (sur 28 ans dans le sud de la mer de Beaufort), l'épaisseur de la glace pourrait avoir diminué de 10 cm par décennie, comparativement à une perte de 40 cm par décennie dans le bassin Canada (calculée sur 11 ans entre 2006-2017). Ces observations portent à croire que la glace des plateaux continentaux réagit différemment aux changements climatiques que la vieille glace des profonds bassins de l'océan Arctique.
- Au Nunavut, les connaissances inuites font état de changements relatifs à l'emplacement des limites de dislocation des glaces dans la région de Baffin depuis les 10 dernières années. Cependant, puisque le caractère et la stabilité de la glace fixée subissent fortement les effets variables des tempêtes, des courants de marée, de la chaleur océanique et des accumulations

de neige, il demeure pour l'instant difficile de conclure que les changements observés constituent un changement de régime.

- Principalement le long des côtes de l'ouest de l'Arctique canadien, la fonte du sol à forte teneur en glace accélère l'effondrement des rives et l'érosion côtière, ce qui modifie les habitats côtiers et la turbidité des eaux, en plus de rendre le carbone terrestre accessible aux réseaux trophiques marins.

Les changements qui s'opèrent dans la glace de mer influent sur le moment où les événements se produisent, ce qui peut avoir des répercussions sur l'ensemble des réseaux trophiques.

- Les changements observés relatifs à la saison des glaces ont une incidence sur le moment où se produit la période de production primaire maximale (c.-à-d. la floraison phytoplanctonique), en plus d'altérer la dynamique des nutriments, agissant ainsi sur le fondement même du réseau trophique océanique. Aucune surveillance n'a été effectuée au fil du temps par rapport aux changements relatifs des nutriments et à la floraison phytoplanctonique, ou concernant l'incidence de ces changements sur les brouteurs de zooplancton et les larves de poisson, dont l'alimentation doit se coordonner à la période de floraison.
- Au cours des 25 dernières années, dans le détroit d'Hudson, le raccourcissement de la saison des glaces a permis à des bélugas de migrer plus tôt dans la baie d'Hudson et de la quitter plus tard, passant ainsi plus de temps dans leur aire d'été.
- La migration de l'omble chevalier vers les eaux marines de l'ouest de l'Arctique canadien se produit également plus tôt dans l'année en raison de la débâcle printanière plus précoce le long des côtes. Les poissons sont ainsi en mesure de s'alimenter plus longtemps dans le système marin, ce qui a une incidence positive sur le cycle biologique et la dynamique des populations.
- Parmi les principaux changements écosystémiques liés à la variabilité de la glace de mer, les poissons prédateurs et les mammifères marins se nourrissent davantage de diverses espèces de poissons fourrages, dont le capelan (*Mallotus villosus*) et le lançon (*Ammodytes* sp.).
- Une transition distincte s'est opérée dans la baie Cumberland en raison de la période d'eaux libres de plus en plus longue, alors qu'on a observé une modification des trajets du flux énergétique et du rôle des poissons prédateurs au sein de la chaîne alimentaire. Parmi ces changements au sein du réseau trophique, on observe une plus grande utilisation du phytoplancton au lieu des sources d'énergie à base d'algues de glace.
- Les changements et la variabilité de la glace de mer ont entraîné une diminution de la qualité et de la disponibilité des proies de certaines espèces, entraînant un déclin de leur état corporel. Par exemple, des ours polaires (*Ursus maritimus*) sont contraints de se nourrir d'œufs d'oiseaux marins depuis la terre ferme au lieu des espèces de phoques qui dépendent de la glace.

- Des études sur les biotraceurs révèlent que plusieurs réseaux trophiques différents font partie de la diète de certaines espèces clés. Les algues de glace constituent une importante source de nourriture pour de nombreuses espèces à l'échelle des différents niveaux trophiques, et l'utilisation du carbone terrestre par les espèces marines est bien documentée dans la région ouest de l'Arctique.

Les changements qui s'opèrent dans la glace de mer influencent l'habitat de façon directe (c.-à-d. en tant que plateforme) et indirecte (en agissant sur la structure et la stabilité de la colonne d'eau).

- En raison de la débâcle extrêmement précoce, le phoque annelé (*Pusa hispida*) n'est plus en mesure de compléter sa mue (perte et repousse de ses poils), ce qui le prédispose à la maladie. De plus, en raison des températures océaniques plus élevées, les phoques peuvent souffrir d'hyperthermie, ce qui entraîne un comportement inhabituel les rendant plus vulnérables à la prédation par les ours polaires. Par exemple, en 2010, les températures anormalement chaudes se sont traduites par un déclin de l'état corporel des phoques annelés de la baie d'Hudson, réduisant l'ovulation, le taux de survie des petits et l'abondance, et augmentant les facteurs de stress dans les années suivantes.
- Les données de satellite indiquent qu'une plus grande étendue d'eaux libres dans la région arctique canadienne entraîne annuellement une augmentation des taux de productivité primaire. Par contre, on a aussi observé des tendances à la baisse de la production primaire dans certaines régions (p. ex. les eaux du Nord) en raison de différents facteurs influant sur la disponibilité des nutriments dans les eaux de surface.
- L'observation des déplacements saisonniers du flétan du Groenland a montré que chaque automne, dans la baie Cumberland et à l'inlet Scott, lorsque la glace fixée dans la région côtière s'étend au-dessus des habitats moins profonds, des individus se déplacent vers ces eaux moins profondes (c.-à-d. qu'ils quittent des profondeurs de 800 à 1400 m vers des profondeurs de 400 à 600 m). Le poisson n'interagit pas directement avec la glace de mer, mais il réagit aux changements dans la colonne d'eau ou à la distribution des autres espèces.
- L'amincissement de la glace de mer et une augmentation de l'étendue des mares de fonte créent un habitat d'eau de surface où une quantité suffisante de lumière disponible est favorable à une hausse de la floraison phytoplanctonique sous la glace. Ces changements relatifs à la période et à l'emplacement de la floraison influent sur la disponibilité des nutriments pour la production primaire estivale, en plus de modifier le transfert énergétique à l'échelle des réseaux trophiques marins.

Les changements qui s'opèrent dans la glace de mer influent sur l'accès du biote et l'accès humain aux zones couvertes de glace et, à plus grande échelle, aux zones libres de glace.

- Le déclin de la population de l'ours polaire dans la baie d'Hudson est attribuable à une réduction de l'étendue de la glace de mer, réduisant la disponibilité des phoques, ce qui entraîne un déclin de l'état corporel de l'ours. La présence accrue de l'ours polaire sur les rives a aussi un effet négatif sur le comportement de nidification de l'eider à duvet

(*Somateria mollissima*), ses œufs étant vulnérables à la prédation de ce dernier. On s'attend toutefois à ce que cet effet négatif sur l'eider à duvet soit compensé par de meilleures conditions d'alimentation créées par la diminution de la glace de mer.

- Dans l'est de l'Arctique canadien, la réduction de la glace de mer a permis aux épaulards (*orcinus orca*) d'avoir un meilleur accès régional et temporel aux proies des mammifères marins de l'Arctique canadien (dont la baleine boréale [*Balaena mysticetus*], le narval [*Monodon monoceros*], le béluga et le phoque). Le déclin de la glace de mer dans la région de l'Arctique permet aussi à des espèces comme le phoque du Groenland (*Pagophilus groenlandicus*) de se déplacer vers le nord et de s'alimenter dans des zones auxquelles il n'avait pas accès en raison de la glace de mer. Ces changements, comme d'autres changements qui s'opèrent dans les répartitions géographiques en raison de l'état des glaces, ont des répercussions sur la concurrence et la prédation, qui ont à leur tour une incidence sur la migration et la répartition des espèces endémiques de l'Arctique, principalement dans l'est de l'Arctique canadien.
- Pour toutes les collectivités côtières de l'Arctique, l'accès des humains à la glace de mer est essentiel à la chasse et aux autres utilisations des terres, y compris la subsistance et la pêche commerciale. Pour ces peuples autochtones, les changements qui s'opèrent dans la glace de mer présentent une problématique très sérieuse, notamment en matière de sécurité, de déplacement, de sécurité alimentaire et en ce qui concerne les coûts.
- Le prolongement de la saison des eaux libres favorise une croissance du trafic maritime dans la région arctique canadienne, d'où une présence accrue des navires de croisière et des embarcations de plaisance. On s'attend à ce que le transport maritime accru au cours d'une plus longue saison produise à certains endroits des environnements marins plus bruyants, en plus d'augmenter le risque d'introduire des espèces envahissantes et potentiellement conduire à une augmentation des dommages environnementaux. Les pêches commerciales au large des côtes pourraient quant à elle profiter des plus longues périodes d'eaux libres, prolongeant la saison de pêche dans les zones actuellement exploitées, et créant de nouvelles possibilités dans les zones qui n'étaient jusqu'alors pas ouvertes assez longtemps pour susciter de l'intérêt.

3.0 Facteurs de stress des écosystèmes de l'océan Arctique

Dans l'Arctique, plusieurs facteurs peuvent modifier l'état (c.-à-d. les conditions moyennes et/ou la variabilité) des écosystèmes marins. Ces facteurs au sein d'un système sont considérés soit comme des **éléments moteurs** (d'origine naturelle), soit comme des **facteurs de stress** (d'origine anthropique). Plusieurs sont d'avis que les changements climatiques sont le plus important facteur de stress anthropique qui affecte l'Arctique canadien. Les changements climatiques produisent des effets qui s'étendent à l'extérieur du domaine de la variabilité naturelle, tant sur le plan temporel (p. ex., saisons, années, décennies) que sur le plan spatial (p. ex., échelle locale, régionale, de l'Arctique). Le défi que pose la grande envergure des changements climatiques tient du fait qu'il englobe une multitude de variables dans différents domaines (p. ex., atmosphérique, physique, chimique, habitat, etc.), en plus d'être lié, de façon directe ou indirecte, à tous les autres facteurs de stress anthropiques qui affectent le milieu marin. Cette interconnexion représente un défi de taille pour la gestion des océans et des ressources, car même en combinant les connaissances scientifiques et inuites de l'Arctique, ces dernières demeurent insuffisantes : 1) pour faire la distinction entre la variabilité naturelle et les changements induits par le climat; et 2) pour aborder adéquatement les effets individuels et cumulatifs des changements climatiques et d'autres facteurs de stress, ainsi que leur nature (effets additifs, synergiques) et leurs résultats.

Les effets des changements climatiques dans l'Arctique canadien sont ultimement liés à l'augmentation rapide de la température de l'air à l'échelle mondiale, les océans absorbant approximativement 93 % du déséquilibre énergétique créé par la libération de gaz à effet de serre d'origine anthropique (Cheng et coll., 2019). Par conséquent, les océans du monde se réchauffent, tout particulièrement les eaux de surface, ce qui a une incidence sur la concentration d'oxygène dans l'eau des océans, la violence des tempêtes, le niveau de la mer et le cycle hydrologique. On observe une amplification de ce réchauffement dans l'Arctique, alors que les températures de l'air augmentent deux fois plus rapidement que la moyenne mondiale. Dans l'Arctique, de 2014 à aujourd'hui, les températures moyennes annuelles (selon les stations terrestres au nord de 60° N.) ont dépassé les températures moyennes enregistrées dans l'Arctique depuis 1900. Selon les données de satellite, dans certaines régions libres de glace de l'Arctique durant le mois d'août, la température à la surface de la mer a augmenté à un rythme pouvant atteindre 1 °C par décennie depuis 1981, et ce, en raison d'une combinaison de facteurs, y compris une diminution de l'étendue de la glace de mer, une augmentation du rayonnement solaire absorbé et une hausse du transport horizontal de la chaleur océanique (Osborne et coll., 2018).

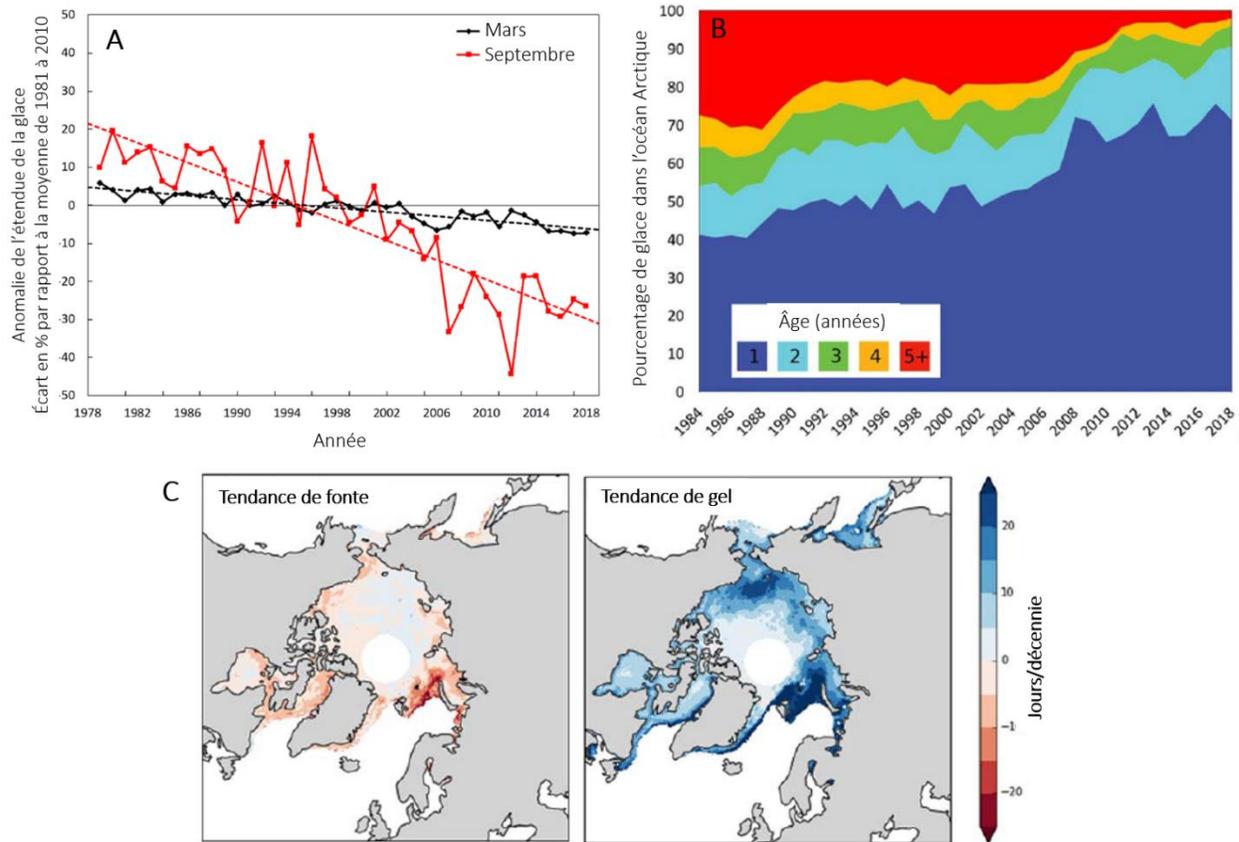


Figure 4. Tendances de la glace de mer à l'échelle de l'Arctique : A) anomalies de l'étendue de glace de mer en mars et en septembre par rapport aux conditions moyennes pour cette même période de 1981 à 2010; B) déclin de la glace de mer pluriannuelle épaisse (excluant le plateau continental polaire canadien), d'où une couverture de glace de mer plus mince et plus jeune dans l'Arctique; C) débâcle se produisant plus tôt et englacement se produisant plus tard dans l'année (1929-2017) (sources : Perovich et coll., 2018; Stroeve et Notz, 2018).

Les données de satellite recueillies sur l'étendue de la glace de mer dans l'ensemble de l'Arctique au cours des 40 dernières années (1978-2010), fournissent un point de référence à partir duquel un déclin rapide de la glace de mer en été (moyenne mensuelle de septembre) a été observé (12,8 % par décennie; figure 4a). Une perte très importante de glace de mer estivale s'est produite dans l'Arctique en 2007 et en 2012. Toutefois, dans les années plus récentes, les conditions sont demeurées constantes et sous la moyenne (figure 4a). La plus grande variabilité et les principales pertes de glace de mer estivale ont été observées dans les mers de Sibérie orientale, de Chukchi, de Beaufort, de Laptev et de Kara (Stroeve et Notz, 2018). La glace de mer à l'échelle de l'Arctique est de plus en plus jeune et, en moyenne, de plus en plus mince, alors que le Haut-Arctique canadien abrite une fraction importante de ce qu'il reste de la glace pluriannuelle plus épaisse. Les pertes globales de la vieille glace, qui est plus épaisse, sont frappantes. En avril 2018, on estimait que seulement 2 % de la glace de mer hivernale, en excluant le plateau continental polaire canadien, était âgée de plus de 5 ans, comparativement à environ 30 % en 1984 (figure 4b). La perte de la glace épaisse est compensée par une

augmentation de la glace de mer de première année, qui constitue une couverture de glace plus fragile et mobile dans l'Arctique. La perte de glace de mer est maintenant évidente toutes les saisons, et la saison des eaux libres continue de s'allonger (figure 4c). En 2016-2017, à l'échelle de l'Arctique, l'englacement s'est produit 17 jours plus tard qu'en moyenne. Quelle que soit la saison, la perte de glace de mer dans l'Arctique est fortement corrélée aux émissions anthropiques totales de CO₂ (Stroeve et Notz, 2018). La perte de glace de mer causée par les activités humaines (**facteurs de stress**) est également amplifiée par la variabilité climatique (**élément moteur**). Ensemble, ces facteurs d'origine humaine et naturelle modifient le forçage atmosphérique et océanique sur la glace de mer, ce qui en réduit indirectement l'étendue, la concentration et l'épaisseur.

Les éléments moteurs et les facteurs de stress à grande échelle du système arctique interagissent avec d'autres facteurs de stress au sein de la région arctique canadienne (p. ex., tableau 2). Ces facteurs de stress varient d'une région à l'autre, tout comme les façons d'en assurer la gestion. Il est possible d'atténuer raisonnablement certains facteurs de stress grâce à une gestion et/ou intendance appropriées (p. ex., pêches durables, espèces envahissantes; section 3.1), tandis que d'autres facteurs (p. ex., les microplastiques) sont envahissants et possiblement néfastes. Les études de cas 2, 3 et 4 fournissent des renseignements sur les facteurs de stress que sont l'acidification des océans, le réchauffement climatique et le bruit ambiant dans l'Arctique canadien. Le tableau 2 fournit des détails sur d'autres facteurs de stress locaux (p. ex., les pêches commerciales) et transfrontaliers (p. ex., les contaminants, les microplastiques et le transport maritime) susceptibles d'avoir une incidence sur les écosystèmes de l'Arctique.

Tableau 2. Situation actuelle de certains facteurs de stress anthropiques ayant une incidence directe sur les écosystèmes marins de l'Arctique canadien.

Facteur de stress	Situation actuelle	Références récentes
Transport maritime	<ul style="list-style-type: none"> - La distance parcourue par les navires a triplé de 1990 à 2015; le trafic de bateaux de plaisance et de tourisme ayant connu le plus grand essor. - Les régions de l'inlet Pond, du lac Baker, de la baie Cambridge et de l'inlet Chesterfield ont connu les plus fortes augmentations du transport maritime, tandis que Churchill et Resolute ont connu une baisse de l'activité maritime. - Dans certaines régions, l'augmentation du transport maritime est fortement corrélée à une réduction des concentrations de glace de mer. - Des efforts de gestion (p. ex., couloirs de navigation) sont en cours. 	Pizzolato et coll., 2016; Dawson et coll., 2018; Halliday et coll., 2018; Hauser et coll., 2018; PAME, 2019
Microplastiques	<ul style="list-style-type: none"> - Les concentrations de microplastiques dans les eaux de l'Arctique canadien sont relativement faibles par rapport à d'autres régions de l'Arctique (soit entre 0 et 5 g/km²). - Des particules de plastique sont concentrées dans la glace de mer de l'Arctique. - De nombreux programmes de recherche portent actuellement sur la présence de microplastiques dans l'Arctique et ses effets sur les réseaux trophiques. 	Obbard et coll., 2014; Cozar et coll., 2017; Peeken et coll., 2018; Barrows et coll., 2018; Osborne et coll., 2018
Contaminants	<ul style="list-style-type: none"> - Malgré la réglementation internationale, les polluants organiques persistants du passé continuent d'être retrouvés dans l'organisme des superprédateurs de l'Arctique (p. ex., ours polaires, bélugas). - Les changements climatiques influent sur les concentrations de contaminants chez les espèces du niveau trophique supérieur, ayant une incidence sur leur évolution dans l'environnement et les voies de transport (p. ex., courants océaniques) ainsi que sur les réseaux trophiques (p. ex., longueur du réseau trophique, guildes), ce qui affecte les processus de bioaccumulation et de bioamplification de contaminants comme le mercure et les polluants organiques persistants. Les résultats varient entre les régions, entre les espèces et au sein d'une même espèce. - On retrouve de nouveaux produits chimiques préoccupants dans les eaux et le biote de l'Arctique, dont plusieurs ne sont encadrés par aucun système de réglementation et nécessitent une surveillance continue. 	Loseto et coll., 2015; AMAP, 2017; AMAP, 2018a; Brown TM et coll., 2018; Daugaard-Petersen et coll., 2018; Letcher et coll., 2018; Noël et coll., 2018; Smythe et coll., 2018
Production d'hydrocarbures	<ul style="list-style-type: none"> - Dans une déclaration commune de 2016, le Canada et les États-Unis ont décrété un moratoire (interdiction de forage) sur les côtes de l'Arctique, qui sera revu tous les cinq ans dans le cadre d'un examen scientifique. Les droits existants n'étaient pas concernés par ce moratoire. Les eaux de l'Alaska ont par la suite été rouvertes, en 2017, aux fins de développement. 	

	<ul style="list-style-type: none"> - En 2017, Affaires autochtones et du Nord Canada et Ressources naturelles Canada ont amorcé un processus de consultation concernant les intérêts pétroliers et gaziers à long terme dans les eaux arctiques du Canada. - Actuellement, dans l'Arctique canadien, les permis d'exploration en vigueur couvrent environ 27 000 km² et les licences de découverte importante couvrent environ 2 250 km², majoritairement situés dans la région désignée des Inuvialuit. 	
Pêches	<ul style="list-style-type: none"> - La plus importante pêche au poisson de fond du Canada est située dans l'Arctique (déroit de Davis et baie de Baffin). - Entre 2006 et 2014, la valeur totale des pêches commerciales du Nunavut est passée de 38 M\$ à 86 M\$ (dollars canadiens). En 2017, on estimait la valeur des pêches commerciales de l'Arctique canadien à 174 M\$ (soit 102 M\$ pour la pêche au flétan du Groenland et 72 M\$ pour la pêche à la crevette nordique). 	Plan de gestion intégrée des pêches (PGIP); données non publiées
Récolte de subsistance	<ul style="list-style-type: none"> - La récolte de subsistance fait partie des écosystèmes marins de l'Arctique depuis des millénaires et n'est pas perçue comme exerçant un plus grand stress aujourd'hui qu'à l'époque. 	

3.1 Introduction d'espèces dans l'Arctique – modélisation et évaluation des risques

Puisque l'introduction d'espèces non indigènes dans l'Arctique présente une menace émergente, le Conseil de l'Arctique a recommandé des stratégies pour limiter les risques (CAFF et PAME, 2017). Le transport maritime est le principal vecteur de l'introduction d'espèces non indigènes, car de vastes communautés d'organismes prolifèrent dans les eaux de ballast déchargées ou dans l'encrassement biologique à la surface des navires (Ruiz et Carlton, 2003), ce qui est d'autant plus préoccupant dans un océan Arctique plus chaud et facile d'accès (Dawson et coll., 2018; Goldsmit et coll., 2018). Étant donné la quantité limitée de ressources et de renseignements dont on dispose sur la région très vaste et souvent éloignée qu'est l'Arctique, les méthodes de modélisation et d'évaluation des risques sont des moyens utiles de cerner les risques potentiels et d'établir les priorités relatives aux voies d'entrées, aux espèces et aux zones géographiques dans le but d'en assurer la gestion et la surveillance. Dans l'Arctique canadien, où peu de cas d'introductions d'espèces marines envahissantes sont connus (Goldsmit et coll., 2019a), ces méthodes ont été utilisées pour évaluer les voies de transport maritime et les espèces envahissantes connexes qui posent un risque pour la région (Chan et coll., 2012; Goldsmit et coll., 2018, 2019a, 2019b).

Les risques relatifs que posent les différentes voies de transport maritime (p. ex., le transport international par rapport au transport intérieur du Canada) quant à l'introduction d'espèces non indigènes dans les ports de l'Arctique par le biais des eaux de ballast ou de l'encrassement des coques ont été comparés à l'aide des données sur l'arrivée des navires et le rejet des eaux de ballast (figure 5), la compatibilité environnementale entre les ports sources et les ports arctiques, ainsi que le nombre d'espèces non indigènes à fort impact dont la présence est connue dans les écorégions associées aux ports connectés (Chan et coll., 2012). Cette évaluation a permis de déterminer les ports qui posaient un risque élevé, lesquels ont par la suite été ciblés par des

enquêtes de suivi initiales et des programmes de surveillance communautaire (Goldsmith et coll., 2014; Lacoursière-Roussel et coll., 2018) (étude de cas 18).

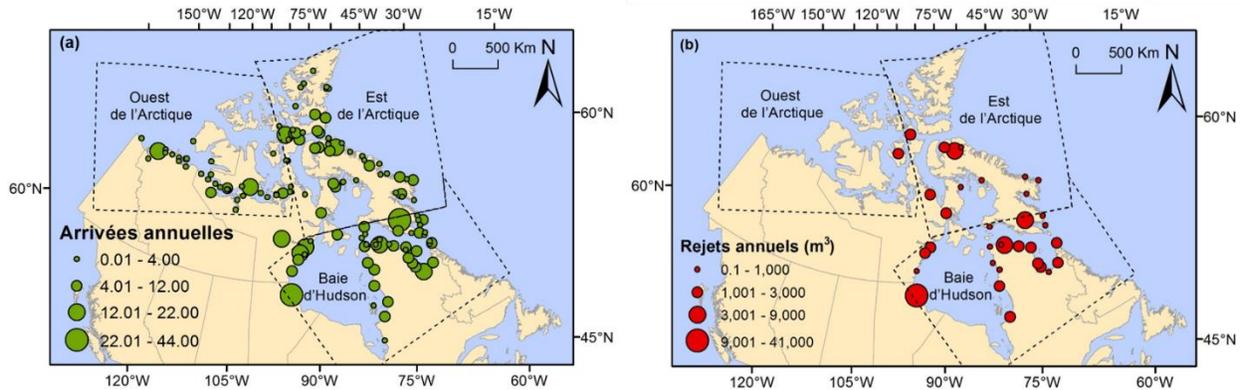


Figure 5. Total annuel des arrivées de navires (a) et des rejets d’eaux de ballast (b), corrigé pour tenir compte de l’échange d’eau de ballast en haute mer entre 2005 et 2008 dans l’Arctique canadien (source : Chan et coll., 2012).

La modélisation de la répartition des espèces a permis de prévoir l’étendue de l’habitat adéquat dans l’Arctique canadien dans l’éventualité où le transport maritime devait introduire des envahisseurs invertébrés benthiques dont la présence est connue dans les ports connectés (Goldsmith et coll., 2018, 2019b). Ces méthodes ont montré que les régions de la mer de Beaufort et de la baie d’Hudson sont particulièrement vulnérables, car on prévoit, dans les conditions actuelles, un habitat adéquat pour trois des huit espèces évaluées (Goldsmith et coll., 2018, 2019b) (figure 6). Les espèces identifiées comme posant un risque élevé ont été présentées dans le cadre d’ateliers éducatifs et incluses aux listes de surveillance faisant partie du matériel de sensibilisation qui est actuellement distribué aux collectivités autochtones (étude de cas 18).

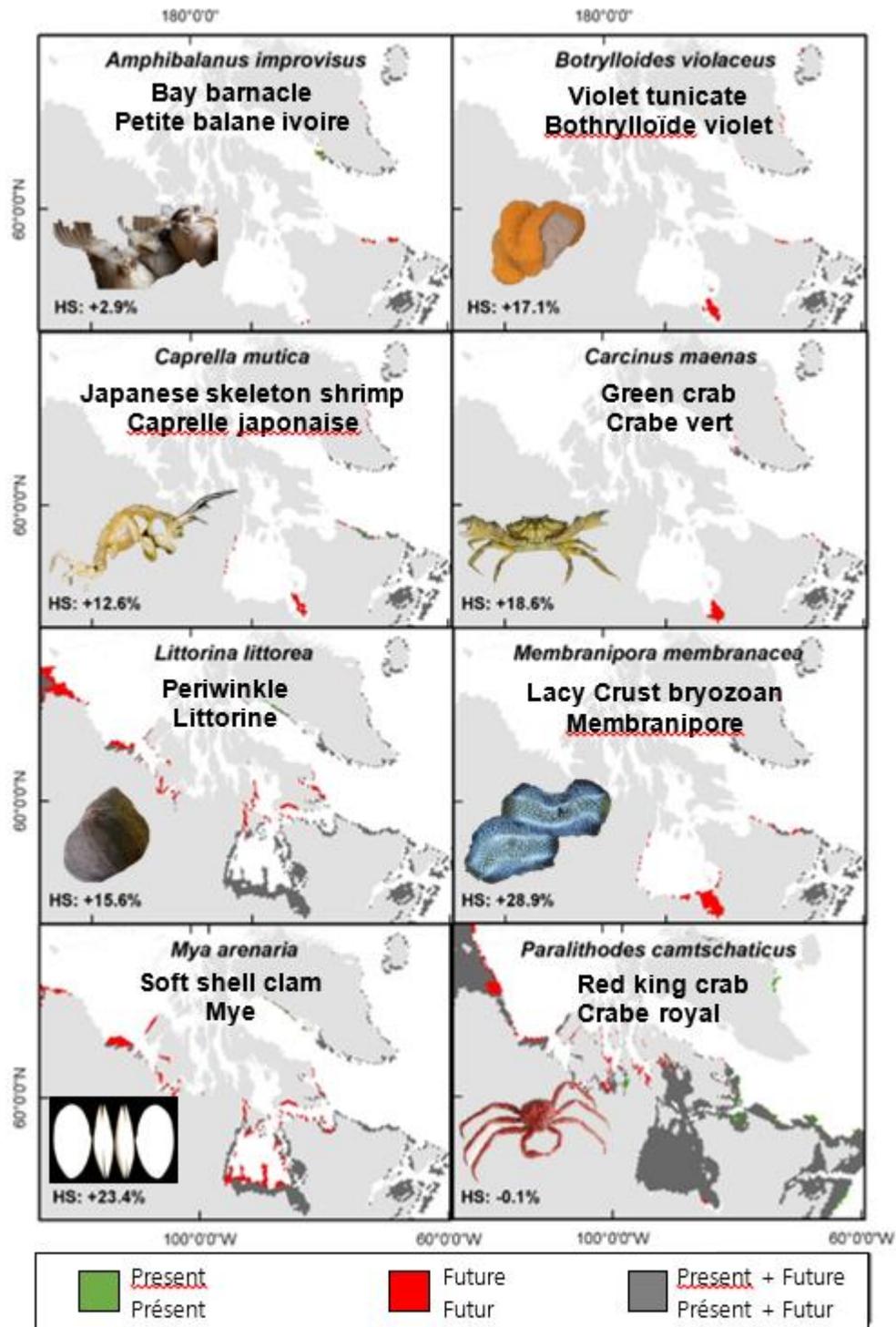


Figure 6. Préviction d'un habitat adéquat pour accueillir huit espèces exotiques envahissantes possibles dans l'Arctique canadien, selon les conditions environnementales actuelles et futures. La variation du pourcentage prévu de chaque habitat adéquat entre aujourd'hui et 2050 est indiquée dans le coin inférieur gauche de chaque case (source : adapté de Goldsmit et coll., 2018).

ÉTUDE DE CAS 2 : Acidification de l'océan Arctique canadien

La concentration de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère augmente. Par conséquent, la planète se réchauffe et la composition chimique de l'océan se modifie. En se dissolvant dans les eaux de surface des océans, le CO_2 forme de l'acide carbonique, qui entraîne à son tour une diminution du pH de l'océan (le pH est la mesure de l'acidité, un pH plus faible étant plus acide) et de la concentration l'ions carbonates (CO_3^{2-}), un élément constitutif des organismes marins dont la coquille ou le squelette est composé de carbonate de calcium (CaCO_3), ces organismes étant appelés les « organismes calcifiants ». L'acidification de l'océan désigne une diminution du pH et de la concentration d'ions carbonates en raison d'une augmentation des quantités de CO_2 provenant des activités humaines (CO_2 anthropique) qui sont dissoutes dans l'eau de l'océan. Depuis le début de la Révolution industrielle, les océans du monde ont absorbé environ le quart de la production de CO_2 anthropique, cela ayant entraîné une hausse d'environ 30 % du taux d'acidité en surface des océans. Les coquilles et les squelettes composés de CaCO_3 sont plus solubles à basse température, et la solubilité des gaz, y compris le CO_2 , est également plus élevée en eau froide qu'en eau chaude. Ainsi, même si l'acidification des océans constitue une menace mondiale, les océans polaires sont particulièrement vulnérables. De plus, les grandes quantités d'eau douce qui se déversent dans l'océan Arctique en provenance des rivières, de la fonte saisonnière des glaces et de la fonte des glaciers n'ont qu'un faible pouvoir tampon et contribuent aussi, de façon naturelle, à réduire le pH et les concentrations d'ions carbonates dans les eaux de l'océan Arctique. La réduction de la couverture de glace augmente également l'absorption du CO_2 atmosphérique, ce qui accélère davantage l'acidification de l'océan Arctique.

Les premières observations de l'état corrosif des eaux de surface de l'océan Arctique pour les organismes calcifiants (en examinant l'état de saturation de CaCO_3 [Ω]), ont été faites en 2008 dans le bassin Canada (Yamamoto-Kawai et coll., 2009) et en 2005 sur le plateau continental polaire canadien (Chierici et Fransson, 2009). Depuis, les éléments probants d'une hausse continue de l'acidification des eaux arctiques canadiennes continuent de s'accumuler. Des études ont révélé que des conditions corrosives peuvent se produire dans les régions subissant l'influence des glaciers et de l'eau douce, par exemple les fjords (baie Cumberland; Turk et coll., 2016) et dans la baie d'Hudson (Azetsu-Scott et coll., 2014; Burt et coll., 2016). Dans la mer de Beaufort, le fleuve Mackenzie contribue de façon importante à une dessalure de l'eau de surface. Cependant, les eaux corrosives du plateau du Mackenzie se situent dans les couches d'eau inférieures qui proviennent de l'océan Pacifique (Cross et coll., 2018; Mol et coll., 2018). L'acidification de l'halocline des eaux du Pacifique est un phénomène relativement récent qui a été observé sur une période de 10 ans (de 1975 à 1985) et qui devrait persister le long de la rupture de pente continentale pendant environ 80 % de l'année (Cross et coll., 2018). Les conditions d'acidification des eaux plus profondes adjacentes au plateau du Mackenzie sont apparues entre 1990 et 2010 (Miller et coll., 2014; AMAP, 2018b), mais on ignore s'il s'agit de conditions persistantes. Les eaux de surface du bassin canadien sont devenues plus acides depuis 2003 (figure 52), tandis que les eaux corrosives se trouvent à la sortie du détroit de Davis (figure 64) vers l'océan Arctique, sans qu'une tendance évidente ait été observée.

Le volume d'eau corrosive dans l'océan Arctique augmente au fil du temps (Miller et coll., 2014; Qi et coll., 2017), réduisant l'étendue de l'habitat adéquat pour les organismes calcifiants

(Steiner et coll., 2015). Les effets néfastes de l'acidification des océans sur les organismes non calcifiants, y compris sur les systèmes physiologiques, reproducteurs et immunitaires, ainsi que des changements comportementaux, ont été observés dans d'autres océans. À l'heure actuelle, nous n'avons qu'une connaissance limitée des diverses réactions biologiques à l'acidification des océans polaires. Une étude récente a révélé que les petites limaces de mer pélagiques (ptéropodes, *Limacina helicina*) recueillies en 2014 et 2017 au cap Bathurst et dans les échancrures du golfe Amundsen présentaient des niveaux élevés de dissolution de leur coquille en raison des eaux acidifiées (A. Niemi, données non publiées) (figure 7). À notre connaissance, il s'agit de la première preuve directe de l'acidification de l'océan dans les eaux arctiques canadiennes. Cependant, plusieurs autres études et évaluations des effets biologiques sont en cours (AMAP, 2018b).

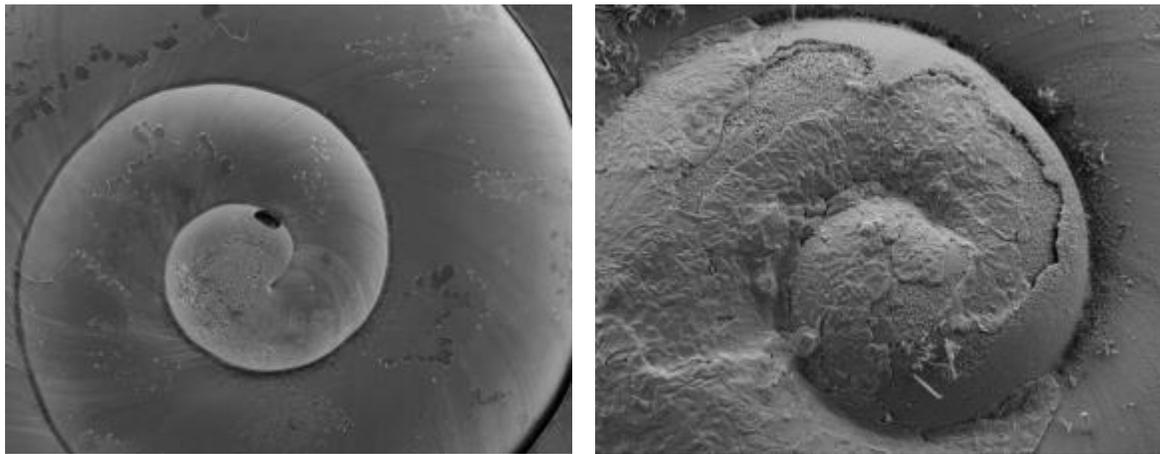


Figure 7. Images obtenues par microscope électronique de coquilles de limace de mer recueillies dans la mer de Beaufort présentant des signes de dommages causés par l'acidification de l'océan (crédit photo : Nina Bednaršek).

L'acidification de l'océan Arctique canadien évolue le long de ses voies d'écoulement. L'eau du Pacifique qui pénètre dans l'Arctique par le détroit de Béring contient naturellement une concentration élevée de CO₂ provenant de la décomposition du carbone organique porté par la circulation des eaux à l'échelle mondiale. Cette eau est acidifiée encore davantage par l'écoulement du fleuve Mackenzie, la décomposition des matières organiques terrestres, l'eau de fonte de la glace de mer, la productivité primaire des plateaux, l'absorption du CO₂ par les eaux de surface et la remontée des eaux corrosives profondes (de l'Atlantique) vers le plateau de la mer de Beaufort et dans le bassin Canada. Cette eau corrosive traverse l'archipel arctique canadien puis s'écoule vers la baie de Baffin, pouvant être retracée en aval jusqu'au plateau continental du Labrador (Azetsu-Scott et coll., 2010; Yamamoto-Kawai et coll., 2013). Étant donné la grande variabilité régionale et la rapidité des changements temporels dans l'Arctique (p. ex., Tynan et coll., 2016), des efforts coordonnés sont nécessaires pour étudier l'acidification de l'océan, ce qui doit comprendre des campagnes d'évaluations sur de grands territoires et de la surveillance à long terme dans les régions critiques afin de protéger ces régions, d'y atténuer les effets éventuels de l'acidification et de favoriser l'adaptation à ces changements.

ÉTUDE DE CAS 3 : Les changements du paysage sonore de l'Arctique

Le paysage sonore se décrit comme l'ensemble des sons que peut percevoir un animal dans un environnement. Le paysage sonore de l'Arctique canadien devient-il plus bruyant? Pour répondre à cette question, nous devons tenir compte de deux sources : le bruit naturel (ou ambiant) et le bruit d'origine humaine. Dans l'océan Arctique, le bruit ambiant est produit par des sources physiques (p. ex., le vent, les précipitations, la glace de mer) et biologiques (p. ex., les mammifères marins et les poissons).

Les animaux marins produisent des sons sous l'eau pour plusieurs raisons, dont la communication et la navigation. Pendant la saison de l'accouplement, certaines espèces de poissons produisent des sons durant le frai et la parade nuptiale. Entre la fin du mois d'avril et du mois de novembre, la baleine boréale (*Balaena mysticetus*) produit des chants longs et complexes, concentrés entre 30 Hz et 5 kHz (Delarue et coll., 2009) en plus d'émettre des appels plus simples à moins de 500 Hz (p. ex., Blackwell et coll., 2013). Dans une étude, les sons de la baleine franche mesurés près de l'Alaska pouvaient, selon les conditions de bruit, être détectés jusqu'à une distance de 40 km (Abadi et coll., 2014; Bonnel et coll., 2014) et à une distance incroyable de 130 km au Groenland (Tervo et coll., 2012). Les sons émis par les baleines à dents de l'Arctique, soit le narval (*Monodon monoceros*) et le béluga (*Delphinapterus leucas*), ne voyagent pas aussi loin (p. ex., moins de 5 km), ces baleines communiquant en émettant des clics d'écholocation, des sifflements et des sons pulsés. Il y a aussi dans l'Arctique plusieurs espèces de phoques qui produisent des sons sous-marins associés à la reproduction et à la territorialité. On entend surtout ces sons au cours des saisons d'accouplement. Le morse produit des clics, des crissements, des sons de cloche et des grognements. Les vocalisations enregistrées dans le cadre de la surveillance du bruit ambiant près de Sachs Harbour (Territoires du Nord-Ouest) en 2015 et 2016 (Halliday et coll., 2018) (figure 8) et près de Hall Beach (Nunavut) en 2012-2013 (Marcoux et coll., 2017) ont montré un lien étroit entre les vocalisations de plusieurs espèces et la glace de mer, reflétant les phénologies de migration et d'utilisation de l'habitat.

La glace de mer produit différentes fréquences de bruit ambiant lorsqu'elle se déplace, se fissure et se compacte pour former des crêtes (Kinda et coll., 2015). Pendant la période des eaux libres, le bruit ambiant est généralement associé positivement à l'état de la mer. Dans l'Arctique, les vents puissants contribuent à augmenter le bruit ambiant, bien que ce dernier soit grandement modulé par les conditions de glace (Insley et coll., 2017). Le bruit ambiant du vent, en interférant avec un signal ou en le bloquant, peut masquer le son des vocalisations des mammifères marins (p. ex. le béluga et la baleine boréale). On observe toutefois qu'une augmentation des concentrations de glace peut réduire cet effet de masquage du vent (Halliday et coll., 2018). Il est possible que les changements qui s'opèrent dans la glace de mer et dans les vents en raison du climat aient une incidence sur le niveau de bruit ambiant et ses interactions avec les vocalisations.

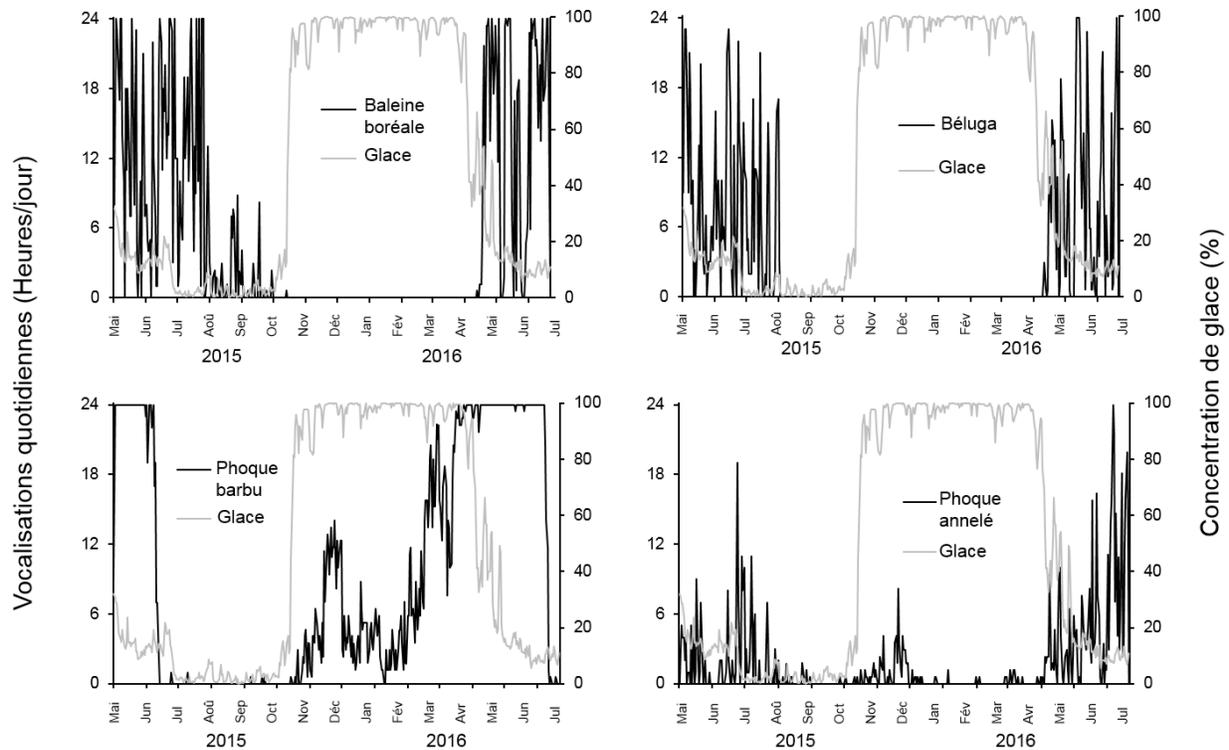


Figure 8. Schéma saisonnier des vocalisations de mammifères marins près de Sachs Harbour (T.N.-O.) par rapport aux concentrations de glace de mer (source : Halliday et coll., 2018).

Les activités humaines comme le transport maritime, la prospection sismique, l'extraction, la construction et la démolition, ainsi que les opérations militaires (le sonar) et le déglacage produisent également des sons sous-marins. Lors de la migration des espèces, les sons très forts que produisent, par exemple, les canons à air utilisés pour la prospection sismique pourraient avoir de graves conséquences, bloquant les appels des baleines boréales et pouvant causer leur empêchement (Blackwell et coll., 2013; Heide-Jørgensen et coll., 2013a). Dans le cadre d'un exercice de modélisation du bruit dans l'ouest de l'Arctique canadien, il a été déterminé que les mammifères marins pouvaient être affectés par le bruit d'un pétrolier à environ 50 km de distance. Les brise-glaces constituent aussi un type de transport maritime bruyant, et leur bruit augmente d'environ 10 dB lors des manœuvres de recul ou d'éperonnage par rapport au bruit de la navigation en eau libre (Roth et coll., 2013; PAME, 2019). La diminution de la glace de mer et l'allongement de la saison de navigation entraînent une hausse du trafic maritime dans l'océan Arctique (Dawson et coll., 2018). Une plus longue durée de la saison de navigation ainsi que l'augmentation du trafic maritime peuvent se traduire par un paysage sonore qui est plus bruyant pour les mammifères marins durant différents événements de la vie, y compris les migrations. Aulanier et coll. (2017) ont calculé les changements du bruit ambiant qui découleraient d'un trafic maritime 10 fois supérieur dans quatre régions arctiques différentes (golfe Amundsen, bassin Foxe, détroit d'Hudson et détroit de Lancaster). Ils ont conclu que si le trafic maritime devait augmenter de dix fois, le bruit des navires deviendrait le principal facteur de bruit ambiant dans ces régions. Il s'agirait d'un changement très important, sachant que dans les conditions actuelles, le transport maritime ne produit qu'un bruit ambiant intermittent. Or, une importante

augmentation des exportations par navire des minéraux provenant de mines actives de l'Arctique canadien a été proposée (Baffinland, 2018).

Le bruit d'origine humaine peut s'avérer problématique en produisant des fréquences sonores qui chevauchent celles des vocalisations des espèces marines, ce qui peut avoir des répercussions sur le comportement et la communication des mammifères marins (PAME, 2019). Le bruit d'origine humaine peut masquer les appels des animaux et réduire leur espace de communication (Pine et coll., 2018). Par exemple, des calculs ont montré que le bruit émis par un brise-glace pouvait masquer la communication des bélugas dans un rayon de 14 à 71 km du navire (Erbe et Farmer, 2000). L'impact du bruit sous-marin sur les mammifères marins et les poissons dans l'Arctique canadien a récemment été résumé dans le rapport du groupe de travail PAME intitulé *Underwater Noise in the Arctic: A State of Knowledge Report* (PAME, 2019; en anglais seulement). Les répercussions varient d'une espèce à l'autre et dépendent des activités des individus au moment de la perturbation (p. ex., période de reproduction ou de migration). De récentes recherches télémétriques menées à la baie Resolute (Nunavut) ont révélé que la morue polaire (*Boreogadus saida*) et le Chaboisseau à épines courtes (*Myoxocephalus scorpius*) modifiaient leur domaine vital et leurs mouvements en présence de navires, même lorsque les navires étaient stationnaires (Ivanova, 2016; Ivanova et coll., 2018). Devant l'augmentation du trafic maritime dans la région arctique canadienne, des travaux sont en cours pour en comprendre les effets sur le paysage sonore (Aulanier et coll., 2017) et pour déterminer les meilleurs moyens d'atténuer les effets du transport maritime en tenant compte de la vitesse des navires (Pine et coll., 2018) et du positionnement des couloirs de navigation dans l'Arctique (Halliday et coll., 2017).

ÉTUDE DE CAS 4 : Le phoque annelé et le déclin de la glace de mer

L'un des grands événements de l'histoire des changements climatiques est la perte de la glace de mer dans les régions polaires, et plus particulièrement la perte d'habitats essentiels pour les mammifères. Au cours des deux ou trois dernières décennies, les mammifères marins étudiés dans la mer de Beaufort ont réagi différemment aux changements liés à l'étendue et à la persistance de la glace de mer. L'état des jeunes baleines boréales (*Balaena mysticetus*) s'est amélioré avec le temps, tandis que celui des phoques annelés (*Pusa hispida*) et des bélugas (*Delphinapterus leucas*) s'est détérioré (Harwood et coll. 2015a). Toutefois, des questions subsistent quant aux causes réelles de ces réponses divergentes et à ce que ces réponses signifient pour une espèce ou un écosystème marin donné. Une étude récente menée dans l'Arctique canadien portait sur les changements démographiques (p. ex. perturbation de la reproduction, faible survie des petits, mortalité élevée) des populations de phoques annelés (figure 9) liés aux facteurs de stress environnementaux.



Figure 9. Phoque annelé sur la glace de mer (photo : relevé des phoques de la National Oceanic and Atmospheric Administration, domaine public, photo tirée de Wikimedia Commons).

La saisonnalité de la glace de mer est essentielle pour les phoques annelés. Ils ont besoin de glace de mer au printemps pour la mue, longue période où ils perdent leur fourrure et leur peau pour développer un nouveau pelage, ainsi que pour la reproduction. Pendant la saison estivale sans glace, ils se nourrissent en eaux libres et accumulent leurs réserves de graisse. Pendant l'hiver, ils donnent naissance et allaitent, mais sont désormais limités à de plus petites étendues de glace. Les phoques sont bien adaptés au caractère saisonnier de la glace de mer, mais la couverture de glace diminue en raison du réchauffement climatique. Ferguson et ses collaborateurs (2017) ont examiné les phoques annelés de la baie d'Hudson, l'une des régions les plus au sud de leur aire de répartition, ainsi que l'étendue de la glace de mer. La région traverse un cycle complet de perte et de reformation de la glace (figure 10).

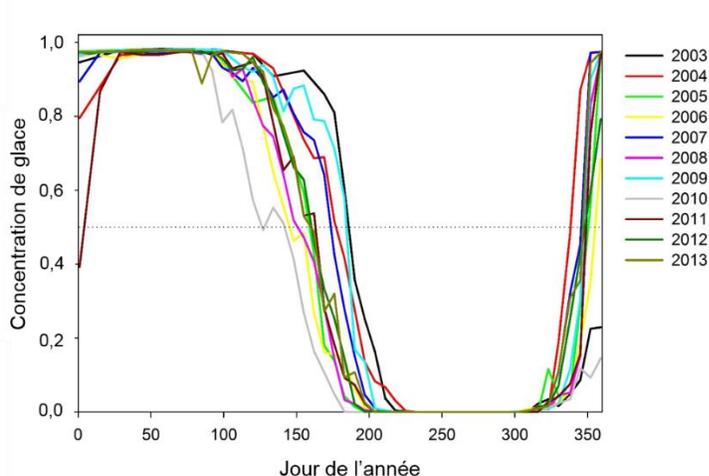


Figure 10. Concentration de glace de mer pour chaque jour de l'année de 2003 à 2013 dans la baie d'Hudson. Les différentes couleurs représentent les différentes années. La concentration de 50 % est indiquée par la ligne horizontale pointillée et est considérée comme le point de rupture de la débâcle (< 50 %) et du gel (> 50 %). Remarquez notamment les années indiquées en gris (la plus faible concentration de 2010 à gauche) et en mauve (la plus faible concentration de 2011 à droite) [source : Ferguson et coll. 2017].

En analysant les données sur la glace de mer et le climat, il est apparu évident que la débâcle se produit de plus en plus tôt et le gel de plus en plus tard dans la baie d'Hudson, ce qui indique que la saison des glaces est de plus en plus courte. Entre 1979 et 2014, il n'y a eu aucun lien entre les indices climatiques et les dates de la débâcle ou du gel. Cela signifie que le raccourcissement de la saison de glace de mer n'est pas lié aux régimes climatiques naturels, mais qu'il est vraisemblablement le résultat direct des changements climatiques d'origine humaine. La plus longue saison sans glace s'est produite en 2010, année où la débâcle est survenue en mai et où les eaux n'ont pas regelé avant janvier 2011 (figure 10).

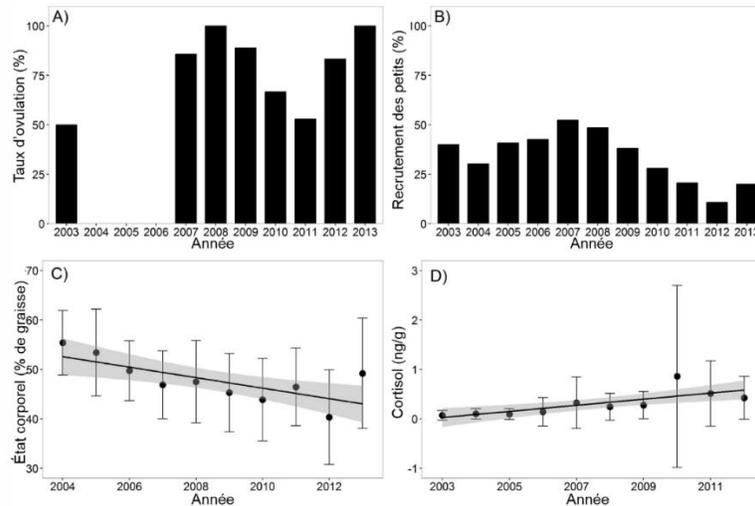


Figure 11. a) Taux annuel d'ovulation pour chaque année (notez le faible taux enregistré en 2011), b) Pourcentage annuel de petits dans le prélèvement (représentation du recrutement des petits; notez la récente tendance à la baisse), c) Relation entre l'état corporel du phoque et l'année (notez la baisse), d) Relation entre le niveau de cortisol (stress) et l'année (notez la hausse au fil du temps) [source : Ferguson et coll. 2017].

En examinant l'état corporel, l'état de reproduction, le recrutement des petits et le niveau de stress de 1 425 phoques capturés dans le cadre de la chasse de subsistance des Inuits dans la baie d'Hudson entre 2003 et 2013, on a constaté que l'état corporel du phoque annelé est passé de 55 % de petit lard en 2004 à seulement 40 % en 2012, mais que cette proportion est remontée à 48 % en 2013. La détérioration de l'état corporel était liée au prolongement de la période sans couverture de la glace (saison de glace de mer plus courte). La concentration de cortisol (une mesure du stress) a augmenté avec le temps chez les phoques annelés. En 2010, les taux de cortisol étaient élevés et montraient une grande variabilité. Les taux d'ovulation ont été faibles l'année suivante (2011), ce qui est probablement attribuable au fait que les phoques annelés ont été soumis à un stress élevé en 2010 (figure 11).

Que signifient ces changements et peut-on dresser un portrait d'ensemble de la situation? Cette étude montre que le déclin de l'état corporel du phoque annelé coïncide avec le déclin de la glace de mer, l'une des nombreuses conséquences des changements climatiques. L'étude établit en outre une relation entre l'événement climatique de 2010 et les changements démographiques liés aux populations de phoques annelés, car l'état corporel des individus s'est détérioré, les phoques ont été stressés et le taux d'ovulation des femelles a diminué, ce qui a entraîné une diminution du nombre de petits (figure 12) dans les années suivantes. Cet événement climatique est lié à des

régimes climatiques à grande échelle qui indiquent que les cycles à climat contrôlé continueront d'avoir une incidence sur l'état corporel et les caractéristiques démographiques des phoques. Dans la baie d'Hudson, l'état des phoques s'est quelque peu amélioré au cours des années suivant 2010. Toutefois, la cohorte de 2010 sera peu nombreuse en raison des conditions extrêmes observées cette année-là.



Figure 12. Blanchon annelé (crédit photo : Shawn Dahle, NOAA, Polar Ecosystems Program research cruise, domaine public, tiré de [Wikimedia Commons](#)).

Par quel mécanisme la perte de glace de mer (ou d'autres facteurs) a-t-elle entraîné la détérioration de l'état corporel et l'augmentation du stress du phoque annelé? Le prolongement de la période sans couverture de la glace en 2010 pourrait avoir nui à l'accès des phoques annelés aux proies ainsi qu'à l'abondance et à la répartition des proies. L'élévation des températures de la mer vers la fin de l'automne pourrait avoir entraîné une hyperthermie chez les phoques gras et les phoques échoués sur les rives. Les phoques présentaient également des signes de léthargie anormale, ce qui peut indiquer la présence d'une maladie susceptible d'avoir été causée par l'interruption de la mue. La maladie a pu à son tour augmenter le risque de prédation par les ours polaires (*Ursus maritimus*) (figure 13). On voit donc que le mécanisme qui est à l'origine de la détérioration de l'état corporel du phoque pendant les longues périodes sans couverture de la glace n'est pas encore bien compris.

Selon les modèles atmosphériques à long terme, des événements épisodiques comme celui de 2010 devraient se produire tous les 10 à 15 ans, mais de façon imprévisible. C'est la combinaison de la perte graduelle de glace de mer causée par les changements climatiques et de ces événements épisodiques imprévisibles qui est la plus susceptible d'avoir des répercussions majeures sur l'état corporel des phoques annelés et, à long terme, sur leur abondance et leur répartition.

Cette recherche fournit de plus amples renseignements sur ce que nous réserve l'avenir, mais il demeure difficile de faire des prévisions. D'autres recherches seront nécessaires pour déterminer quel est le mécanisme à l'origine du déclin de l'état corporel entraîné par la perte de la glace de mer, comment les populations de phoques s'adapteront aux changements climatiques et comment les écosystèmes plus vastes seront touchés à leur tour.



Figure 13. Ours polaire mangeant un phoque capturé sur le rivage au nord de Churchill, en octobre 2010, une année inhabituelle où des phoques annelés étaient sortis de l'eau et s'étaient aventurés près des ours polaires en attendant le retour de la glace de mer (photo credit: Daryl Hedman).

4.0 Structure de l'écosystème de l'océan Arctique

Les sections qui suivent présentent le contexte de l'écosystème pour comprendre le fonctionnement de l'océan Arctique canadien. Un tel contexte est nécessaire pour détecter et expliquer les changements observés. Les composantes physiques (section 4.1) et chimiques (section 4.2) de l'écosystème marin créent des habitats dynamiques pour tout le biote. Il n'existe pas de réseau trophique unique pour les écosystèmes de l'océan Arctique canadien, et des recherches récentes ont montré que certains réseaux trophiques sont en train d'être modifiés à mesure que les espèces réagissent à l'évolution des habitats et des proies (section 4.3, études de cas 6 et 7). La structure et la fonction des écosystèmes de l'océan Arctique canadien varient selon les échelles spatiales et nous décrivons ici les liens connus entre les types d'habitats et la vie marine (section 4.4, études de cas 8 et 9). De plus, l'Arctique fonctionne différemment au fil du temps, à de multiples échelles temporelles (de jours à décennies). Ici, nous ne parlons que de l'échelle saisonnière (section 4.5) en démontrant qu'un cycle annuel de l'Arctique est mieux compris du point de vue des événements plutôt que du calendrier.

4.1 Où vit la vie : L'environnement océanique de l'Arctique

4.1.1 Limites océanographiques de l'Arctique

La lisière de la glace de mer à son étendue maximale à la fin de mars constitue la délimitation la plus simple de l'Arctique marin. Cette limite correspond également à l'étendue maximale des eaux de surface froides et à faible salinité de l'Arctique au printemps. Elle englobe les bassins centraux profonds de l'océan Arctique, les plateaux continentaux peu profonds qui l'entourent et les lobes qui s'étendent vers le sud dans les océans Pacifique et Atlantique. Le lobe dans le domaine canadien s'étend aussi loin au sud que Terre-Neuve.

4.1.2 Le paysage sous-marin

Les eaux de l'océan sont empilées en couches. Celles dont la densité est la plus faible se trouvent à la surface, et celles qui présentent la plus forte densité la plus élevée se trouvent dans le fond marin. Comme il faut de l'énergie pour faire remonter l'eau plus dense vers la surface, les crêtes sur le fond marin ont tendance à bloquer l'écoulement de l'eau de mer et les vallées, à canaliser. Le paysage sous-marin limite donc la façon dont l'eau de mer peut se déplacer, ce qui rend la connaissance de ce paysage essentielle à la compréhension de l'environnement océanique. De telles contraintes topographiques sur les courants océaniques influencent les propriétés de l'eau de mer et de la vie planctonique dans des régions particulières de l'Arctique. Les propriétés particulièrement pertinentes pour l'écologie de l'océan sont la température, la salinité, l'oxygène dissous, les nutriments dissous et l'acidité de l'eau de mer. Les associations spécifiques de ces attributs définissent les masses d'eau dans l'Arctique.

Les océanographes utilisent couramment des lignes de contour (courbes bathymétriques) qui relient des points de profondeur constante pour cartographier le paysage du fond marin. Les courbes de niveau se rassemblent là où le fond marin est fortement incliné, par exemple au bord

du plateau continental; elles encerclent des zones isolées d'eau profonde appelées bassins et des zones isolées d'eau peu profonde appelées bancs; elles forment un motif distinctif au niveau des seuils, l'équivalent marin des cols de montagne, qui séparent les zones peu profondes lorsqu'on les observe le long d'un cap et les zones plus profondes lorsqu'on les observe à angle droit. Il est plus facile pour les eaux océaniques profondes de traverser entre les bassins à partir des seuils.

La région de l'Arctique canadien comprend deux bassins profonds, le bassin Canada et la baie de Baffin, séparés par un vaste plateau continental peu profond, le plateau polaire canadien, qui sert de seuil entre le Pacifique et l'Arctique. Un seuil large et relativement profond dans le sud-est sépare la baie de Baffin d'un troisième bassin, le bassin du Labrador. La baie d'Hudson et la baie James occupent une fraction considérable du plateau polaire canadien.

L'histoire glaciaire du plateau polaire canadien l'a laissé jonché d'îles comprenant l'archipel arctique canadien, avec des chenaux et des seuils. Les seuils les plus évidents longent la bordure nord-ouest du plateau polaire canadien et se regroupent près de son centre; les bassins intermédiaires sont aussi profonds que 800 mètres. Les seuils s'élèvent à moins de 300 à 400 mètres de la surface de la mer dans le nord-ouest et beaucoup plus près du centre, à moins de 15 à 220 mètres de la surface. Même les relevés préliminaires des fonds marins sont absents dans de vastes régions de l'Arctique canadien, en particulier dans les régions nordiques glaciaires éloignées et dans les estuaires, les baies et les fjords près des côtes qui sont importants pour les gens dont les moyens de subsistance proviennent de la mer. L'absence de bonnes cartes des fonds marins limite la capacité des scientifiques de comprendre les écosystèmes marins de l'Arctique canadien et leur vulnérabilité.

4.1.3 Sources d'eau de mer

Il y a trois principaux contributeurs d'eau dans la région de l'Arctique canadien, le Pacifique Nord et l'Atlantique Nord qui contribuent l'eau de mer et l'atmosphère qui contribue l'eau douce sous forme de chutes de neige, de pluie et d'afflux des rivières. Ces eaux se distinguent par trois caractéristiques : la salinité, la température et les nutriments dissous qui, en plus de l'oxygène dissous et de l'acidité, sont des éléments clés de l'habitat marin et des facteurs clés qui déterminent quels organismes et où ces organismes pourront prospérer.

L'eau de l'Atlantique a une salinité élevée (34,5 à 34,95) et une température relativement élevée (0 à 3 °C) tout au long de l'année (figure 14). Il existe trois variantes de l'eau de l'Atlantique dans le bassin Canada, soit une couche chaude L'eau de l'Atlantique a une salinité élevée (34,5 à 34,95) et une température relativement élevée (0 à 3 °C) tout au long de l'année (figure 14). Il

existe trois variantes de l'eau de l'Atlantique dans le bassin Canada, soit une couche chaude qui pénètre par le détroit de Fram et une couche plus froide renouvelée toutes les quelques décennies qui pénètre par la mer de Barents, et une épaisse couche au fond du bassin emprisonnée depuis plusieurs siècles. Une quatrième variante pénètre dans les eaux de la région arctique canadienne par la baie de Baffin, mais n'atteint pas le bassin Canada. L'eau du Pacifique a une salinité modérée (31 à 33), plus faible en été qu'en hiver, est chaude (près de 3 °C) en été et froide (près de -1,5 °C) en hiver et présente des concentrations élevées de nutriments dissous (nitrate, phosphate, silicate). L'eau douce a une salinité nulle, une température qui varie selon la source et la saison, de 0 à 10 °C et a une concentration relativement faible en nutriments dissous. L'eau de l'Arctique est un mélange d'eau du Pacifique, de l'Atlantique et d'eau douce, modifiée dans l'Arctique par des processus physiques, chimiques et biologiques. La glace de mer arctique est une version gelée de l'eau arctique.

Aux basses températures de l'Arctique, la salinité est le principal facteur qui contrôle la densité de l'eau. L'eau douce qui a la salinité est la plus faible flotte sur le dessus, tandis que l'eau de l'Atlantique dont la salinité est la plus élevée descend en profondeur. L'eau du Pacifique se glisse entre les deux couches d'eau. C'est la calotte glaciaire peu profonde, l'eau de l'Arctique et l'eau du Pacifique qui rendent l'Arctique si différent de l'Atlantique.

L'épaisseur de chaque couche dépend de la quantité de chaque type d'eau présente et de la circulation océanique. L'eau douce est rare dans l'ensemble, mais concentrée dans les 50 à 150 mètres les plus élevés. L'eau du Pacifique est plus abondante et domine entre 50 et 250 mètres dans la région de l'Arctique canadien. L'eau de l'Atlantique est de loin la masse d'eau dominante, remplissant les bassins d'une profondeur d'environ 300 mètres jusqu'au fond de la mer. Le mélange crée des zones de profondeur avec des propriétés transitoires entre les types d'eau.

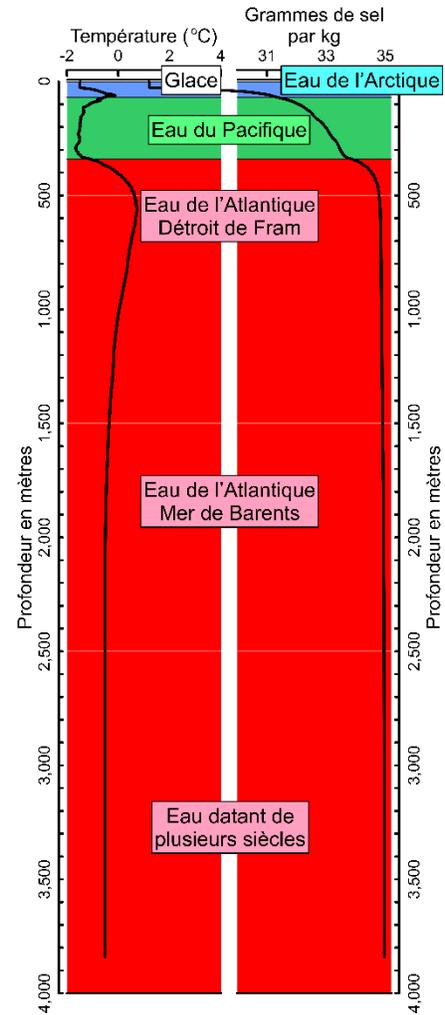


Figure 14. Variation de la température et de la salinité selon la profondeur de l'eau de la mer dans le bassin Canada de l'Arctique. Les domaines des principales masses d'eau sont indiqués.

Le phytoplancton à la base du réseau trophique a besoin de nutriments dissous et de lumière au même endroit pour croître. Le retour du soleil déclenche une croissance planctonique au printemps, mais une reconstitution continue des nutriments est nécessaire pour soutenir la production primaire. Dans l'Arctique, les nutriments sont abondants dans la couche d'eau du pacifique, mais ils doivent être mélangés dans la zone euphotique où la photosynthèse se produit. Ce apport vers les couches supérieures est alimenté par l'énergie cinétique des tempêtes et des marées, mais seulement à certains endroits dans des conditions particulières.

Là où le fond marin s'élève au-dessus de la couche d'eau du Pacifique riche en nutriments, l'approvisionnement en nutriments peut se trouver limité pour les bassins situés au-delà de cette couche. Il est probable que ce mécanisme fonctionne dans le golfe Coronation, le détroit de Dease et la baie de la Reine-Maud, par exemple, où les seuils (remontée des fonds marins) atteignent des profondeurs de 15 à 30 mètres et où seules les eaux de surface pauvres en nutriments peuvent pénétrer de l'extérieur dans des conditions normales.

D'un point de vue plus large, les profondeurs des seuils qui peuvent bloquer les voies possibles d'écoulement contrôlent la présence de chaque type d'eau de mer à des endroits dans l'ensemble du plateau polaire canadien. La figure 15 présente les zones de l'Arctique canadien qui sont accessibles à chaque type d'eau de mer, en combinant la connaissance de la profondeur de chaque type avec la connaissance de la topographie du fond marin. Pour que les eaux du Pacifique ou de l'Atlantique pénètrent dans l'Arctique, les voies d'accès doivent rester aussi profondes que la profondeur la plus faible à laquelle les eaux ont pénétrées pour la première fois dans les zones de l'Arctique. Les régions isolées des eaux riches en nutriments du Pacifique présentent un intérêt particulier.

4.1.4 Mouvement d'eau de mer

Les effets de la répartition des masses d'eau sont plus facilement perceptibles lorsqu'on connaît la façon dont l'eau se déplace. La variation de la vitesse et de la direction du courant avec la

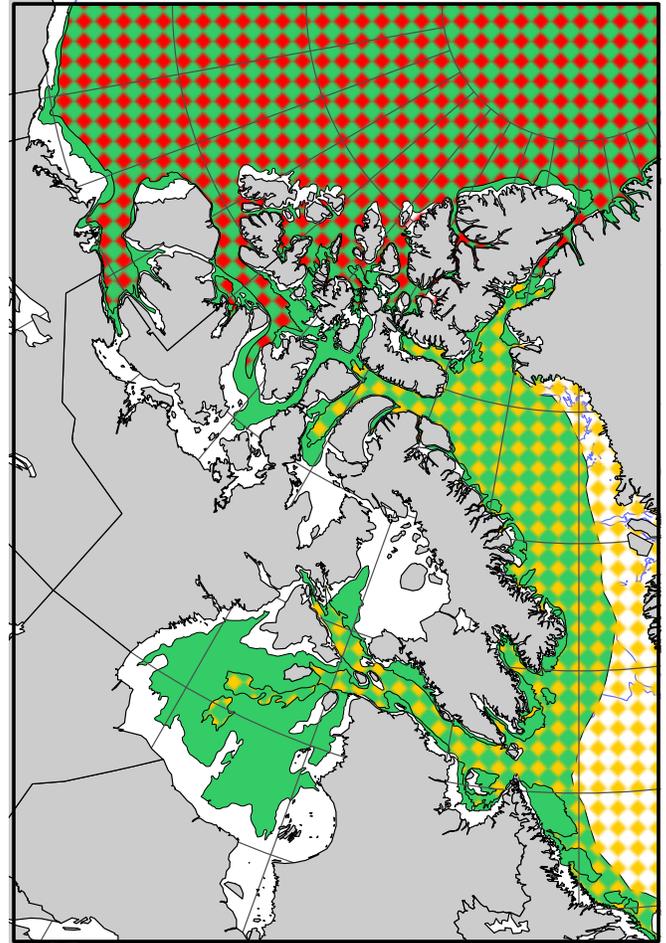


Figure 15. Présence des différents types d'eau de mer dans la région arctique canadienne : l'eau du Pacifique en vert, l'eau de l'Atlantique via le détroit de Fram et la mer de Barents en rouge, et via la baie de Baffin en jaune. Les eaux arctiques couvrent toute la région, sauf l'est de la baie de Baffin (pas de sous-couche verte). Les nutriments du Pacifique ne sont pas facilement disponibles dans les zones blanches des parties méridionales du plateau polaire canadien.

profondeur, la couverture de glace, la marée, les tempêtes, la saison, l'année et la décennie compliquent l'analyse. L'information est rare. Un schéma de la circulation moyenne des eaux de surface de l'Arctique canadien est présenté dans la figure 16.

En général, les vents dominants dans le bassin de Baffin maintiennent un tourbillon dans le sens antihoraire qui entraîne l'eau de l'Atlantique vers la surface du côté du Groenland et l'amène vers le sud-est le long du côté est du plateau polaire canadien. Les vents dominants dans le bassin Canada maintiennent un tourbillon dans le sens horaire qui déplace l'eau de surface lentement vers le sud-ouest le long du côté arctique du plateau polaire canadien et plus rapidement vers l'ouest en traversant le sud de la mer de Beaufort. Une partie du débit du côté arctique, réagissant à une chute du niveau de la mer d'environ 15 centimètres vers la baie de Baffin, quitte le tourbillon pour traverser le plateau polaire canadien et rejoindre le courant de Baffin qui l'amène dans l'Atlantique. Cette image est compliquée par les nombreuses îles sur le plateau polaire, qui, combinées à la rotation de la Terre, permettent aux eaux de surface de se déplacer vers l'Arctique si elles embrassent la côte à droite. Les eaux de l'Atlantique de la baie de Baffin inondent également les bassins du côté est du plateau polaire canadien.

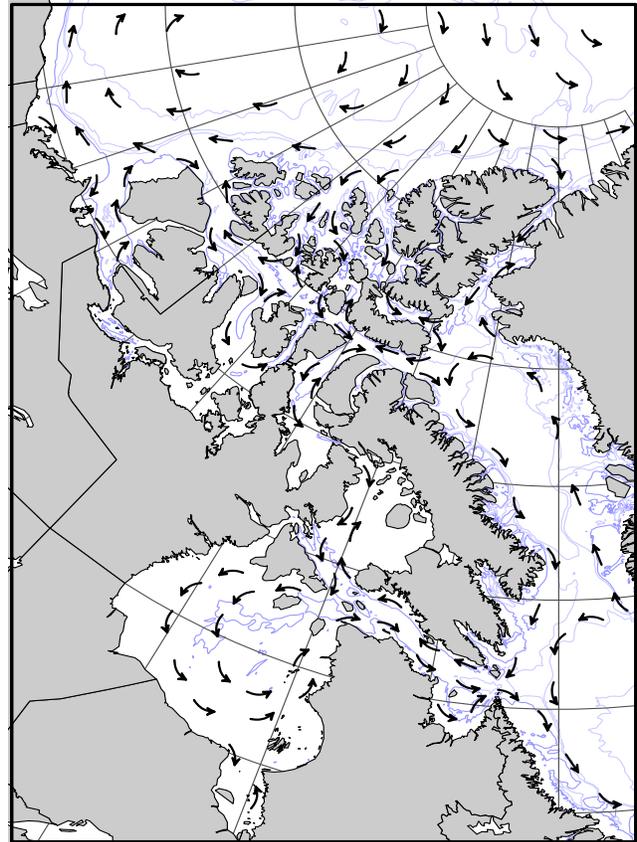


Figure 16. Vue schématique du mouvement des eaux de surface dans la région arctique canadienne. Les flèches représentent la direction moyenne des courants, sans égard à la vitesse d'écoulement.

Les voies immergées que suivent les eaux du Pacifique et de l'Atlantique dans l'océan Arctique ne sont pas bien connues. Toutefois, des observations ont révélé qu'un courant s'écoulait sous la surface, dans le sens antihoraire, le long du talus continental de Beaufort et dans les profondeurs de l'ouest du plateau polaire canadien simplement en suivant ses côtés fortement inclinés. La composante atlantique est trop dense pour se déplacer vers l'est et peut demeurer dans les bassins profonds de l'ouest pendant des décennies. En raison des seuils, le débit continu de l'Arctique canadien se compose uniquement des eaux de surface et du Pacifique de l'Arctique. Ce débit apporte des nutriments pour nourrir les écosystèmes marins de la côte de Baffin, de la baie d'Hudson et des Maritimes. Une partie du courant de Baffin en direction sud pénètre dans la baie d'Hudson le long de la rive nord du détroit d'Hudson et se joint à la circulation antihoraire des rivières locales qui s'écoulent autour de la baie, pour sortir le long de la rive sud du détroit d'Hudson.

4.1.5 Glace de mer

L'étendue de la couverture de glace au cours d'au moins une partie de l'année est une caractéristique déterminante de la région de l'Arctique canadien. La glace se forme par le gel de l'eau de mer par temps froid hivernal. Dans le Grand Nord canadien, la glace de mer atteint plus de deux mètres d'épaisseur au début de juin. Près de la limite sud de la baie James, la formation de glace hivernale est d'environ 1 mètre.

Le gel de l'eau de mer n'est que le début de la glace de mer. Les forces du vent et de la marée déplacent la glace contre les rives, ce qui la fait se fracturer et s'empiler dans d'épais amas sinueux (crêtes). Ces crêtes peuvent atteindre une épaisseur de 10 mètres, même très tôt en hiver, et de 30 mètres ou plus à la fin de l'hiver. L'empilage de glace crée brièvement de l'espace pour des chenaux libres de glace dans d'autres secteurs. La glace de mer (ou **banquise**) qui dérive devient un paysage chaotique de crêtes et de floes d'une épaisseur très variable à mesure que l'hiver se poursuit.

La banquise devient plus solide à mesure qu'elle s'épaissit pendant l'hiver. Là où les côtes ou les îles fournissent un abri, elle peut devenir suffisamment forte pour résister aux forces du vent et du courant, de sorte qu'elle cesse de se fracturer et de dériver et qu'elle demeure en place, formant de la **glace fixe**. Les chenaux qui relient les îles du plateau polaire canadien sont uniques en ce qu'ils abritent de vastes étendues de glace fixe chaque hiver.

Avec la nuit polaire s'estompant, la température de l'air augmente avec le renforcement des rayons du soleil, ce qui ralentit la croissance de la glace. Avec une température approchant 0 °C, le rayonnement solaire peut faire fondre la neige accumulée, formant des étangs qui emprisonnent la chaleur du soleil et favorisent la dégradation de la glace de mer en dessous. Au début d'août, la majeure partie de la **glace saisonnière** (plus mince) dans la partie sud de l'Arctique canadien a fondu. Plus au nord, là où la glace est plus épaisse, l'été est trop court pour que toute la glace fonde. Lorsque les zones ouvertes commencent à geler à la fin d'août, de la nouvelle glace commence également à geler en dessous des floes qui sont restés de l'hiver précédent. Le 1^{er} octobre, ces floes qui se régénèrent entrent dans la catégorie des glaces de deuxième année. S'ils survivent un deuxième été, ils deviennent de la **vieille glace** ou de la **glace pluriannuelle**. La majeure partie de la glace pluriannuelle de l'Arctique se trouve dans la région de l'Arctique canadien. Les zones combinées de glace de première et deuxième année et de glace pluriannuelle définissent l'étendue minimale de la couverture de glace à la fin de l'été.

Les glaces sont définies comme la surface de la mer où elle est présente et où elle se déplace généralement de la même façon que les courants de surface, sauf là où la glace est fixe. Tout comme les courants, la dérive de la glace varie considérablement au fil du temps (heures, jours, saisons, années). En effet, la glace de mer améliore grandement notre connaissance des courants de surface, car ses mouvements peuvent être facilement suivis depuis l'espace. La glace pénètre et quitte le plateau polaire canadien de tous les côtés à mesure que les vents changent. Toutefois, à l'ouest, la glace est plus susceptible de se déplacer du bassin Canada vers le plateau nord du chenal Parry, alors qu'au sud, elle tend à quitter le plateau vers le bassin Canada. Du côté est, la glace se déplace généralement du plateau vers la baie de Baffin en passant par les détroits de Smith et de Jones, alors qu'elle dérive habituellement sur une certaine distance dans les détroits de Lancaster et d'Hudson avant de traverser le chenal et de revenir de l'autre côté. La glace

circule dans le sens antihoraire autour de la baie d'Hudson; cette glace qui ne fond pas à l'intérieur de la baie sort par le détroit d'Hudson.

La glace de mer exerce une forte influence sur tous les aspects des écosystèmes marins de l'Arctique. Il s'agit en soi d'un habitat (substrat) pour la vie : bactéries, phytoplancton, zooplancton, poissons, phoques, morses (*Odobenus rosmarus*), oiseaux, baleines, renards, ours polaires et Inuits. Sa présence réduit la pénétration de la lumière solaire dans les eaux océaniques. Sa rugosité aide à mélanger les nutriments dissous vers le haut dans la zone photique lors du déplacement, mais elle crée une couche d'eau de surface saumâtre qui empêche ce mélange lors du dégel. Sa solidité offre un soutien aux ours, aux renards et aux oiseaux, mais nuit en même temps à l'accès facile aux sources de nourriture marine. Sa présence protège les mammifères marins contre les prédateurs marins, mais peut aussi isoler ces mêmes créatures de l'air nécessaire pour respirer. La lisière de la glace fixe en hiver et au printemps (la lisière des floes) permet, avec un vent favorable, la formation de polynies (zones de glace mince ou d'eau libre) qui favorisent la floraison du plancton au début du printemps et offrent un refuge aux créatures qui ont besoin à la fois de l'océan et de l'atmosphère pour survivre.

Il est courant de discuter de l'étendue minimale de la glace de mer dans une année, bien qu'il existe de nombreuses autres mesures de la glace de mer pertinentes pour l'écosystème (p. ex. : épaisseur de la glace, dérive des glaces, durée de la glace). La variation saisonnière de l'étendue des glaces (figures 17 et 18) est une mesure / métrique dans la région de l'Arctique canadien qui fournit un aperçu utile des conditions de la glace de mer. Lorsque l'étendue de la glace de mer est au maximum ou presque (fin de l'hiver), elle couvre les eaux représentées à la figure 15 et correspond généralement aux limites de la région de l'Arctique canadien telle que nous l'avons définie.

Les figures 17 et 18 ne fournissent aucune information sur l'épaisseur de la glace de mer, qui varie grandement d'une région à l'autre et d'une saison à l'autre. Toutefois, il est utile d'identifier les régions géographiques les plus susceptibles d'abriter de la glace mince et très épaisse. En hiver, la glace mince est plus commune près du front de glace qui borde les mers tempérées et dans les polynies. Les polynies existent malgré des conditions atmosphériques froides parce que la glace est physiquement déplacée de la zone de congélation par le vent et par une réduction du taux de congélation en raison des remontées d'eaux océaniques plus chaudes. La glace qui est généralement très épaisse, est probablement de la glace

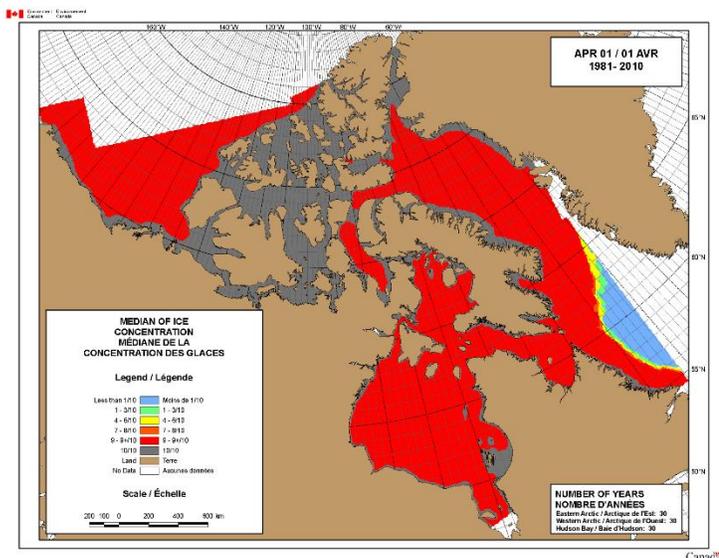


Figure 17. Couverture de la glace de mer dans la région arctique canadienne au moment où elle atteint presque son étendue maximale. Le rouge indique une couverture presque complète de la banquise, et le gris, une couverture complète de la banquise côtière. L'information représentée est la valeur médiane sur la période climatologique 1981-2010. Illustration fournie gracieusement par le Service canadien des glaces.

pluriannuelle, laquelle peut être détectée de façon assez fiable par radar satellite pendant les mois froids.

La concentration médiane de glace dans la région de l'Arctique canadien au début de l'été (figure 19) est un bon substitut pour la cartographie des grandes polynies arctiques. La glace mince qui aurait pu recouvrir complètement les polynies six semaines plus tôt a fondu à ce moment-là, et les eaux exposées par les mouvements ultérieurs de la glace ne se seront pas gelées à nouveau. Il y a aussi une myriade de plus petites polynies, généralement dans des chenaux à courants de marée puissants qui ne peuvent être cartographiés à cette échelle.

La figure 20 présente la fréquence d'occurrence de la glace pluriannuelle à une concentration de 4 dixièmes ou plus, d'après les données de l'intervalle climatique des 30 dernières années (1981 à 2010). Les zones mauves, bleues et noires sont dominées par la vieille glace depuis au moins 20 des 30 années analysées. Il s'agit de la mer de Beaufort au sud du 73^e parallèle nord et de la plus grande partie de l'ouest du plateau polaire canadien. La vieille glace est moins fréquente dans les parties sud et est du plateau polaire canadien et a une présence négligeable dans la baie d'Hudson et le bassin Foxe.

Puisque la glace de mer influence la vie marine et l'activité humaine de tant de façons, l'étendue des

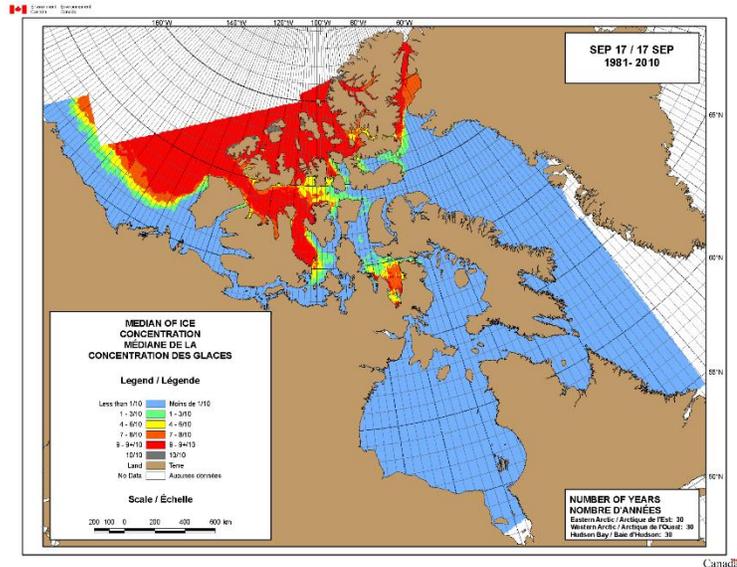


Figure 18. Couverture de la glace de mer de la région arctique canadienne au moment où elle atteint presque son étendue minimale. L'information représentée est la valeur médiane sur la période climatologique 1981-2010. Illustration gracieusement fournie par le Service canadien des glaces. <https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/30Atlas/page1.xhtml>

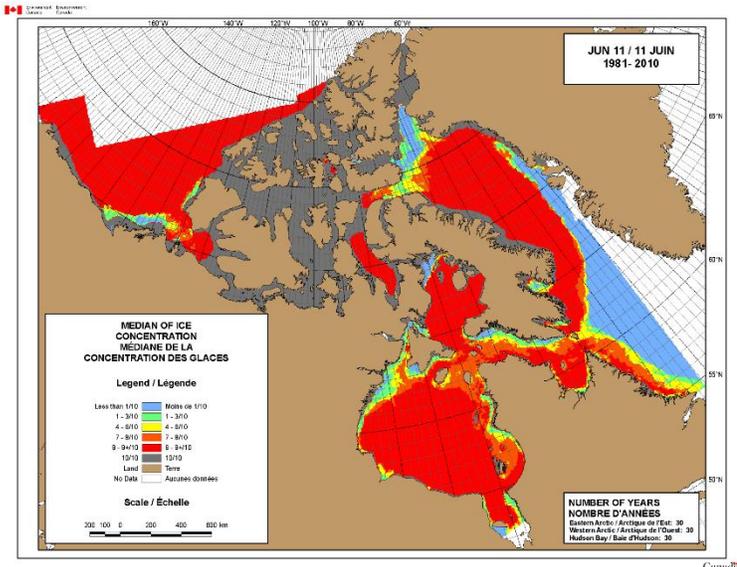


Figure 19. Emplacements des polynies (zones bleu-vert délimitées par le rouge) dans la région arctique canadienne, qui sont caractérisées par une mince couche de glace au début de l'été. On retrouve d'importantes polynies dans la mer de Beaufort (polynie de Bathurst), le nord de la baie de Baffin (polynie des eaux du Nord), le nord-ouest du bassin de Foxe, et la baie et le détroit d'Hudson. De plus petites polynies se trouvent dans les détroits de Penny, de Cardigan et de Cumberland. Illustration gracieusement fournie par le Service canadien des glaces. iceweb1.cis.ec.gc.ca/30Atlas/page1.xhtml

caractéristiques de la glace de mer pertinentes pour l'écosystème englobe beaucoup plus d'attributs que ceux présentés ici. La répartition de la présence de glace selon l'épaisseur; la présence, la taille et la superficie fractionnée des ondules glaciels au-dessus et au-dessous de la surface de la mer; la présence, l'épaisseur et la dérive de la neige; la date de la prise des glaces; les dates de la débâcle pour la glace fixe et du dégagement des glaces pour la banquise en sont d'autres. De plus, les percentiles et les valeurs extrêmes de ces attributs peuvent être aussi pertinents, sinon plus, que les moyennes.

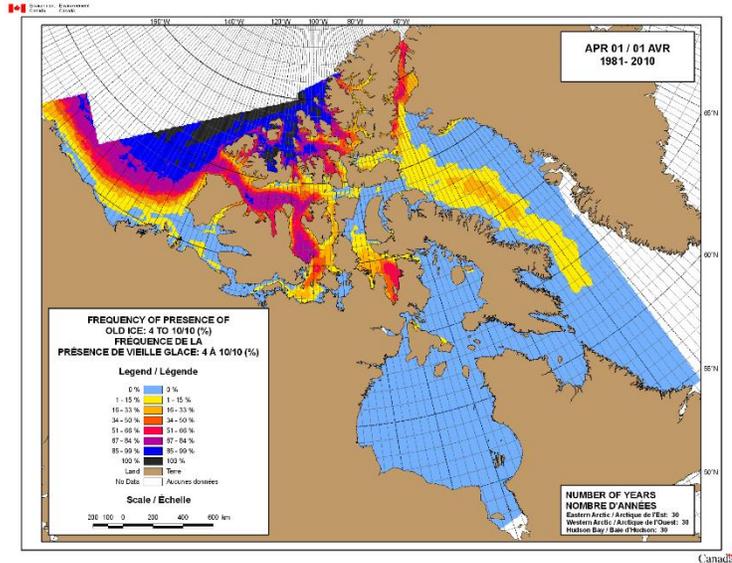


Figure 20. Régions de glace épaisse dans la région arctique canadienne. La carte montre la fréquence de la présence de vieille glace à une couverture de 4 à 10 dixièmes à cette date, exprimée en fraction de l'année dans l'intervalle climatique de 30 ans. Illustration gracieusement fournie par le Service canadien des glaces.

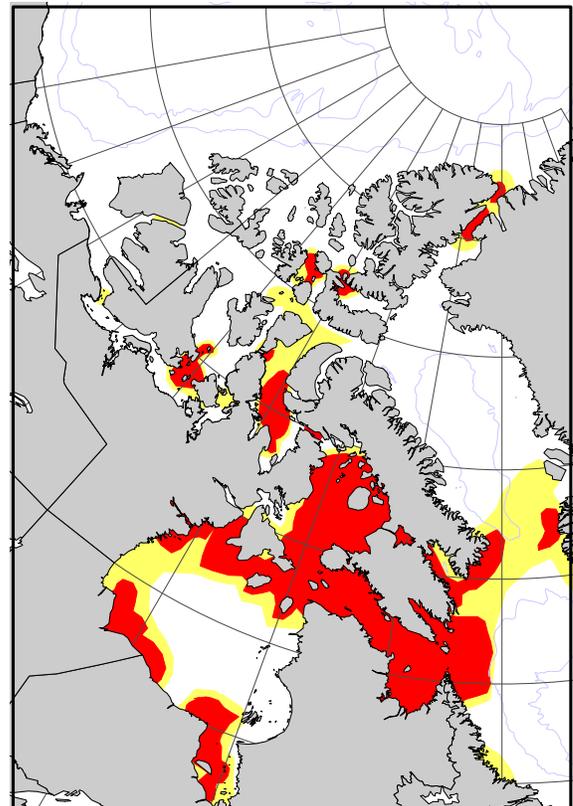
<https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/30Atlas/page1.xhtml>

4.1.6 Marées

Les marées sont les variations régulières du niveau de la mer contrôlées par les positions du soleil et de la lune, leur force gravitationnelle et la rotation de la Terre. La gravité solaire et lunaire crée des renflements d'eau de mer qui se déplacent autour de la Terre alors qu'elle tourne sous eux. Il y a de nombreuses composantes de marée dont les périodes sont regroupées en intervalles. Les intervalles quotidiennes et semi-quotidiennes contiennent les plus grandes marées.

Les irrégularités dans la profondeur et la forme des bassins océaniques modifient les renflements, de sorte que les différences entre les marées hautes et basses (l'amplitude de marée) sont plus importantes

Figure 21. Zones avec des courants de marée forts dans la région de l'Arctique canadien. Les débits sont plus énergiques dans les zones colorées en rouge, moins en jaune. Données compilées par le modèle de prévision de marée WebTide, v 0.7.1 (Dunphy et al. 2005, <http://www.bio.gc.ca/science/research-recherche/ocean/webtide/index-fr.php>).



dans certaines régions que dans d'autres. Dans l'Arctique, les variations saisonnières de la couverture de glace modifient également la portée et l'heure d'arrivée de la marée.

Le mouvement rapide des renflements de marée d'eau de mer autour de la Terre crée des courants de marée. Ces mouvements se font dans les mêmes intervalles que les changements du niveau de la mer qui les entraînent. Les marées semi-quotidiennes exposent et inondent l'habitat intertidal de la côte en changeant le niveau de la mer quatre fois par jour. La largeur de la zone intertidale dépend de l'amplitude de marée et de la pente de la rive (étroite sur des rives escarpées). En hiver, les marées soulèvent et abaissent la glace de mer près des rives, ce qui maintient des fissures entre la glace échouée (près des côtes) et la glace flottante (eau profonde). Ces fissures offrent des sites aux phoques pour respirer et au ours polaires pour chasser.

L'écoulement des courants de marée sur le fond marin et sous la glace génère des tourbillons et des remous dans l'eau qui peuvent mélanger de l'eau potentiellement plus chaude et plus riche en nutriments jusqu'à la surface. L'effet augmente considérablement à mesure que le courant de marée se renforce. Le mélange ascendant des nutriments peut restaurer la capacité de production de la zone photique en été et soutenir des points névralgiques biologiques. Un mélange ascendant de chaleur peut réduire l'épaisseur de la glace d'hiver (créent de petites polynies), offrant un meilleur habitat hivernal au morse et au phoque et facilitant une débâcle précoce au printemps. Toutefois, ces deux avantages écologiques dépendent de la présence d'une forte action des marées et de l'eau chaude et des nutriments en profondeur. Les courants sont les plus forts dans les chenaux étroits et peu profonds où l'amplitude de marée ou le moment des marées hautes et basses diffèrent nettement d'une extrémité à l'autre de la région visée. La figure 21 représente les régions de l'Arctique canadien où les courants de marée sont forts.

ÉTUDE DE CAS 5 : Observations des collectivités du Nunavut sur les changements de la glace côtière

Les collectivités côtières du Nunavut dépendent de la glace de mer le long de leurs côtes et l'utilisent pendant la plus grande partie de l'année. Les données sur l'emplacement et la qualité de la glace de mer ainsi que sur l'utilisation qu'en font les collectivités sont consignées dans l'inventaire des ressources côtières du Nunavut, un projet dirigé par le ministère de l'Environnement du gouvernement du Nunavut. Ce projet consiste à interroger des aînés ainsi que des chasseurs et des pêcheurs actifs qui ont une connaissance approfondie de l'océan Arctique, y ayant consacré la plus grande partie de leur vie. Dans les entrevues liées à ce projet d'inventaire, l'information sur la glace de mer est recueillie au moyen d'une cartographie participative des limites de dislocation des glaces, des itinéraires de voyage, des territoires de chasse et des campements saisonniers. Les participants doivent indiquer si leurs observations se rapportent au présent (au cours des 10 dernières années) ou au passé (il y a plus de 10 ans), et préciser si les choses sont généralement demeurées inchangées ou s'ils ont été témoins de changements importants au fil du temps. Les observations collectives à l'échelle du Nunavut indiquent que l'emplacement, la période et la qualité de la glace de mer ont considérablement changé au cours des dernières années, modifiant l'interaction des collectivités côtières avec la glace de mer.

Au cours des dernières décennies, certaines collectivités côtières ont perdu l'accès à leurs territoires de chasse et à leurs itinéraires de voyage traditionnels en raison de changements touchant l'emplacement de la glace de mer (figure 22) et sa qualité. Dans la baie Resolute, les territoires de chasse sur l'île Somerset sont devenus inaccessibles depuis quelques années, car la glace de mer ne s'y forme plus. Aussi, les aînés se rappellent que la glace de mer leur permettait, il y a à peine une décennie, de se rendre jusqu'à l'île de Baffin, ce qui est maintenant impossible en raison de la réduction de l'étendue de la glace de mer. À Coral Harbour, la bordure de la banquise est plus près de la rive qu'auparavant, de sorte qu'il est impossible, depuis quelques années, de parcourir la glace de mer pour se rendre au Nunavut continental, où la collectivité pratiquait la chasse au caribou (*Rangifer tarandus*). Les collectivités d'Arviat, de Whale Cove et de Hall Beach ont, elles aussi, composé avec une réduction de l'étendue de la glace de mer, alors que la limite de dislocation se trouve, depuis la dernière décennie, plus proche de la côte qu'elle ne l'a jamais été depuis l'établissement des collectivités.

La période de l'année où se produit l'englacement et la débâcle de la glace de mer a été sensiblement modifiée, alors que la majorité des collectivités côtières du Nunavut ont observé que la glace de mer se formait plus tard et fondait plus tôt qu'il y a dix ans. À Cape Dorset, l'englacement qui se produisait auparavant en novembre et permettait de voyager de façon sécuritaire sur la glace de mer se produit maintenant en décembre. À Cambridge Bay, l'englacement tend à se produire deux mois plus tard qu'auparavant. Au printemps, le dégel des glaces commence beaucoup plus tôt que par le passé, et la débâcle est beaucoup plus rapide parce que la glace de mer est plus mince qu'il y a dix ans. À Hall Beach, la glace de mer se forme maintenant jusqu'à un mois plus tard que durant la décennie précédente. À Pond Inlet, la glace prend jusqu'à trois mois de plus pour se former correctement et la glace est, à son maximum, plus mince que par le passé. À l'est de cette collectivité, à Button Point, la glace ne se forme qu'en février, soit beaucoup plus tard que ce qui était normal, perturbant la chasse au

phoque traditionnelle dans cette région. De plus, les aînés de Pond Inlet se rappellent qu'ils pouvaient voyager en traîneau à chiens sur la glace de mer entre l'inlet Pond et le Nunavut continental jusqu'en juillet, ce qui n'est plus possible puisque la débâcle se produit environ un mois plus tôt qu'auparavant.

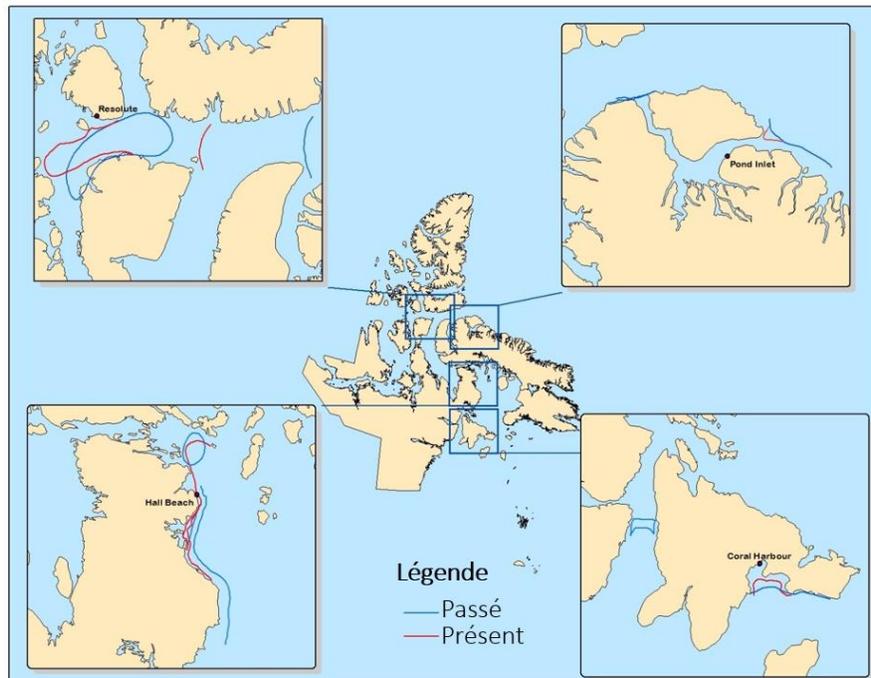


Figure 22. Lisières de dislocation des glaces à la fin de l'hiver ou au début du printemps selon les descriptions des collectivités. Les lignes bleues représentent les lisières passées de dislocation des glaces (il y a plus de 10 ans). Les polygones bleus représentent les emplacements où la glace de mer était auparavant solide et pouvait être traversée. Les lignes rouges représentent les lisières de dislocation des glaces actuelles (au cours des 10 dernières années).

La qualité de la glace de mer a également changé au cours des dernières décennies. À Cape Dorset, la glace de mer à proximité de la lisière de dislocation (figure 22), qui constitue un territoire de chasse pendant les mois d'hiver, est beaucoup plus mince qu'auparavant, et cette zone de glace de mer comprend plusieurs endroits qui ne gèlent plus du tout. Ces changements dans la qualité de la glace de mer posent un risque grave pour les membres de cette collectivité, comme en témoignent les nombreuses motoneiges qui ont tombé à travers la glace en parcourant ces régions depuis les dernières années. Les collectivités de Pond Inlet, de Kimmirut et de Cape Dorset décrivent la glace comme étant devenue « plus molle », « poudreuse » et « moins souple » au cours des dernières années. La majorité des collectivités du Nunavut ont indiqué que la glace de mer est plus dangereuse que par le passé, car elle est plus mince, moins solide et de plus en plus hasardeuse.

Les renseignements qui sont ici rassemblés proviennent de l'inventaire des ressources côtières du Nunavut, disponible en anglais à l'adresse suivante :

www.gov.nu.ca/environment/information/nunavut-coastal-resource-inventory (en anglais seulement)

4.2 Aperçu des nutriments, les éléments constitutifs de la productivité des écosystèmes

Les nutriments comme l'azote et le phosphore sont deux éléments constitutifs essentiels à la vie. Leur disponibilité dans les zones d'eaux libres saisonnières de l'Arctique canadien détermine la productivité biologique globale de la région arctique canadienne (Tremblay et Gagnon, 2009). Alors que toutes les algues ont besoin d'azote et de phosphore, un groupe spécifique d'algues typiquement présentes dans les réseaux trophiques productifs, les diatomées, ont également besoin du silicium pour construire leur couche extérieure. Utilisant la lumière comme source d'énergie, les algues microscopiques présentes dans la colonne d'eau et dans la glace de mer assimilent les nutriments et le carbone pour se développer et produire la matière organique qui forme la base du réseau trophique.

Les eaux de surface de l'Arctique canadien doivent composer avec une carence chronique et importante en azote par rapport à d'autres nutriments (Tremblay et coll., 2015). Les causes sous-jacentes de ce déséquilibre dans la combinaison des éléments nutritifs sont des causes indirectes, qui sont traitées à la section 6 du présent rapport. Un autre facteur principal qui explique la quantité relativement faible d'azote disponible et, dans une moindre mesure, d'autres nutriments essentiels dans les eaux de surface de l'Arctique est l'importante stratification verticale des eaux, causée par la présence d'une eau de faible salinité à la surface des eaux profondes relativement salées (section 4.1.3). Cette superposition stabilise la colonne d'eau et s'oppose au mélange nécessaire des eaux permettant d'amener les eaux riches en nutriments de la subsurface vers la couche qui absorbe les rayons du soleil (figure 23).

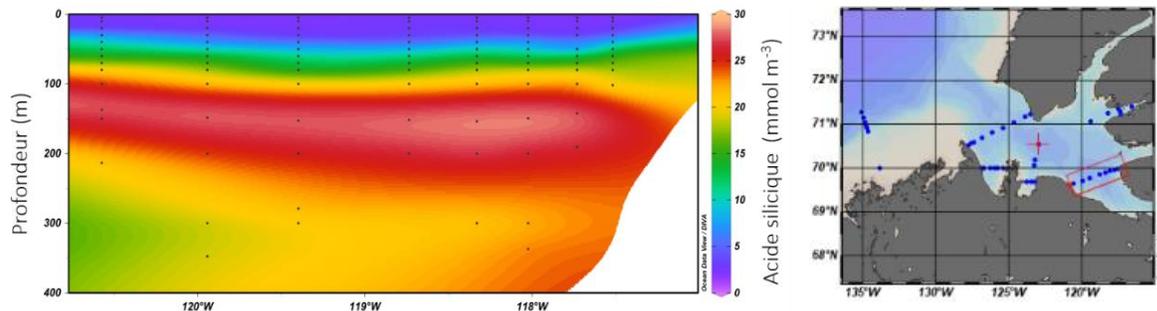


Figure 23. Répartition de l'acide silicique, un élément nutritif essentiel à la croissance des diatomées, le long du transect entre deux plateaux dans le détroit de Dolphin-et-Union (l'encadré rouge), dans la mer de Beaufort à la fin de l'été 2017. Les concentrations élevées d'acide silicique à mi-profondeur indiquent la présence des eaux du Pacifique, alors que les faibles concentrations à la surface indiquent un appauvrissement lié à l'absorption de phytoplancton. La croix rouge indique l'emplacement des stations d'échantillonnage (source : C. Michel, données non publiées).

Puisque les producteurs primaires ont besoin de lumière pour produire de la matière organique, leur présence se limite à la zone euphotique (soit la couche de surface d'environ 100 m), où la pénétration de la lumière solaire est suffisante pour soutenir une production nette. Cette contrainte isole en partie les algues du réservoir de nutriments des eaux profondes, et maintient généralement de faibles niveaux de productivité à l'échelle de l'Arctique canadien (Tremblay et coll., 2012). Selon ce qu'a révélé une série d'observations chronologiques le long des côtes de la mer de Beaufort et dans le nord de la baie de Baffin, les changements de la stratification ont une

incidence sur la productivité primaire nette, cette incidence pouvant être positive ou négative selon le contexte régional (Bergeron et Tremblay, 2014; Blais et coll., 2017) (section 5.0, étude de cas 8).

Cette séparation entre la lumière du soleil et les nutriments dans les eaux profondes favorise aussi l'établissement de couches de subsurface où la biomasse phytoplanctonique atteint son maximum et contribue considérablement à la production primaire annuelle (Martin et coll., 2010, 2012, 2013). D'ailleurs, ces structures posent un défi particulier lorsqu'on tente d'estimer la productivité et ses changements temporels à partir des données de satellite, car les satellites ne peuvent pas détecter le maximum de biomasse algale de la subsurface. La productivité de ces couches est également sensible à la profondeur à laquelle commence la stratification (ou la couche halocline). Lorsque l'halocline est relativement profonde, la pénétration de lumière peut être insuffisante pour favoriser la bonne croissance des algues (McLaughlin et Carmack, 2010). À l'inverse, la remontée de la halocline et des nutriments qu'elle contient se produit à l'extrémité des plateaux continentaux peu profonds, ce qui favorise une productivité élevée dans la zone euphotique (Tremblay et coll., 2014). La halocline est particulièrement riche en nutriments et en silicate (figure 23), dans la mesure où les concentrations observées dans la tranche d'eau à une profondeur entre 75 à 200 m sont beaucoup plus élevées que celles observées dans les couches d'eau de l'Atlantique qui se trouve en profondeur ou n'importe où ailleurs dans la colonne d'eau de la partie atlantique de l'Arctique. Cette caractéristique unique se rattache au lien étroit qui existe entre l'Arctique canadien et l'océan Pacifique, ce lien étant examiné plus en détail à la section 6 du présent rapport. Les changements relatifs aux processus qui alimentent ce maximum de nutriments en subsurface, ainsi que les changements relatifs aux forces locales ou régionales qui influent sur l'emplacement de la limite supérieure de la subsurface, ont possiblement d'importantes répercussions sur la productivité biologique.

Dans les eaux de la baie d'Hudson (J. Ehn, données non publiées) et dans le tourbillon de Beaufort du bassin Canada (Wang et coll., 2018), le réchauffement des eaux et l'augmentation récente de la quantité d'eau douce contribuent à renforcer la stabilité de la colonne d'eau supérieure, ce qui a vraisemblablement une incidence négative sur l'approvisionnement vertical en nutriments. D'autre part, il est possible que la remontée d'eau profonde ainsi que le mélange des eaux causé par les tempêtes ainsi que les ruptures de pente continentale contribuent à accroître la disponibilité des nutriments à des endroits et à des moments précis dans la région arctique canadienne (p. ex. Mundy et coll., 2009; Tremblay et coll., 2011, 2014, 2015). L'impact physique de la perte de glace sur la montée des nutriments est également sujet à des incertitudes, la perte de glace pouvant parfois accroître et parfois atténuer la montée ou le mélange des eaux selon les conditions. Les modèles cherchant à expliquer l'approvisionnement en nutriments dans l'océan Arctique ont de la difficulté à cerner l'interaction entre la charge d'eau douce, l'approvisionnement en nutriments horizontal et l'impact des changements de la glace de mer ainsi que des conditions atmosphériques sur les composantes moyennes et épisodiques de l'approvisionnement en nutriments vertical.

Sur la partie canadienne du plateau de la mer de Beaufort, on a observé que l'augmentation épisodique de la montée des nutriments et de la production biologique résultait d'une incidence positive des vents de l'est sur la remontée d'eau profonde (Mundy et coll., 2009; Tremblay et coll., 2011; Kirillov et coll., 2016) et sur la réduction de la couverture de glace régionale. À

l'opposé, on a observé une diminution de la concentration de nutriments des eaux de surface en haute mer dans le centre de la mer de Beaufort (Li et coll., 2009), une diminution qui est également prédit par certains modèles numériques (Vancoppenolle et coll., 2013), entraînant une transition des diatomées vers un phytoplancton de plus petite taille (Li et coll., 2009), ce qui caractérise une plus grande stratification (Peralta-Ferriz et Woodgate, 2015). Dans ce contexte, certains apports d'azote auparavant ignorés, comme la fixation bactérienne de l'azote (Blais et coll., 2012; Sipler et coll., 2017) et les dépôts atmosphériques, jouent possiblement un rôle de plus en plus important pour soutenir une production primaire très modeste dans les eaux de surface.

4.3 Aperçu des réseaux trophiques de l'Arctique

Les réseaux trophiques englobent le flux énergétique et de la matière au sein d'un système. Ces réseaux sont souvent divisés en niveaux trophiques, déterminant les voies par lesquelles l'énergie et la matière sont utilisées, modifiées et recyclées (figure 24). Comme dans tout réseau trophique, les organismes ayant la biomasse la plus élevée au sein des réseaux trophiques marins de l'Arctique sont de petites espèces unicellulaires qui demeurent souvent non observées. Par exemple, sur le plateau du Mackenzie, la biomasse de phytoplancton d'une taille de plus de 5 μm est estimée à 2,5 g/m^2 , tandis que la biomasse du béluga est de 0,03 g/m^2 (C. Hoover, données non publiées). Les plus petits organismes, qui fonctionnent au sein du réseau trophique microbien (figure 25), procèdent à la transformation essentielle du carbone et d'autres nutriments. Le phytoplancton, constituant l'une des principales voies de sortie de la boucle microbienne (figure 25), est essentiel au maintien des réseaux trophiques arctiques. Étant donné le temps de génération très court des organismes du réseau trophique microbien (qui se reproduisent ou se multiplient en quelques jours), ces derniers réagissent rapidement à l'environnement et constituent par conséquent un indicateur précoce de tout changement pouvant ensuite se répercuter sur plusieurs niveaux trophiques.

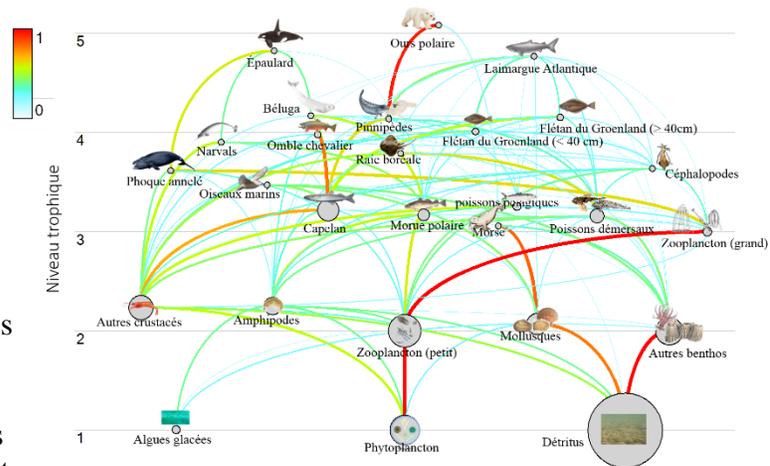


Figure 24. Diagramme de flux de l'écosystème de la baie Cumberland, modélisé en utilisant l'approche Ecopath. La taille des nœuds (cercles) indique la biomasse relative, et l'épaisseur et la couleur des lignes de connexion montrent la force des flux trophiques entre les groupes fonctionnels. (image fournie par Y. Janjua).

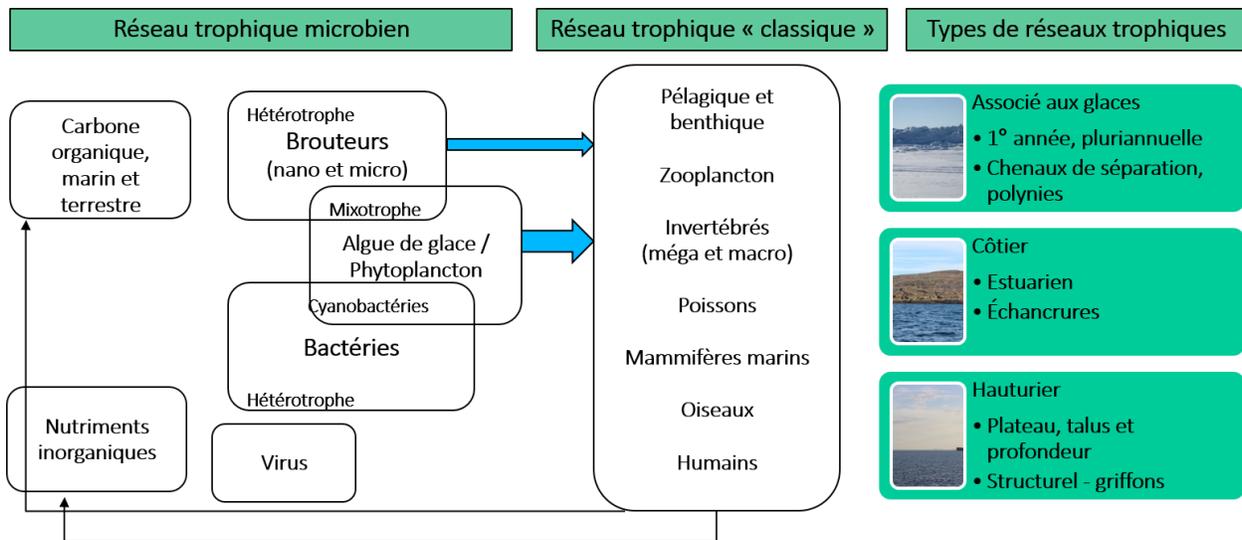


Figure 25. Aperçu des réseaux trophiques microbiens et classiques qui fonctionnent dans différents types de réseaux trophiques de l'Arctique, illustrant les liens entre le réseau trophique microbien et le réseau trophique classique.

Les connaissances inuites fournissent de l'information sur les réseaux trophiques classiques qui englobent les espèces liées aux activités économiques, à la subsistance ou qui revêtent des valeurs culturelles (Watt et coll., 2016; Loseto et coll., 2018a; Stasko et coll., 2018; Yurkowski et coll., 2018). Les principales espèces assurant le transfert d'énergie vers les poissons et les mammifères marins de l'Arctique comprennent les copépodes du genre *Calanus* et la morue polaire (Majewski et coll. 2015; Smoot et Hopcroft 2017). Malgré le caractère commun des principales espèces, les réseaux trophiques à l'échelle de la région arctique canadienne ne sont pas uniformes, car les espèces qui les composent et les liens entre ces espèces peuvent varier selon la région (p. ex., la région est ou ouest de l'Arctique canadien), le type d'habitat (dont il est question à la section suivante), la profondeur (p. ex., le plateau continental ou le bassin extracôtier) et les processus physiques (p. ex., les polynies; étude de cas 8). On a déjà observé que des changements trophiques au sein des réseaux trophiques (études de cas 6 et 7) étaient liés à des changements environnementaux dynamiques, et la recherche se poursuit pour mieux comprendre quelles seront les influences de la présence et l'extension de l'aire de répartition de nouvelles espèces sur les réseaux trophiques de la région arctique canadienne (étude de cas 14). Des études récentes ont aussi démontré que les espèces clés peuvent dépendre de plus d'un réseau trophique, comme c'est le cas du flétan du Groenland (Giraldo et coll. 2018) et de l'ours polaire (Brown TA et coll., 2018). Par conséquent, pour assurer une bonne gestion de la région arctique canadienne au niveau des espèces et des écosystèmes, il est essentiel de comprendre les principaux liens qui existent au sein des réseaux trophiques et entre ceux-ci. Il convient également de souligner que, dans de nombreuses régions de l'Arctique canadien, la structure et le fonctionnement des réseaux trophiques demeurent en grande partie inconnus.

ÉTUDE DE CAS 6 : Les changements au sein des réseaux trophiques de la baie Cumberland

Les prédateurs opportunistes, comme le béluga (*Delphinapterus leucas*), le phoque annelé (*Pusa hispida*), le flétan du Groenland (*Reinhardtius hippoglossoides*) et l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) consomment une grande variété d'espèces de poissons et d'invertébrés. Par conséquent, leur régime alimentaire peut refléter l'évolution des ensembles d'espèces qui composent les niveaux inférieurs du réseau trophique (Lowry et coll., 1980; Bowering et Lilly, 1982; Dempson et coll., 2002; Loseto et coll., 2009; Giraldo et coll., 2018). Dans la baie Cumberland, au Nunavut, l'augmentation récente de la disponibilité du capelan (*Mallotus villosus*) modifie la sélection des proies pour certains prédateurs marins d'importance.

Les isotopes stables ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$), qui sont des traceurs chimiques pouvant fournir des renseignements intégrés dans le temps sur l'utilisation de l'habitat et le régime alimentaire, ont révélé des changements dans le régime alimentaire d'un ensemble de prédateurs marins que sont le béluga, le phoque annelé, le flétan du Groenland et l'omble chevalier sur une période de 22 ans (de 1990 à 2012). Plus précisément, une tendance temporelle décroissante a été observée dans l'isotope $\delta^{13}\text{C}$ et l'isotope $\delta^{15}\text{N}$ des bélugas, ce qui indique la transition vers une consommation accrue de proies pélagiques et phytoplanctoniques associées à un niveau trophique inférieur (Marcoux et coll., 2012). Une analyse bayésienne du modèle de mélange a révélé une augmentation de la consommation de poisson fourrage dans le régime alimentaire du béluga, et une diminution concomitante de sa consommation du flétan du Groenland (Yurkowski et coll., 2017, 2018) (figure 26). La proportion du flétan du Groenland dans l'alimentation du

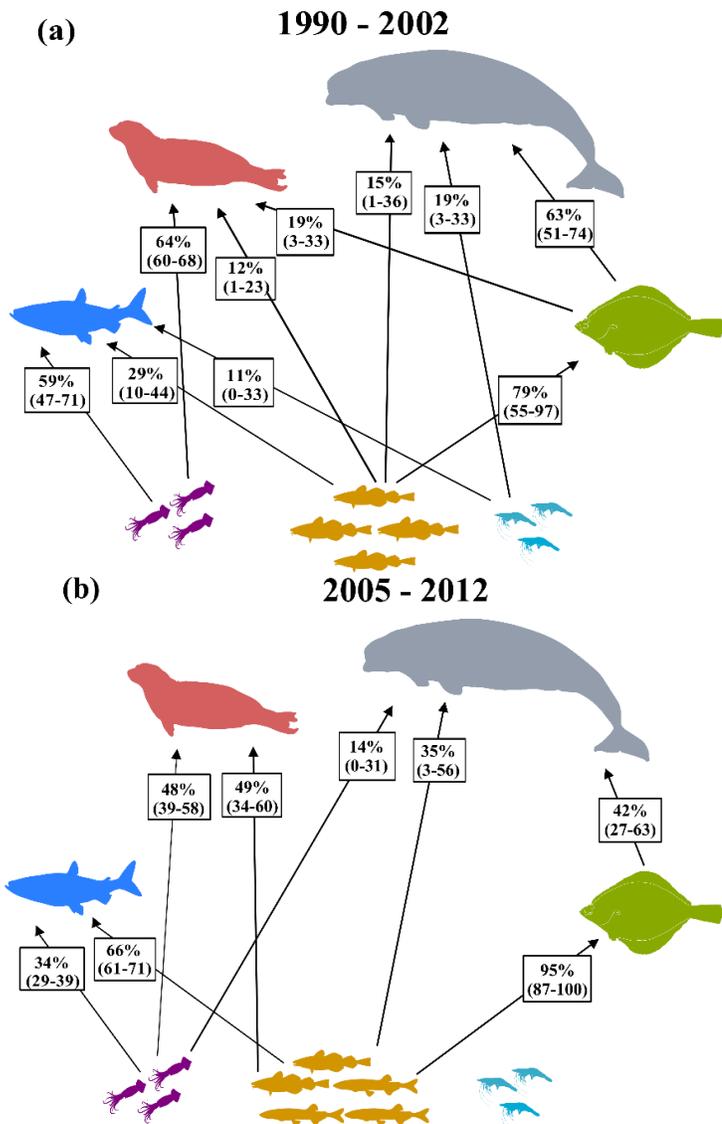


Figure 26. Relations entre le régime alimentaire du béluga (gris), du phoque annelé (rose), du flétan du Groenland (vert) et de l'omble chevalier (bleu) dans la baie Cumberland, déterminées selon les modèles de mélange des isotopes stables. Les proies sont le calmar (violet), la crevette (bleu) et le poisson fourrage (jaune – la morue polaire de 1990 à 2002 et le capelan de 2005 à 2012) (source : Yurkowski et coll., 2018).

béluga a donc diminué, ce qui, en théorie, pourrait correspondre à un affaiblissement de la stabilité du réseau trophique de la baie Cumberland (Yurkowski et coll., 2017). Qui plus est, au fil du temps, la consommation de poisson fourrage a aussi augmenté dans le régime alimentaire du phoque annelé, du flétan du Groenland et de l'omble chevalier, ce qui semble indiquer une certaine souplesse du régime alimentaire de ces prédateurs, mais aussi l'incidence de changements d'origine climatique sur le réseau trophique, entraînant une plus grande disponibilité du capelan (Yurkowski et coll. 2018, figure 27). Selon les changements observés dans les régimes alimentaires, tous les prédateurs de la baie Cumberland jouent désormais un rôle similaire au sein du réseau trophique, se nourrissant uniquement de ressources pélagiques au lieu d'une combinaison de proies benthiques et pélagiques (Yurkowski et coll., 2018). De plus, en été, le réseau trophique de la baie Cumberland passe rapidement d'un système axé sur le carbone sympagique (associé à la glace) à un système axé sur le carbone phytoplanctonique (Brown TA et coll., 2014a, 2017a). Cette transition et la restructuration connexe du réseau trophique seront persistantes et devraient s'intensifier à l'avenir, à mesure que la couverture de glace de mer poursuivra son déclin, ce qui entraînera des changements continus dans la structure, la fonction et la résilience de l'écosystème de la baie Cumberland.

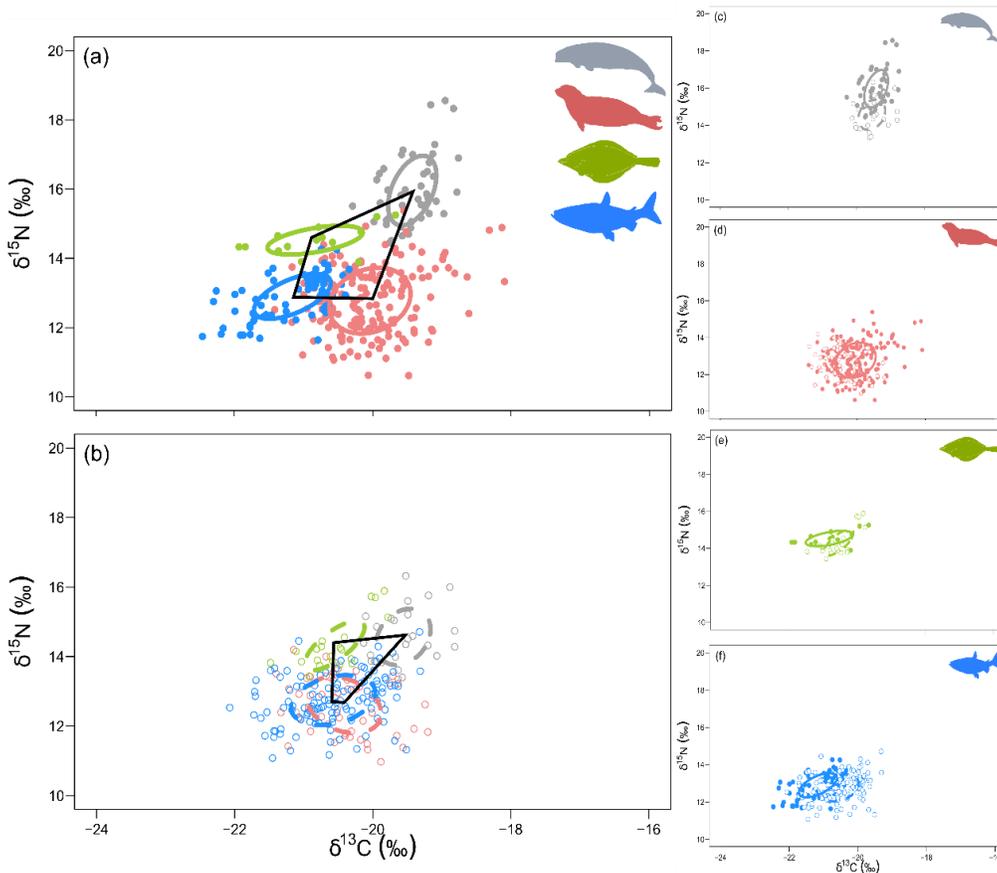


Figure 27. Dimensions des niches isotopiques pour le béluga, le phoque annelé, le flétan du Groenland et l'omble chevalier entre 1990 et 2002 (lignes continues; [a]) et 2005-2012 (lignes en tirets; [b]). La région formée d'une ligne noire continue représente la superficie totale commune aux espèces. Les encadrés (c), (d), (e) et (f) représentent les changements de la niche isotopique pour chaque prédateur entre les deux périodes visées. Les symboles et les ellipses utilisent le même code de couleur par espèce qu'à la figure 26 (source : Yurkowski et coll., 2018).

ÉTUDE DE CAS 7 : La glace de mer – un écosystème en évolution

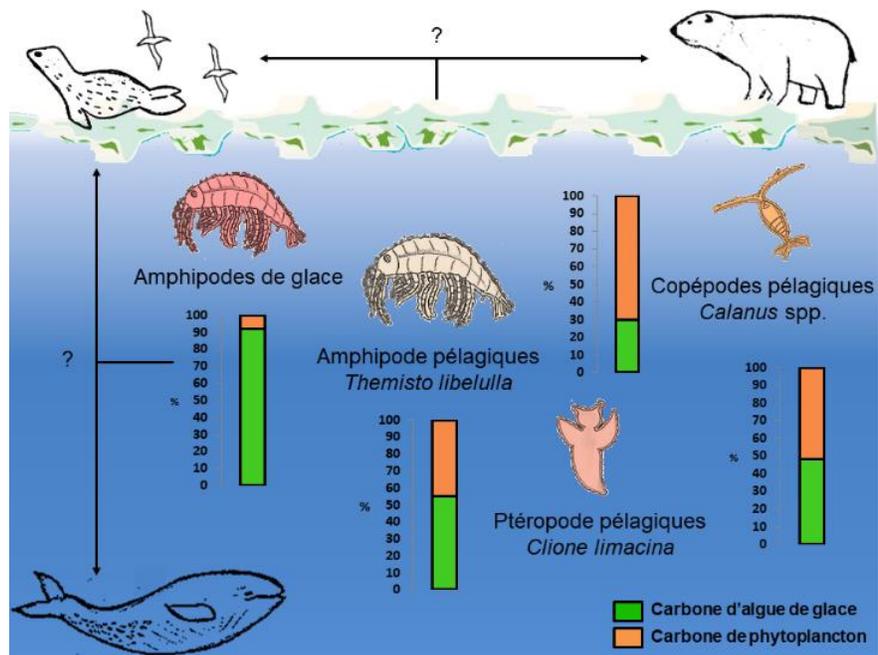
Il existe deux principaux types de glace de mer dans l'océan Arctique. La glace de première année, qui est une glace de mer qui traverse un cycle annuel complet de croissance et de fonte, est le type de glace prédominant sur les plateaux continentaux de l'Arctique canadien. La glace pluriannuelle est celle qui subit des cycles répétés de croissance et de fonte, ayant survécu à au moins deux périodes de fonte estivales. La glace pluriannuelle se trouve habituellement dans les bassins centraux de l'Arctique et dans les parties nord et ouest du plateau continental polaire canadien. La situation est toutefois en train de changer. La perte accélérée de glace de mer, tant sur le plan de l'étendue que de la durée, et le déclin rapide de la glace pluriannuelle refaçonnent radicalement l'océan Arctique et ses réseaux trophiques. Devant la perte de la couverture de glace pérenne, une plus grande partie de la glace de mer de l'Arctique devient une couverture de glace saisonnière. Ce changement a une grave conséquence pour les mammifères marins adaptés à la glace, comme le phoque et l'ours polaire (*Ursus maritimus*), qui utilisent la plateforme de glace pluriannuelle, toujours solide et stable, pour se reposer, se nourrir et mettre bas. La glace pluriannuelle offre également un environnement plus stable que la glace de première année pour la croissance des algues de glace, ce qui pourrait avoir des répercussions sur la biodiversité et sur la vulnérabilité de la production des algues de glace en raison des changements climatiques en cours (Lange et coll., 2019). Nos connaissances des processus biologiques associés à la glace pluriannuelle de l'Arctique, tant à l'échelle spatiale qu'à l'échelle temporelle, sont actuellement limitées et concernent davantage les types de glace les plus accessibles. Cette situation donne lieu à une possible sous-estimation de la productivité globale de l'écosystème associé aux glaces pluriannuelles, comme l'indiquent les données récentes selon lesquelles les hummocks de glace épaisse (monticules de glace marine) sont possiblement plus productifs que prévu (Lange et coll., 2017). Il subsiste d'importantes lacunes dans les connaissances concernant le rôle de la glace de mer, en particulier la glace pluriannuelle, sur la diversité, la productivité et les transferts d'énergie au sein des réseaux trophiques marins de l'Arctique. Il est urgent de mesurer, par le biais d'observations répétées tout au long des cycles annuels, les processus physiques, biochimiques et écologiques associés à l'écosystème de la glace de mer.

La partie nord du plateau continental polaire canadien, au nord de l'île d'Ellesmere, et les eaux adjacentes de l'océan Arctique entre le nord du Groenland et le détroit de M'Clure constituent la seule région de l'océan Arctique où l'on prévoit un maintien de la vieille glace pluriannuelle. En été, lorsque le reste de l'océan Arctique sera libre de glace, cette région servira de refuge aux espèces adaptées à la glace de mer et à une biodiversité unique. Il est donc nécessaire d'acquérir une meilleure compréhension de la structure et de la fonction de cet écosystème et d'assurer une surveillance des changements en cours. Le *Programme multidisciplinaire de l'Arctique – dernière zone de glace* (en anglais : *MAP – Last Ice*) du MPO explore la productivité et la biodiversité de l'habitat de glace pluriannuel et sa connectivité au réseau trophique marin ainsi qu'aux écosystèmes en amont (mer de Beaufort) et en aval (baie de Baffin). Parmi les constatations préliminaires – et inattendues – de ce programme, les chercheurs ont observé une abondance de benthos, indiquant un important transfert de la productivité vers le plancher océanique, ainsi que la présence de morses près de la pointe la plus au nord de l'île d'Ellesmere, signalant un prolongement de leur aire de répartition connue dans l'ouest de la baie de Baffin (Yurkowski et coll., 2019a).

Parallèlement au remplacement de la glace pluriannuelle par de la glace de première année, l'Arctique opère actuellement une transition vers de plus longues saisons des eaux libres et vers des zones d'eaux libres dans des régions qui étaient auparavant couvertes de glace. La glace de mer saisonnière s'étend depuis les plateaux continentaux vers les bassins centraux. Ces nouvelles dynamiques entraînent d'importantes altérations de la structure et du fonctionnement de l'écosystème marin, où les réseaux trophiques adaptés à la glace marine laissent place à des réseaux trophiques adaptés aux eaux libres. Dans la cryosphère de l'Arctique en plein changement, l'augmentation de l'étendue des mers de fonte modifie aussi la transmission de la lumière à travers la glace de mer, ce qui permet à une plus grande quantité de lumière d'atteindre la colonne d'eau et de favoriser la floraison phytoplanctonique sous la glace (Horvat et coll., 2017). Les changements qui touchent les communautés de producteurs primaires ont de vastes répercussions, dont plusieurs restent à comprendre, sur la productivité et les transferts d'énergie du réseau trophique qui soutiennent les ressources marines de l'Arctique.

Le rôle fondamental de la productivité liée à la glace de mer (c.-à-d. les algues de glace) au sein des réseaux trophiques pélagiques et benthiques de l'Arctique a désormais été clairement démontré, y compris dans la région arctique canadienne (Brown TA et coll., 2014a, 2014b, 2017a, 2017b; Roy et coll., 2015a). Faisant suite aux travaux précurseurs de Belt et coll. (2007) et de Søreide et coll. (2010), des études sur les biomarqueurs, réalisées avec des acides gras et des isoprénoïdes fortement ramifiés que l'on retrouve dans la glace de mer, ont démontré l'importance de la productivité associée à la glace de mer printanière pour les espèces benthiques du détroit d'Éclipse (D. Kohlbach, données non publiées), pour le phoque annelé (*Pusa hispida*) et le béluga (*Delphinapterus leucas*) de la baie Cumberland (Brown TA et coll., 2014b, 2017a). Certaines des principales espèces visées par les pêches traditionnelles sont dépendante de la production d'algues dans la glace de mer dans l'océan Arctique (Kohlbach et coll., 2016) (figure 28) et dans la région arctique canadienne. Cette situation soulève d'importantes questions sur la durabilité des réseaux trophiques marins avec une couverture de glace réduite.

Figure 28. Contribution proportionnelle du carbone produit par les algues de glace et le phytoplancton au bilan de carbone des espèces marines vivant sous la glace de l'océan Arctique à la fin de l'été. Les proportions relatives sont calculées à partir d'une analyse des isotopes stables, à la fois des composés organiques spécifiques et généraux en utilisant les acides gras comme biomarqueurs (source : Kohlbach et coll., 2016).



4.4 Liens avec l'habitat

La présente section réunit les connaissances et les tendances actuelles en ce qui concerne les liens entre les organismes marins de l'Arctique et leurs différents habitats. Les principaux habitats marins sont le benthos (plancher océanique), la glace de mer de différents types et la colonne d'eau elle-même, qui est très dynamique. Ces habitats peuvent varier entre les zones côtières, les plateaux continentaux, les talus et les bassins plus profonds. Les sections et les études de cas suivantes décrivent les réactions des espèces aux changements de leur habitat et expliquent de quelle façon un habitat peut influencer sur la structure et le fonctionnement d'un autre habitat.

4.4.1. La glace de mer

La glace de mer constitue à la fois un élément structurant et un habitat unique, au cœur de la diversité et de la productivité des écosystèmes marins de l'Arctique (Michel, 2013; Bluhm et coll., 2017). Les conditions physicochimiques de la glace de mer sont uniques et diverses, créant une variété d'habitats pour plus de 2 000 espèces de petites plantes et d'animaux adaptés à la glace de mer. Agissant comme plateforme, elle constitue un habitat essentiel pour des animaux de grande taille, dont l'ours polaire et le phoque (études de cas 4 et 9, annexe A). La glace de mer sert aussi de façon essentielle aux déplacements et aux pêches des collectivités inuites de l'Arctique canadien (c.-à-d. de l'Inuit Nunangat), faisant partie intégrante de leur vie et de leur subsistance (Archer et coll., 2017; Ford et coll., 2017; Fawcett et coll., 2018) (étude de cas 5).

Les différents habitats de glace de mer varient dans l'espace et dans le temps. Des espèces de petite taille vivent dans le réseau de canaux d'eau saumâtre, au sein des mares de fonte de la glace de mer, qui se forment à la surface de la glace et sous la glace, là où l'eau rencontre la glace. Sur le plan spatial, les observations vont de l'échelle du micromètre (dans le cas des canaux d'eau saumâtre) aux mètres et aux kilomètres (dans le cas de la configuration des bancs de neige et des chenaux). À l'échelle temporelle, les observations se font en minutes ou en heures en ce qui concerne le mélange des eaux, et en jours ou en saisons en ce qui concerne les conditions solaires, puis en années et en décennies en ce qui concerne les forçages climatiques et océaniques à l'échelle des bassins. Les communautés microbiennes productives que l'on retrouve dans la glace de mer sont essentielles aux réseaux trophiques marins de l'Arctique et aux niveaux trophiques plus élevés.

La production primaire qui se produit dans la glace de mer varie de façon importante selon les saisons, car l'activité photosynthétique dépend du retour de la lumière du soleil lors du printemps arctique après la noirceur de la période hivernale (section 4.5). Dans l'Arctique canadien, les dynamismes relatifs à l'écologie et à la productivité dans la glace de mer ont été étudiés principalement dans la glace côtière fixée (p. ex. Galindo et coll., 2015, 2017; Campbell et coll., 2016, 2017) et, dans une moindre mesure, dans la glace de banquise (p. ex. Piwosz et coll., 2013; Poulin et coll., 2014; Niemi et Michel, 2015; Aslam et coll., 2016).

Les espèces d'algues de glace sont adaptées à la lumière et aux conditions des éléments nutritifs propres à l'environnement de la glace de mer. Au printemps, dans l'océan Arctique canadien, les diatomées pennées dominent généralement les communautés adaptées à la glace fixée, bien que

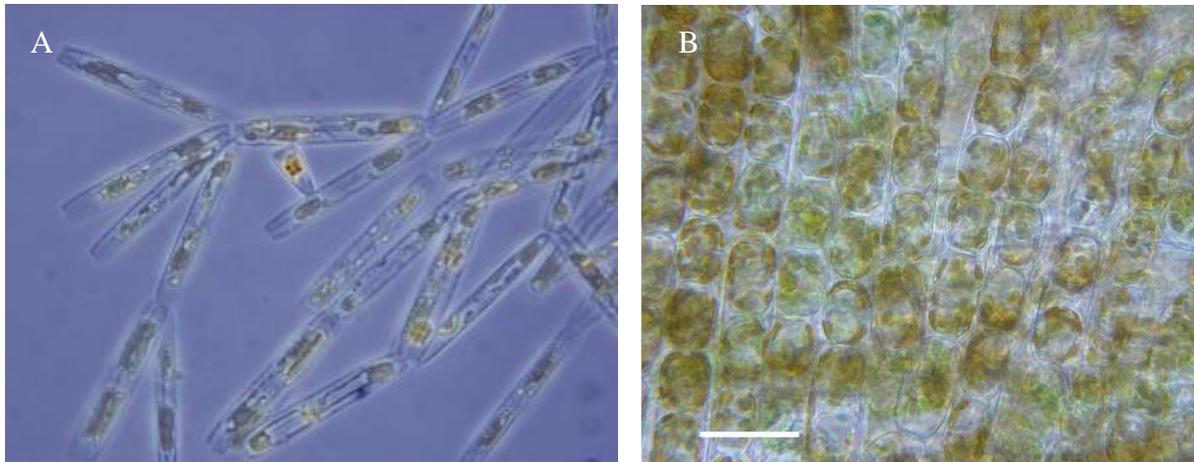


Figure 29. Images microscopiques de colonies arborescentes de la diatomée pennée *Nitzschia frigida* (a) et de la diatomée centrique *Melosira arctica* (b) (crédit photo : Michel Poulin). Échantillons recueillis dans le cadre du programme BIOTA (*Biological Impacts of Trends in the Arctic*) du MPO concernant la glace de mer et dans le cadre d'études sur l'archipel arctique canadien (C. Michel, responsable du programme).

d'autres groupes d'organismes puissent dominer dans certaines conditions particulières (p. ex. Campbell et coll., 2016). La diatomée *Nitzschia frigida*, généralement une espèce dominante durant la floraison productive printanière des algues de glace, est considérée comme une espèce sentinelle dans la glace de mer saisonnière de l'Arctique (Róžańska et coll. 2009). De grandes accumulations de diatomées appartenant à l'espèce *Melosira arctica* sont aussi observées dans l'ensemble de l'Arctique (figure 29). Cette espèce forme des filaments d'un mètre de longueur qui se fixent à la surface inférieure de la glace. La contribution des colonies de diatomées *Melosira arctica* à la production globale de l'Arctique demeure méconnue, notamment en raison de leur grande dispersion. Des études récentes montrent que ces espèces d'algues de glace peuvent être très productives et que les agrégats frais peuvent couler dans les profondeurs des bassins centraux de l'Arctique, procurant une source de nourriture aux organismes benthiques (Boetius et coll., 2013). Des colonies de diatomées *Melosira arctica* ont été observées dans l'archipel arctique canadien, mais les facteurs qui déterminent leur présence et leur abondance n'ont pas encore été élucidés (Poulin et coll., 2014).

La composition des espèces peut différer entre les divers habitats de glace de mer (Deming, 2007; Bowman et coll., 2012). D'importantes différences entre la glace de première année et la glace pluriannuelle sont liées à la pression sélective exercée par les cycles répétés de fonte et de regel. L'habitabilité de l'espace des canaux d'eau saumâtre, qui dépend de la température et de la salinité de la glace de mer, est également considérée comme un facteur clé des différences entre les couches de vieille glace pluriannuelle et la glace de première année. La glace de mer pluriannuelle est considérée comme une réserve de biodiversité, ce que confirme la présence de diverses communautés microbiennes dans les différentes couches de glace et en tenant compte de la diversité microbienne non observée dans la glace de première année (Bowman et coll., 2012; Hatam et coll., 2014). En fournissant un habitat relativement stable sur plusieurs années, la glace pluriannuelle peut soutenir la biodiversité durant les années de succession écologique, tandis que la diversité associée à la glace de première année dépend des espèces présentes dans l'eau au moment de la formation de la glace (Niemi et coll., 2011). De plus, l'hétérogénéité spatiale

élevée entre les divers environnements de glace pluriannuels, allant de l'épaisse glace des hummocks aux chenaux regelés, offre une diversité d'habitats à la faune marine vivant sous la glace. Une étude a récemment démontré que le déclin d'une espèce d'amphipode de glace était attribuable à un changement radical de la glace près du pôle Nord qui était passée d'une glace pluriannuelle à une glace de première année (Melnikov et coll., 2017).

Dans l'ensemble, la contribution des algues de glace à la production primaire totale (glace + colonne d'eau) n'est pas nécessairement proportionnelle à leur importance pour les réseaux trophiques pélagiques et benthiques, particulièrement sur les plateaux continentaux, où la production de phytoplancton peut constituer la majeure partie de la production primaire. Cela s'explique par le fait que : 1) les algues de glace fournissent une source de nourriture saisonnière précoce, abondante et localisée qu'utilisent les brouteurs pélagiques; 2) les algues de glace fournissent des acides gras essentiels à la bonne reproduction des espèces charnières de zooplancton; 3) les algues de glace sont de grandes cellules qui forment entre elles des agrégats leur permettant de couler rapidement vers le plancher océanique, où elles fournissent une source de nourriture fraîche aux espèces benthiques, selon les observations d'une étude menée dans la partie canadienne du plateau de la mer de Beaufort et dans la partie est de l'archipel (Renaud et coll., 2007; D. Kohlbach, données non publiées).

Étant un élément structurel, la glace de mer influe sur l'accès à d'autres habitats, dont le plancher océanique, et ce, tant sur la période que sur l'étendue spatiale de cet accès. Cette interaction entre les habitats se transforme depuis les dernières décennies, pouvant avoir de profondes répercussions non seulement sur les écosystèmes dans leur ensemble, mais aussi sur les espèces et même sur les individus d'une même espèce en raison des répercussions du changement sur la répartition et la disponibilité des ressources, cela ayant des conséquences en aval sur la reproduction et la viabilité des populations. La glace de mer, en agissant sur la disponibilité de l'habitat et, de façon plus importante encore, sur la disponibilité des ressources, peut jouer un rôle important dans la reproduction des espèces d'oiseaux marins.

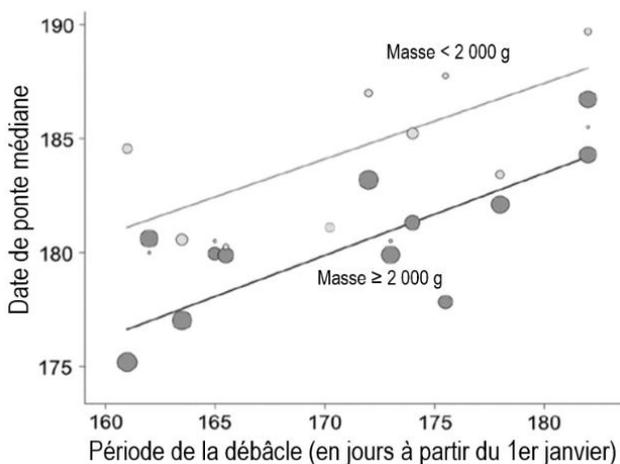


Figure 30. Date médiane de la ponte des femelles de l'eider à duvet en réaction au moment de la période de débâcle, selon l'état corporel au moment de l'arrivée (source : Jean-Gagnon et coll., 2018). Reproduit avec la permission de Springer. Publishing

L'eider à duvet est un canard de mer qui s'alimente d'invertébrés marins benthiques (p. ex., moules, oursin), de certaines espèces de poissons et des copépodes dans les milieux marins. Lors de l'arrivée des colonies d'eiders à duvet sur leur site de reproduction, avant d'amorcer la reproduction, les femelles doivent se nourrir intensément afin d'accumuler une quantité suffisante de matières grasses pour former leurs œufs et passer à travers la période d'incubation de 24 jours durant laquelle elles doivent jeûner. Or, la glace de mer risque souvent de limiter la capacité de reproduction des femelles, surtout si leur état corporel est déjà affaibli au moment de leur arrivée.

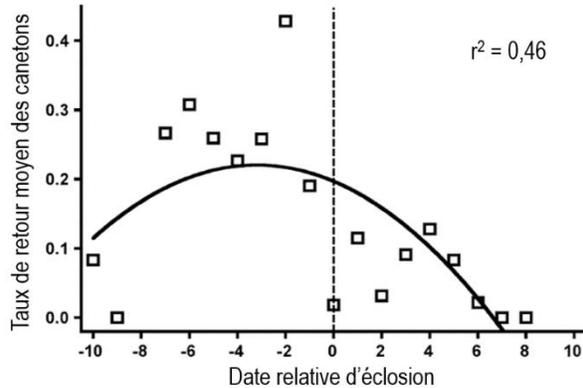


Figure 31. Probabilité moyenne de retour des canetons femelles d'eider à duvet dans leur colonie de reproduction une fois adultes, par rapport à leur date relative d'éclosion au cours d'une année donnée, où la date relative d'éclosion 0 = eaux libres de glace (source : Love et coll., 2010). Reproduit avec la permission de Springer.

Les recherches menées auprès de la colonie de nidification de l'eider à duvet de la baie Est, dans l'est de l'Arctique canadien, ont montré que lors des années où la débâcle se produit plus tard, moins de femelles sont susceptibles de se reproduire et, dans l'ensemble, la couvée œufs a aussi lieu plus tard (Jean-Gagnon et coll. 2018). De plus, les femelles qui arrivent dans un piètre état corporel (moins de 2 000 g) sont plus fortement touchées par une débâcle tardive que celles qui arrivent dans un bon état corporel (2 000 g ou plus), sans doute parce qu'il leur est plus difficile de se nourrir suffisamment pour retrouver un état reproducteur. Ces résultats (figure 30) démontrent que la période de reproduction dépend non seulement de l'état corporel des femelles au moment de l'arrivée, mais aussi de

l'état de la glace de mer, ces deux facteurs ayant des conséquences sur la réussite et l'efficacité de la reproduction et la production chez l'eider à duvet (Love et coll., 2010; Descamps et coll., 2011).

Les conditions de glace de mer ont aussi une incidence sur l'efficacité de la production de l'eider à duvet plus tard au cours de la saison de reproduction. Dans la baie de l'Est, les femelles dont l'éclosion des œufs se produit juste avant la période d'eaux libres voient le plus grand nombre de leurs canetons regagner la colonie une fois adultes. (Love et coll., 2010) (figure 31). Dans les jours qui suivent l'éclosion des œufs, les femelles escortent leurs canetons jusqu'à l'océan pour qu'ils commencent à se nourrir eux-mêmes de petits invertébrés dans les eaux peu profondes. Lorsqu'il y a moins de glace de mer dans la baie et que les canetons comptent sur un plus grand habitat disponible pour se nourrir, ces derniers sont en mesure de commencer immédiatement à faire des réserves pour l'hiver qui arrive, augmentant ainsi leur probabilité de survie.

La glace de mer peut avoir d'importantes répercussions sur les oiseaux marins à de multiples stades de la vie et peut toucher les individus d'une même espèce de différentes façons. Les effets cumulatifs des changements dans la couverture de glace (1) et de la capacité des individus à couvrir leurs œufs au moment le plus opportun (2) peuvent avoir une incidence à plus grande échelle sur le recrutement des canetons au sein de la population. Ces effets sur le recrutement peuvent avoir des conséquences sur la persistance même d'une population.

4.4.2 Sous la glace

Alors que la couverture de glace et de neige atténue fortement la lumière et que les algues de glace en absorbent une grande partie, on croyait généralement que l'environnement sous la glace ne produisait qu'une faible partie de la production primaire des régions couvertes de glace de l'Arctique. Des rapports passés avaient déjà observé la floraison phytoplanctonique sous la glace dans la baie d'Hudson, dans l'archipel arctique canadien et dans la mer de Beaufort (Michel et

coll., 1993; Fortier et coll., 2002; Mundy et coll., 2009). Toutefois, ce sont les observations récentes d'une très importante floraison phytoplanctonique sous la glace de la mer des Tchoukches (Arrigo et coll., 2012, 2014; Palmer et coll., 2014) qui ont remis en question notre compréhension actuelle de la production phytoplanctonique dans l'océan Arctique. Il est probable que les floraisons phytoplanctoniques sous la glace soient plus fréquentes qu'on l'aurait cru, surtout dans un contexte où le climat et la glace de mer subissent des changements (Fortier et coll., 2002; Mundy et coll., 2014).

Une récente étude de modélisation a révélé une augmentation rapide de la probabilité et de l'étendue des conditions propices aux floraisons phytoplanctoniques sous la glace au cours des deux dernières décennies (figure 32). À l'heure actuelle, on estime que jusqu'à 30 % de l'océan Arctique est adéquat à une floraison phytoplanctonique sous la glace en juillet (Horvat et coll., 2017). Cette estimation porte à croire que d'importants changements écologiques dans la production primaire de l'océan Arctique auraient pu avoir lieu et se poursuivront au cours des prochaines années, car un amincissement important de la couverture de glace de mer et une augmentation de l'étendue des mares de fonte permettent une plus grande pénétration de la lumière dans la colonne d'eau (Horvat et coll., 2017).

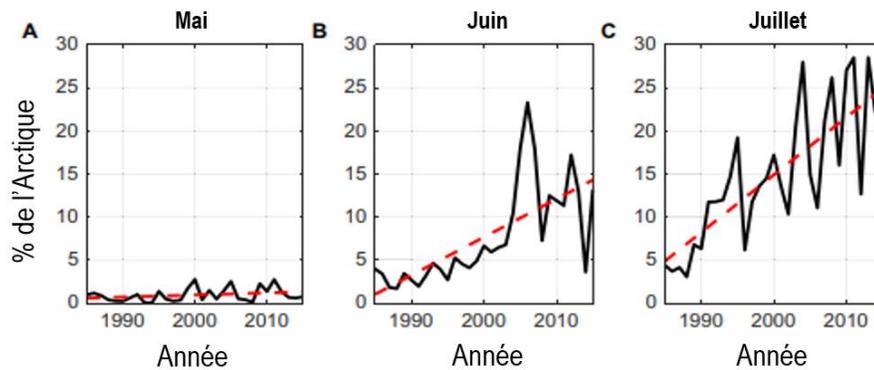


Figure 32. Pourcentage estimatif des régions couvertes de glace de l'Arctique qui sont propices à une floraison phytoplanctonique sous la glace (source : Horvat et coll., 2017).

Le dessous de la glace constitue aussi une zone d'alimentation et de protection pour les poissons et les invertébrés. À son état juvénile, la morue polaire est étroitement associée au dessous de la glace pendant la période de couverture glacielle (Kohlbach et coll., 2017), un habitat également utilisé par le zooplancton de taille micro ou macro (p. ex. les copépodes et les amphipodes). L'habitat du dessous de la couverture glacielle fonctionne d'une façon similaire au benthos, sauf que tout y est inversé. Il est toutefois difficile d'accéder à un tel environnement et de l'échantillonner de façon adéquate. Par conséquent, les mesures directes du réseau trophique de cet habitat demeurent limitées, et il n'existe actuellement aucune information sur les tendances récentes pour l'ensemble des communautés associées au dessous de la couverture glacielle.

4.4.3 La colonne d'eau

Les communautés de phytoplancton de l'Arctique présentent une grande variabilité spatiale liée aux gradients des conditions chimiques et physiques (y compris la glace) allant des plateaux continentaux aux bassins profonds, ainsi qu'entre les régions au-dessus des plateaux

continentaux qui agissent comme entrées des eaux dans l'arctique et de sorties des eaux vers les océans Atlantique et Pacifique (selon Carmack et Wassmann, 2006) (section 6). Les floraisons phytoplanctoniques sont aussi étroitement liées à la saisonnalité, car la noirceur de la période hivernale empêche l'activité photosynthétique (section 4.5). Puis, en février et en mars, dès que la lumière du soleil atteint la surface océanique, le phytoplancton composé de cellules de petites tailles, en particulier de l'espèce *Micromonas*, forment la base d'un réseau trophique de fin d'hiver (Pedrós-Alió et coll., 2015).

Les plateaux continentaux de l'Arctique, riches en nutriments, sont habituellement plus productifs que les bassins profonds. Dans les régions productives de l'Arctique canadien, la production de phytoplancton est dominée par de grandes cellules comme les diatomées centriques du genre *Chaetoceros* et *Thalassiosira*, ainsi que par les groupes de diatomées pennées du genre *Cylindrotheca* et *Fragilariopsis* (Ardyna et coll., 2011). Les dinoflagellés et les haptophytes dominent souvent les parties de l'océan Arctique influencées par les eaux de l'Atlantique Nord (Poulin et coll., 2011). Dans le cadre du projet Green Edge (<http://www.greenedgeproject.info>, en anglais seulement), la floraison phytoplanctonique observée dans la baie de Baffin a montré que cette floraison était dominée par l'haptophyte *Phaeocystis*. En revanche, la productivité primaire dans les bassins profonds souffre souvent de la quantité limitée de lumière et de nutriments, car une forte stratification de la surface isole la couche de surface des eaux profondes riches en nutriments, alors que la variation de la couverture de glace influence les conditions de lumière. Par conséquent, en haute mer, ce sont les conditions oligotrophes qui ont tendance à prédominer, favorisant un phytoplancton de petite taille comme les prasinophytes de l'espèce *Micromonas* (Zhang et coll., 2015).

Dans les écosystèmes des plateaux continentaux canadiens, les producteurs primaires sont influencés par des conditions océanographiques liées aux influences locales et régionales de la répartition, du mélange et de la remontée des masses d'eau, se combinant aux influences climatiques et aux interactions entre les côtes et l'océan à proximité du rivage. Ces processus, ainsi que l'évolution du rôle de la glace de mer dans les écosystèmes en plein changement de l'Arctique, sont abordés dans d'autres sections du présent rapport.

Les conditions océanographiques influencent également la répartition du zooplancton dans la colonne d'eau. La répartition verticale des espèces de zooplancton est influencée par la température et la salinité de l'eau dans la partie canadienne de mer de Beaufort et de la baie de Baffin (Kjellerup et coll., 2015; Smoot et Hopcroft, 2017), et on observe des assemblages de communautés distincts dans différentes masses d'eau. Les assemblages des communautés de zooplanctons dans l'Arctique canadien varient également entre les types d'habitats. La présence de différentes communautés a été observée et documentée dans les habitats du plateau continental et de la mer de Beaufort ainsi qu'au large de ce plateau (Darnis et coll., 2008), et varient entre les régions géographiques (c.-à-d. de la mer du Labrador à la partie est de l'archipel arctique canadien (Pomerleau et coll., 2011)). Les migrations verticales nycthémerales de seulement certaines espèces de copépodes (p. ex. le zooplancton *Metridia longa* dans la baie de Baffin; Kjellerup et coll., 2015) ont été observées et documentées dans l'Arctique canadien. Lors de ces migrations quotidiennes, les copépodes se déplacent vers le haut durant la nuit pour se nourrir, puis redescendent vers les profondeurs durant le jour pour éviter d'être vus par des prédateurs comme les oiseaux marins et les poissons. Ce mouvement peut s'avérer important

pour le transfert d'énergie à l'intérieur de la colonne d'eau et vers les niveaux trophiques plus élevés.

Dans l'Arctique, les habitats de la colonne d'eau qui sont disponibles pour les poissons varient considérablement en ce qui a trait à la salinité et à la température. En fait, ces habitats varient beaucoup entre eux dans les grandes étendues plus près de la rive, et moins dans les régions éloignées de la rive. Ce sont là des facteurs clés qui ont une incidence sur l'occupation de l'habitat par les différentes espèces, et donc sur la diversité locale. À l'échelle spatiale, les habitats sont reliés par zones de profondeur, y compris la glace de mer (surface), la colonne d'eau (pélagique) elle-même subdivisée en niveaux de profondeur, et les zones du fond marin (benthiques), divisées en divers substrats. Les associations de poissons dans les habitats benthiques peuvent inclure une association générale avec le fond marin dans la colonne d'eau inférieure (épibenthique), une association directe avec fond marin (benthique) ou dans certains cas avec un substrat de la zone benthique (p. ex. certaines espèces de loquette dans le substrat meuble du fond marin et les loups de mer [anarrhiques] dans les crevasses où le fond marin est dur). On observe également, au sein des habitats, des variations spatiales en fonction de la longitude et de la latitude qui, en tenant compte de facteurs historiques comme les voies de colonisation, les routes de navigation et les périodes, ont déterminé dans une grande mesure la diversité actuelle des poissons marins (Coad et Reist, 2018).

La grande majorité des espèces de poissons marins de l'Arctique sont benthiques quant à l'utilisation générale de l'habitat que font les poissons adultes et les jeunes poissons ayant atteint une certaine taille, même si les œufs et les larves de plusieurs de ces espèces sont pélagiques (Chernova, 2011; Christiansen et Reist, 2013; Coad et Reist, 2018). Une proportion relativement peu élevée d'espèces utilisent principalement les habitats pélagiques et, quand c'est le cas, ont tendance à utiliser les eaux pélagiques supérieures. Les poissons principalement associés aux habitats pélagiques comprennent plusieurs espèces anadromes, notamment des salmonidés (p. ex. l'omble et le cisco) ainsi que des clupéidés (le hareng). Il s'agit toutefois d'une simple généralisation et il existe des exceptions à la règle. Par exemple, le flétan du Groenland, une espèce généralement associée à la zone benthique, s'éloigne également du fond marin pour se nourrir dans les zones inférieure et intermédiaire de la colonne d'eau. (Giraldo et coll., 2018). Aussi, la morue polaire, que l'on associe généralement à la glace de mer, forme souvent de grands bancs de poissons en zone pélagique, se rassemble dans les zones intermédiaires de la colonne d'eau, et a également des associations épibenthiques.

Dans le cadre de l'évaluation environnementale régionale de la mer de Beaufort – Projet des poissons marins (EERB-PPM) du gouvernement fédéral entre 2012 et 2014, le MPO a travaillé en partenariat avec les Inuvialuit pour effectuer un relevé de la diversité des poissons extracôtiers, de leur répartition et de leurs liens avec l'habitat (Majewski et coll., 2016). Sur la partie canadienne du plateau et du talus de la mer de Beaufort, des relevés au chalut effectués dans la zone benthique entre 18 m et 1 001 m de profondeur ont permis d'échantillonner 34 espèces, représentant environ 44 % (34/77) des espèces de poissons marins et anadromes présentes dans la région désignée des Inuvialuit. Les travaux de l'EERB-PPM sont similaires aux relevés plurispécifiques effectués dans l'ouest de la mer de Beaufort, en Alaska, où 32 espèces ont été enregistrées entre des profondeurs de 40 à 470 m sur le talus et le plateau continental relativement étroits de l'Alaska (Rand et Logerwell, 2010). La majorité des espèces capturées au

cours du projet EERB-PPM étaient relativement rares, huit (8) seulement de ces espèces contribuant à plus de 1 % du total des captures par unité d'effort (les captures par unité d'effort ont été utilisées comme indice d'abondance).

De nombreuses variables différentes peuvent servir à décrire les habitats des poissons marins, y compris des variables physiques, chimiques et biologiques. À titre de variables explicatives de la structure des communautés de poissons observées, la profondeur, la salinité, la température, la quantité d'oxygène, la chlorophylle en suspension, la chlorophylle benthique et la granulométrie des sédiments ont été examinées à la fois séparément et en combinaison. La structure des communautés de poissons dans la partie canadienne de la mer de Beaufort était la plus fortement corrélée à la profondeur de l'eau, et les assemblages étaient généralement délimités en plages de profondeur coïncidant avec des habitats de masse d'eau distincts, comme l'illustre la figure 33 (Majewski et coll., 2017).

Aucune différence significative n'a été décelée entre les communautés de poissons d'est en ouest du plateau continental et de la pente, et la composition des assemblages d'espèces sur le plateau de la partie canadienne de la mer de Beaufort (moins de 200 m de profondeur) ne semble pas avoir changé considérablement par rapport à ce qui avait été observé lors des travaux antérieurs entre 2006 et 2009 (Majewski et coll., 2013).

En ce qui concerne les poissons, ces constatations reflètent un écosystème très structuré, probablement en réponse aux différences dans les caractéristiques des masses d'eau et des éléments moteurs physiques connexes. Dès lors, cette relation peut servir à prédire l'importance potentielle des habitats et des communautés dans le cadre des mesures de conservation et de gestion.

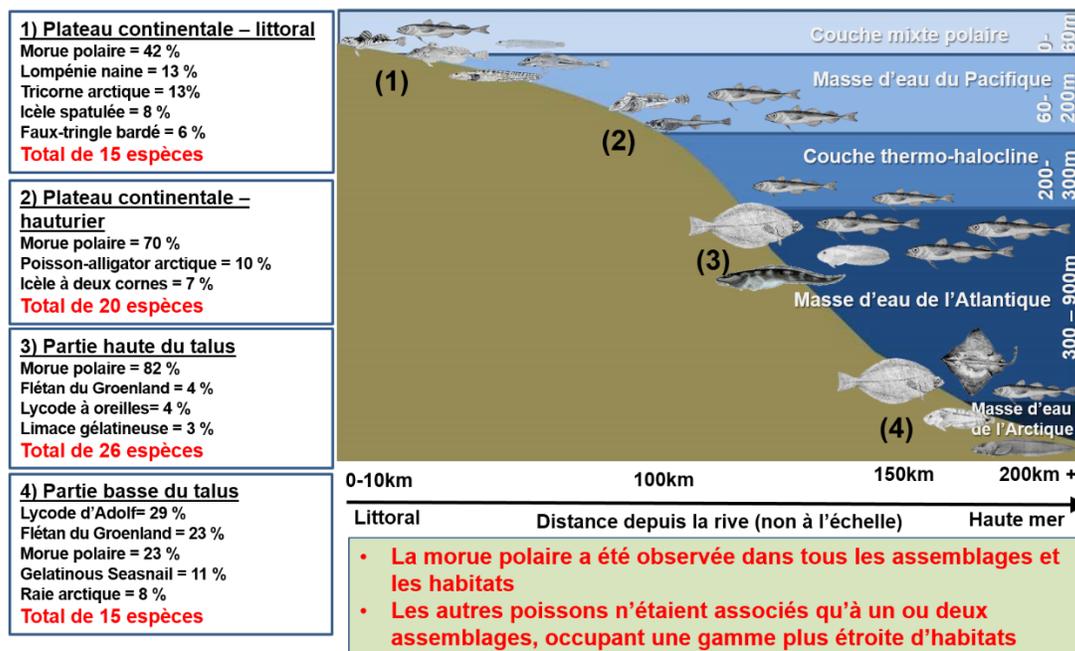


Figure 33. Assemblages de poissons marins et habitats de masse d'eau connexes sur le plateau continental et le talus de la partie canadienne de la mer de Beaufort. Les valeurs de similarité en pourcentage indiquent l'importance relative de chaque espèce dans la caractérisation d'un assemblage. De plus amples détails sont fournis par les travaux de Majewski et coll. (2017).

4.4.4. Le plancher océanique

Les habitats benthiques (le plancher océanique) et leur biodiversité ont été évalués à divers endroits de la région arctique canadienne, et les échantillonnages les plus intensifs ont été effectués dans la mer de Beaufort et la baie de Baffin. Historiquement, peu d'études scientifiques ont été menées dans la baie de Baffin (p. ex. MacLaren Marex, 1978), et les quelques études effectuées s'appuyaient principalement sur un échantillonnage instantané. Au cours de la dernière décennie, des projets de recherche universitaire (p. ex. Link et coll., 2013; Roy et coll., 2015b) et des programmes de recherche universitaires (p. ex. ArcticNet, CHONe) se sont intéressés au benthos dans certaines parties de la région, principalement près des eaux du Nord (étude de cas 8). Depuis 2004-2005, la biodiversité benthique et l'utilisation de l'habitat ont fait l'objet d'une évaluation annuelle en effectuant une surveillance des prises accessoires résultant : 1) des relevés au chalut de fond plurispécifiques stratifiés par profondeur que le MPO effectue chaque année pour évaluer les stocks de flétan du Groenland; et 2) les relevés de la Northern Shrimp Research Foundation (NSRF) et du MPO pour surveiller la crevette nordique (*Pandalus borealis*) et la crevette ésope (*Pandalus montagui*). Ces relevés fournissent de l'information sur la répartition et l'abondance des taxons d'invertébrés recueillis dans les chaluts à différentes résolutions taxonomiques (Siferd, 2015). Compte tenu de l'étendue spatiale et temporelle des relevés plurispécifiques des stocks menés annuellement par le personnel du MPO de la région Centrale et Arctique entre 2004 et aujourd'hui, et en raison de la fréquence (annuelle) de cet échantillonnage, la base de données sur les prises accessoires d'invertébrés compilée dans le cadre de ces relevés demeure la plus pertinente pour établir une mesure de base (une référence) de l'état actuel de la richesse, de l'abondance et de la biomasse des espèces benthiques de la région de la baie de Baffin. Les évaluations des tendances futures qui résulteront des changements océanographiques d'origine climatique peuvent donc s'appuyer sur cette base de données. Pour arriver éventuellement à une identification plus complète et systématique des prises accessoires d'invertébrés, et afin de déterminer les données de référence régionales, deux catalogues de photos sont en cours d'élaboration pour la baie de Baffin et le détroit d'Hudson.

La richesse spécifique de la mega-épifaune (c.-à-d. les grands invertébrés qui habitent le plancher océanique, principalement prélevés au chalut), compilée dans la base de données du MPO (Région Centrale et Arctique – relevés plurispécifiques des stocks) est illustrée à la figure 34. En raison du petit nombre de stations échantillonnées en ce qui concerne la macroendofaune (c.-à-d. les invertébrés de plus de 5 mm vivant principalement dans les sédiments, principalement prélevés par échantillonnage avec bennes et carottiers à boîte), il est actuellement impossible d'établir un schéma de répartition pertinent à l'échelle de la baie de Baffin.

Les invertébrés benthiques habitent la totalité du plancher océanique de la baie de Baffin, qui est loin d'être un désert. Toutes les stations échantillonnées dans la région avaient des invertébrés benthiques. La diversité des invertébrés benthiques prélevés dépend de plusieurs variables environnementales (p. ex. la profondeur ou le substrat) (Roy et coll., 2014), mais elle dépend aussi de la dimension des mailles du chalut utilisé. La figure 34 indique clairement que les chaluts aux mailles plus étroites (12,8 mm) utilisés pour le relevé des crevettes (figure 34a) permettent de prélever une plus grande diversité d'invertébrés benthiques que les chaluts à mailles de 30 mm utilisés pour le relevé du flétan du Groenland (figure 34b). Les communautés de coraux et d'éponges de mer sont particulièrement riches et abondantes dans la baie Baffin

comparativement au reste de l'Arctique canadien (Kenchington et coll., 2011; Roy et coll., 2015b); toutefois, des études approfondies d'autres régions devront être effectuées. La biodiversité observée au sein du benthos est typiquement Arctique-Atlantique et s'avère très comparable aux autres fonds marins de l'Arctique-Atlantique. On retrouve toutefois moins d'espèces associées à la région boréale dans les eaux froides de la partie canadienne de l'ouest de la baie de Baffin que dans les régions plus chaudes de l'Arctique et de l'Atlantique, comme dans le sud-ouest du Groenland, en Islande et dans la mer de Barents (Jørgensen et coll., 2017).

L'hypothèse selon laquelle l'approvisionnement en nourriture, la biomasse benthique et la densité des communautés diminuent en fonction de la profondeur ne pourrait s'appliquer exactement à l'ensemble de la région arctique canadienne, ni à la profonde baie de Baffin. Certaines régions qui abritent des eaux de surface productives et ayant une forte interdépendance pélagique et benthique, comme les eaux du Nord et à la sortie du détroit de Lancaster, peuvent soutenir des communautés benthiques riches et abondantes même à des profondeurs de plus de 500 m (Roy et coll., 2014).

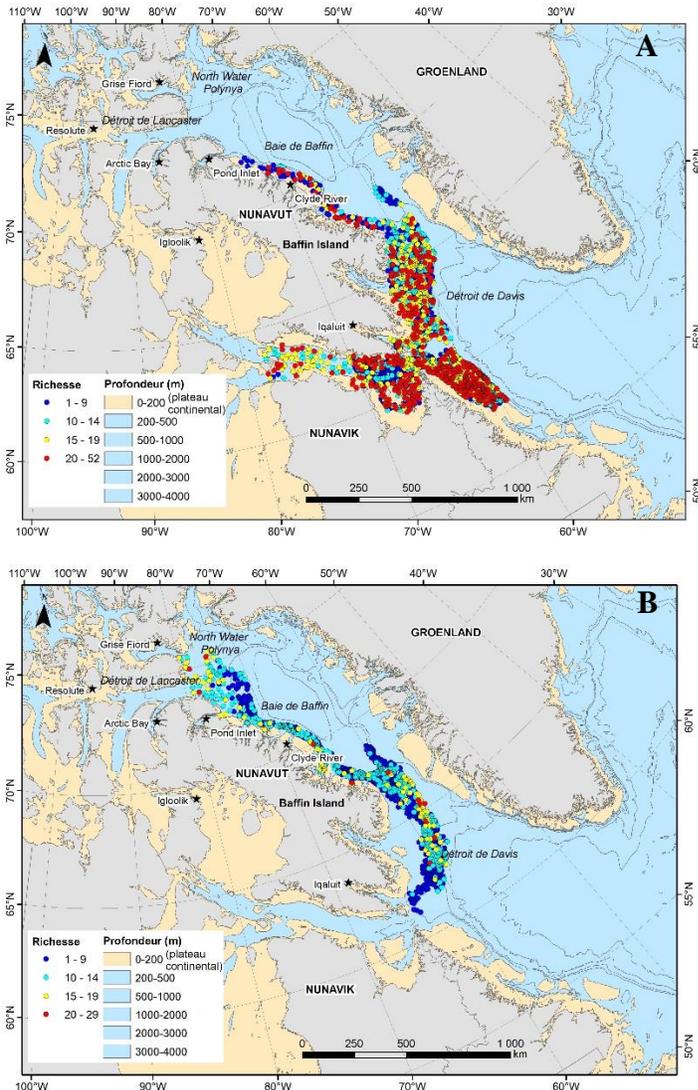


Figure 34. (a) Richesse de la méga-épifaune observée dans le cadre des relevés de crevette de la NSRF et du MPO utilisant les chaluts Campelen et Cosmos de 12,8 mm chacun (2 572 stations de 2005 à 2016; profondeur de 100 à 900 m); (b) Richesse de la méga-épifaune observée dans le cadre des relevés du flétan du Groenland du MPO utilisant le chalut Alfredo de 30 mm (1 034 stations de 2004 à 2016; profondeur de 400 et 1 500 m). La priorité du code de couleur est donnée du rouge au bleu (richesse élevée à faible) en cas de chevauchement des symboles.

ÉTUDE DE CAS 8 : Les eaux du Nord – Sanctuaire de forte productivité et la biodiversité qui y est associée

Pendant la période de couverture de la glace, les polynies fournissent des zones fiables d'eaux libres où les mammifères marins et les oiseaux se rassemblent. Les eaux du Nord de la baie de Baffin, entre le Groenland et le Canada, constituent la polynie la plus vaste et la mieux caractérisée de l'Arctique canadien. La polynie doit son existence à un pont de glace qui se forme habituellement dans le détroit de Nares et qui retient la glace dérivant de l'océan Arctique, ainsi qu'à une combinaison de processus thermiques qui reposent sur l'arrivée d'une chaleur latente (poussée par le vent) et sensible (réchauffement des océans).

Avant que s'opèrent les changements rapides qui ont touché la glace de mer dans l'Arctique au cours des deux dernières décennies, les eaux du Nord, aussi appelées *Pikialasorsuaq*, étaient considérées comme l'une des régions les plus productives de l'Arctique (Deming et coll. 2002). *Pikialasorsuaq* abrite de grandes populations d'oiseaux de mer et de mammifères marins (Heide-Jørgensen et coll. 2013b), et l'établissement humain sur les côtes adjacentes remonte à 4 500 ans avant notre ère (Jeppesen et coll. 2018), ce qui démontre l'importance et la fiabilité de ce secteur. Quatorze espèces d'oiseaux de mer utilisent régulièrement la polynie pour la reproduction et le Mergule nain, (*Alle alle*), est l'espèce la plus abondante avec plus de 30 millions de couples nicheurs (Egevang et coll. 2003; Davidson et coll. 2018). Des colonies reproductrices de centaines de milliers de marmettes de Brünnich (*Uria lomvia*) et de dizaines de milliers d'eiders à duvet (*Somateria molissima*) sont également présentes dans la région (Burnham et coll. 2012; Merkel et coll. 2014). Les mammifères marins dépendent également de cette polynie puisqu'elle est pour eux un refuge contre la couverture de glace et un accès à l'air. Le narval (*Monodon monoceros*), le béluga (*Delphinapterus leucas*) et la baleine boréale (*Balaena mysticetus*) sont des espèces qui fréquentent régulièrement les polynies et les chenaux pendant l'hiver. En 2009 et en 2010, on estimait à plus de 27 000 le nombre de mammifères marins habitant les eaux du Nord au mois de mai, parmi lesquels on comptait des bélugas, des narvals, des morses (*Odobenus rosmarus*), des phoques annelés (*Pusa hispida*), des phoques barbus (*Erignathus barbatus*) et des ours polaires (Heide-Jørgensen et coll. 2013). En avril 2014, plus de 13 500 morses, bélugas, narvals et phoques barbus ont été observés dans la région (Heide-Jørgensen et coll. 2016). Les mammifères marins et les oiseaux de mer dépendent également d'autres polynies de l'Arctique canadien situées dans le sud de la baie de Baffin, le détroit d'Hudson et la baie de Cumberland (Lewis et coll. 2009; Watt et coll. 2016, 2017; Chambault et coll. 2018).

Le dégel précoce des eaux du Nord permet le développement d'une floraison de phytoplancton plusieurs mois plus tôt que dans les eaux voisines couvertes de glace de l'archipel canadien (Tremblay et coll. 2006a; Michel et coll. 2015). Des transferts efficaces vers l'écosystème pélagique (Tremblay et coll. 2006b) soutiennent le réseau trophique marine productive. Une récente analyse chronologique des estimations par télédétection de la biomasse de phytoplancton dans les eaux du Nord au cours des deux dernières décennies (de 1998 à 2014) montre une baisse importante de l'ampleur de la floraison malgré la variabilité interannuelle de la série d'observations (Marchese et coll. 2017). La grande variabilité interannuelle est attribuable à un équilibre fragile entre les forçages océanographiques et climatiques, qui donne lieu à des floraisons plus longues et plus courtes lors des années où la couverture de glace est plus mince ou plus épaisse, respectivement. Le déclin récent de la biomasse et de la production de

phytoplancton est également documenté par des mesures in situ (Blais et coll. 2017) (figure 35) il est attribué à l'évolution des conditions de glace de mer et au retard ou à l'absence de formation du pont de glace dans le détroit de Nares.

Ensemble, ces résultats indiquent que Pikialasorsuaq, une région connue depuis longtemps pour sa productivité élevée, récurrente et prévisible et son abondance de ressources marines, a subi les effets néfastes des changements climatiques au cours de la dernière décennie. En prévision des changements futurs, la Commission Pikialasorsuaq (pikialasorsuaq.org) coordonne les efforts déployés au Nunavut et dans le nord du Groenland pour protéger, surveiller et gérer la santé de la polynie Pikialasorsuaq pour les générations futures. En 2017, la Commission a demandé la création d'une aire protégée délimitée et gérée par les Inuits dans la zone d'importance écologique et culturelle des eaux du Nord (Commission Pikialasorsuaq 2017). Un cadre de mise en œuvre des options de gestion a été établi en 2018.

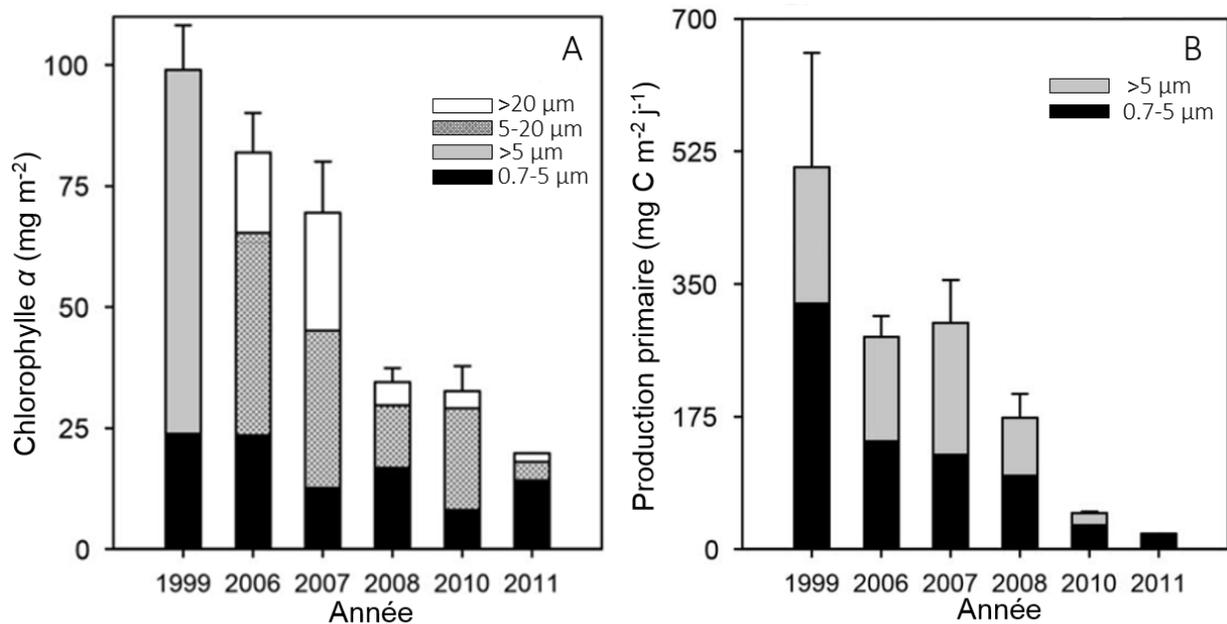


Figure 35. Série chronologique de la biomasse (a) et de la production primaire (b) de chlorophylle *a* fractionnée par taille de 1999 à 2011, à l'automne dans la baie de Baffin. Les données ont été intégrées aux données sur la zone euphotique (jusqu'à 0,2 % d'irradiance en surface). En 1999, seules deux fractions de taille ont été mesurées. Les valeurs ont une moyenne de $\pm 0,5$ au sud-est. En (b), la production des grandes cellules est de $3,2 \text{ mg C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ pour l'automne 2011 (source : Blais et coll., 2017).

ÉTUDE DE CAS 9 : An Apex Predator's Response to Sea-ice Habitat Declines in Western Hudson Bay

À l'échelle mondiale, la perte d'habitat représente l'une des plus grandes menaces pour la conservation des espèces. Dans l'Arctique, on prévoit que le déclin à long terme de l'étendue spatiale et temporelle de la glace de mer aura des répercussions importantes sur les espèces de mammifères marins dépendantes de la glace. Il y a près de 20 ans, les chercheurs ont commencé à voir les effets des changements climatiques sur l'ours polaire (*Ursus maritimus*), le prédateur de niveau trophique supérieur le plus charismatique de l'Arctique (figure 36). À ce moment-là, l'état corporel des ours polaires commençait



Figure 36. Ours polaire sur les rives de la baie d'Hudson (crédit photo : Evan Richardson).

à se détériorer dans l'ouest de la baie d'Hudson en raison de la réduction de l'étendue de la glace de mer et de la disponibilité de leurs principales proies, les phoques qui se reproduisent sur la glace (Stirling et coll. 1999). Des tendances semblables liées à l'état corporel des phoques annelés (*Pusa hispida*) et se rapportant à l'étendue de la glace de mer ont depuis été observées dans la baie d'Hudson (Ferguson et coll. 2017), indiquant ainsi que la glace de mer peut non seulement influencer la disponibilité des proies, mais aussi la qualité des proies consommées. Ces interactions interspécifiques importantes ont probablement joué un rôle prépondérant dans le déclin continu et à long terme de l'état corporel des ours blancs à la limite sud de leur aire de répartition (Obbard et coll. 2016; Sciullo et coll. 2016).

Le cycle biologique de l'ours polaire est intimement lié à la glace de mer, qui lui fournit une plateforme sur laquelle il peut chasser, voyager, s'accoupler et creuser sa tanière. Au printemps, les ours polaires s'attaquent surtout aux jeunes phoques annelés qui sont naïfs et qui constituent une source de nourriture très calorique. Cependant, les données récentes indiquent que les taux d'ovulation, et donc les taux de naissance, des phoques annelés pourraient être influencés par les variations à long terme du milieu marin arctique (Ferguson et coll. 2017), remettant ainsi en question le rôle que joue la glace de mer dans les interactions entre ces deux espèces.

En raison de la réduction de l'étendue de la glace de mer (figure 37), les ours polaires passent maintenant plus de temps sur la terre ferme et ont commencé à utiliser d'autres ressources alimentaires. Cependant, l'évolution du cycle biologique et de la physiologie de l'ours polaire l'a amené à se nourrir de mammifères marins riches en lipides, de sorte que les ressources alimentaires terrestres, comme les œufs d'oiseaux de mer, ne lui permettront probablement pas de maintenir son état corporel dans un contexte marqué par la réduction à long terme de l'étendue de la glace de mer. Certaines données semblent indiquer, comme pour le phoque annelé, que l'ours blanc subit peut-être plus de stress en raison de la réduction à long terme de la disponibilité de ses proies (Environnement et Changement climatique Canada, données non

publiées). On prévoit également que la réduction de l'étendue de la glace de mer augmentera le nombre d'interactions entre l'homme et l'ours polaire (Towns et coll. 2009), ce qui pourrait avoir une incidence sur la survie des individus. Que signifie tout cela pour les populations d'ours polaires?

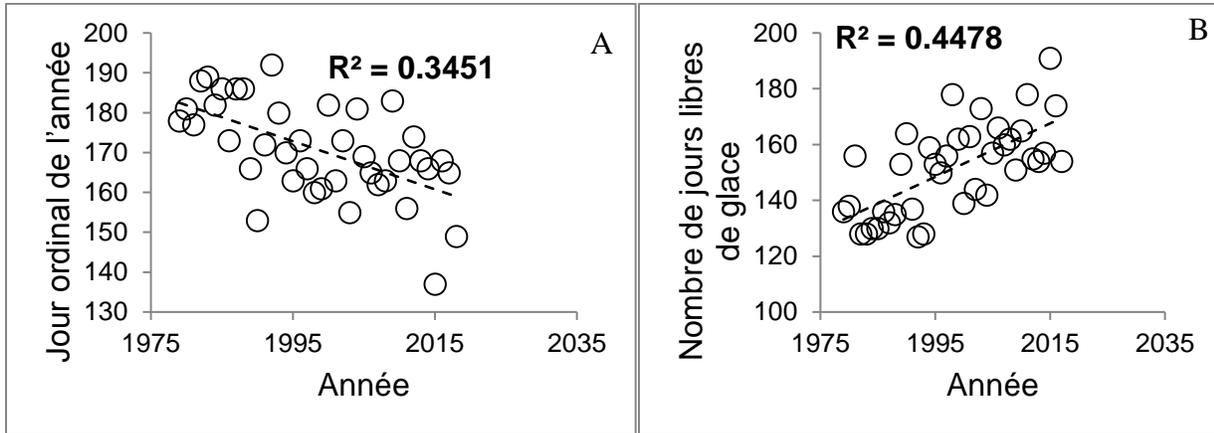


Figure 37. (a) Arrivée précoce de la débâcle à long terme et (b) prolongation de la période sans glace dans l'ouest de la baie d'Hudson au Canada (source des données : Centre national de données sur la neige et la glace, <https://nsidc.org/data/NSIDC-0192>).

En 2016, Lunn et coll. ont publié une analyse à long terme de la démographie de la population d'ours polaires dans l'ouest de la baie d'Hudson qui se penche sur la variation individuelle de la survie par rapport aux changements de la dynamique de la glace de mer. Ils ont constaté que la survie des ours femelles jeunes et adultes était liée à des changements dans la dynamique de la glace de mer qui ont influé sur la disponibilité et la qualité de l'habitat des ours blancs. En même temps, ils ont pu documenter une diminution de 30 % de la taille de la population d'ours polaires de l'ouest de la baie d'Hudson entre 1987 et 2011 (figure 38). Des relevés aériens ultérieurs ont confirmé que la population a diminué pour atteindre environ 842 ours (Dyck et coll. 2017).

La relation mécaniste entre la dynamique de la glace de mer, l'état corporel des ours et, ultimement, la survie de l'ours blanc a été observée ailleurs. Des tendances à la baisse semblables en ce qui a trait à l'état corporel ont été observées initialement par Stirling et coll. (1999) dans l'ouest de la baie d'Hudson et ont maintenant été documentées dans le sud de la baie (Obbard et coll. 2016). Plus récemment, un relevé aérien a révélé un déclin d'environ 17 % de la population d'ours blancs du sud de la baie d'Hudson de 2011 à 2016 (Obbard et coll. 2018). Du point de vue énergétique, l'ensemble de ces données soulignent l'importance que revêt la glace de mer pour l'écologie alimentaire des ours polaires et les conséquences démographiques en aval qui peuvent résulter du déclin à long terme de l'état corporel. Des conséquences semblables chez les populations de proies (p. ex. déclin de l'état corporel du phoque annelé entraînant une réduction de la survie) pourraient avoir des effets en cascade sur la longévité à long terme des ours blancs dans toute leur aire de répartition.

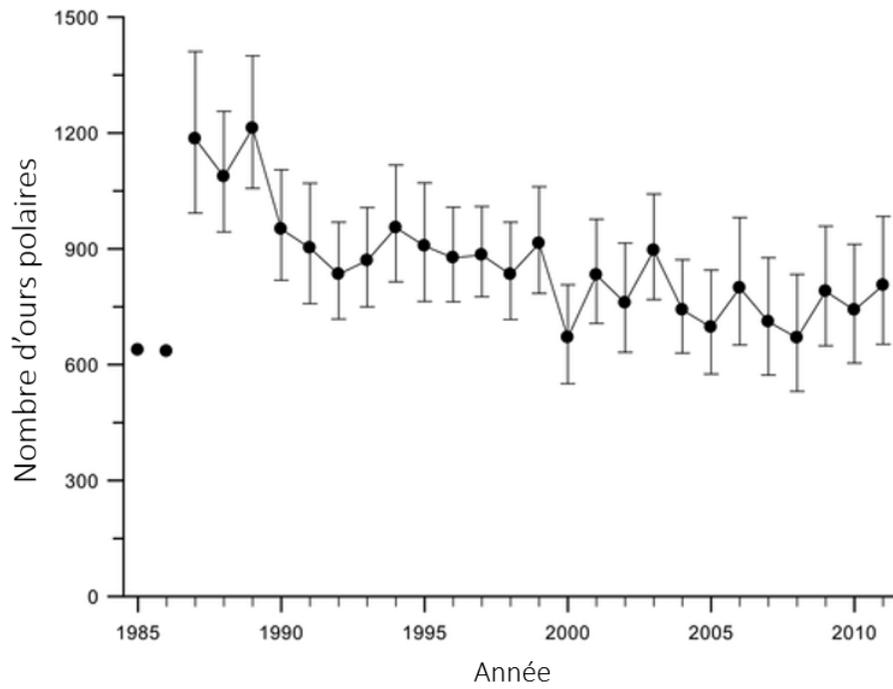


Figure 38. Le déclin à long terme de la taille de la population d'ours polaires de l'ouest de la baie d'Hudson de 1987 à 2011 s'explique par une réduction de la disponibilité de la glace de mer (source : Lunn et coll., 2016).

4.5 Une année dans l'Arctique – Saisonnalité de l'Arctique

La façon dont les saisons sont décrites dans l'Arctique dépend de la personne à qui vous posez la question et des composantes de l'écosystème qui sont prises en compte. Pour les collectivités côtières, la saisonnalité de l'océan Arctique fait partie intégrante de la vie quotidienne. Ces collectivités, profondément enracinées dans la culture et l'histoire inuites, dépendent de l'océan Arctique pour leur subsistance, leurs perspectives économiques et leur mode de vie (Figure 39). La relation étroite entre les collectivités côtières du Nunavut et les changements saisonniers dans l'océan Arctique se reflète dans les données de l'inventaire des ressources côtières du Nunavut. Les saisons sont souvent décrites en fonction des animaux prélevés et des conditions associées à l'utilisation et à l'accessibilité de certains territoires de chasse. Un exemple des connaissances des Inuits sur le narval près de la collectivité d'inlet Pond est décrit à la figure 40. Les connaissances sur l'occurrence éclairent les événements saisonniers liés à la chasse, à l'alimentation, à l'élevage et à la migration.



Figure 39. La lithographie intitulée « Nunavut Qajanartuk » illustre une année dans l'Arctique du point de vue d'une collectivité côtière (source : Nunavut Qajanartuk (Notre belle Terre), Kenojuak Ashevak, 1990, Musée canadien de l'histoire, CD 1990-001, S99-96).

En été, une saison définie par l'absence de glace de mer et le retour des animaux migrateurs, l'accessibilité aux espèces sur le fond de la mer, le littoral et dans la colonne d'eau est à son sommet. L'été est généralement caractérisé par la « saison de navigation » au cours de laquelle les mammifères marins, les poissons et les plantes aquatiques sont prélevés dans les passages et les baies, les invertébrés sont recueillis sur les battures intertidales, et les oiseaux et leurs œufs sont récoltés le long de la côte. L'automne correspond à la période de formation de la glace de mer, le raccourcissement des heures de clarté et le retour de la neige. L'automne est habituellement le moment où l'on récolte les baleines et les poissons en migration vers les zones d'hivernage. L'hiver est caractérisé par la présence de glace de mer, l'absence de soleil et la récolte de spécialités de l'hiver. Les déplacements en hiver se font habituellement en motoneige sur l'eau recouverte de glace, où des mammifères comme le phoque, le morse et l'ours polaire sont prélevés. Le printemps correspond au retour du soleil, à la lente fonte et à la débâcle éventuelle de la glace de mer. Le printemps est caractérisé par la capacité d'accéder à des lieux de chasse pendant de plus longues périodes, la pêche sur la glace et le prélèvement des premiers migrateurs, comme les oiseaux et les baleines.

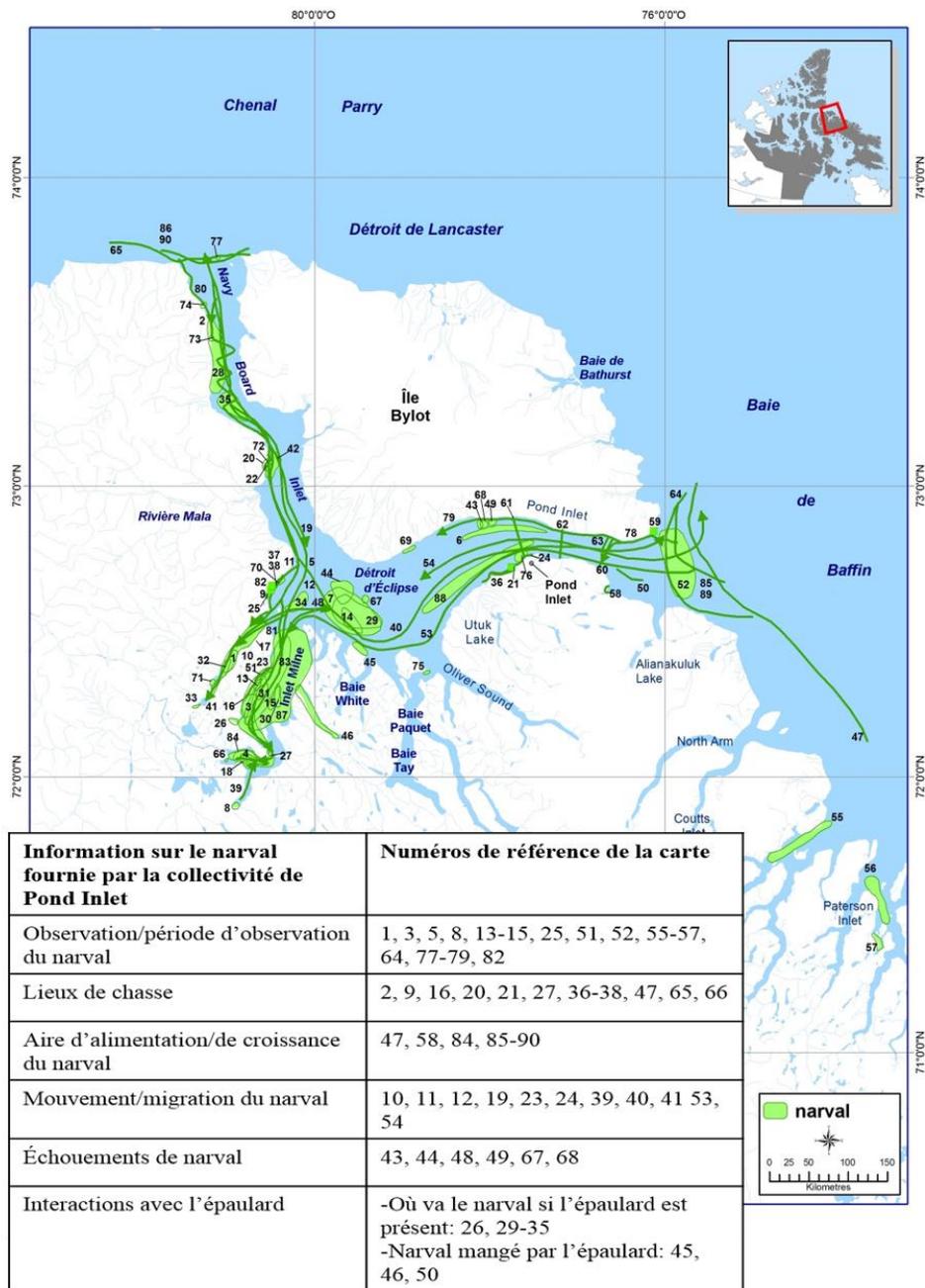


Figure 40. Connaissances traditionnelles sur la présence de narvals près de Pond Inlet (NU) recueillies en 2016 dans le cadre de l'initiative d'inventaire côtier du Nunavut. Les chiffres représentent les contributions individuelles aux connaissances des membres de la collectivité de Pond Inlet. Les flèches indiquent les voies de migration observées par la collectivité, et le tableau en encadré résume les principales catégories d'observation. Les commentaires complets figurent dans le rapport d'inventaire côtier de Pond Inlet.

Au cours des dernières années, des aînés et des chasseurs actifs de partout au Nunavut ont remarqué des changements importants dans les tendances saisonnières du biote. Les participants à l'inventaire des ressources côtières du Nunavut ont fait remarquer que les hivers ne sont pas

aussi froids et que le moment de la formation et de la débâcle de la glace de mer est décalé de plusieurs semaines. De nombreuses collectivités ont également remarqué que les conditions météorologiques sont maintenant en grande partie imprévisibles tout au long de l'année. Ces changements dans les conditions saisonnières ont rendu difficile l'accès sécuritaire aux territoires de chasse traditionnels et ont changé la façon dont les collectivités côtières prélèvent le biote local.

Pour la vie à la base de la chaîne alimentaire marine, la présence de glace de mer recouverte de neige retarde la progression saisonnière dans tout le système, et l'étendue maximale et minimale de glace se produit à l'équinoxe ou peu après. C'est très différent de l'Atlantique Nord, aux latitudes moyennes, où la floraison printanière de phytoplancton survient lorsque les eaux de surface se stratifient avec le réchauffement solaire près de l'équinoxe vernal, suivi de la consommation de nutriments de surface et du déclin de cette floraison. Le mélange subséquent des eaux recouvertes de glace de mer (p. ex. en automne) peut entraîner une floraison à l'équinoxe d'automne.

Pour les producteurs primaires dans les mers recouvertes de glace, il y a effectivement une floraison sous la glace de mer, mais elle se limite en grande partie aux centimètres inférieurs de la glace. La floraison associée à la glace progresse avec le retour de la lumière du soleil après la période hivernale sombre. La floraison d'algues sous la glace de surface fournit la première impulsion d'énergie à l'écosystème arctique au printemps. L'épaisseur de la neige et de la glace et le type de glace influencent le développement et la variabilité spatiale de la production primaire associée à la glace. La croissance printanière continue et l'accumulation d'algues sous la glace de surface font en sorte que la demande en éléments nutritifs dépasse l'offre de la colonne d'eau sous-jacente, ce qui limite les éléments nutritifs et met fin à la floraison. À la surface de la glace, le début de la fonte marque également une transition vers la fin du printemps, avec la fonte de la face inférieure de la glace de surface, ce qui fait que la biomasse après floraison se détache de la face inférieure de la glace et fournit une impulsion de matière organique aux écosystèmes pélagiques (colonne d'eau) et benthiques (fonds marins).

À mesure que la couverture de neige fond, des mares de fonte apparaissent à la surface de la glace, ce qui augmente grandement la transmission de la lumière à l'environnement sous la glace, tandis que la fonte de la glace stratifiée rapidement les eaux de surface. Ces conditions entraînent le début d'une floraison de phytoplancton près du pic d'insolation du solstice d'été. Comme il a été mentionné précédemment (à la section 4.4.2), les floraisons de phytoplanctons sous la glace peuvent se développer sous la couverture de glace fondante, peut-être avec une légère limitation par rapport aux conditions en eau libre. À mesure que la lisière de la glace de mer recule, la floraison sous-jacente suit la répartition spatiale de la glace, avec des différences régionales. On ne sait pas encore si cette floraison à la lisière de la glace de mer est omniprésente dans la région arctique canadienne ou si la lumière ou les nutriments sont des facteurs limitatifs dans certaines régions. La croissance du phytoplancton appauvrit rapidement les éléments nutritifs de surface à mesure que la glace fond, ce qui donne un maximum de chlorophylle sous la surface, alors que les algues se concentrent le long de la nutricline (c.-à-d. profondeur caractérisée par une augmentation rapide des concentrations d'éléments nutritifs), équilibrant la lumière en surface et l'accès aux éléments nutritifs sous la glace. La chlorophylle maximale sous la surface persiste pendant la période en eau libre jusqu'à l'automne, lorsque la décroissance

rapide de l'angle solaire provoque une limitation de la lumière. À mesure que la température de l'air diminue et que les eaux de surface refroidissent, de fortes tempêtes automnales peuvent briser la stratification de surface et mélanger les nutriments qui y sont présents, ce qui peut mener à une deuxième impulsion de la production primaire de surface, aussi appelée « floraison automnale de phytoplancton » (Ardyna et coll. 2014). Avec la formation de nouvelles glaces à la fin de l'automne, il est possible qu'il y ait une courte période de croissance des algues de glace qui se termine au début de l'obscurité polaire. Bien que l'obscurité polaire inhibe la photosynthèse, les communautés microbiennes persistent et demeurent actives. La période hivernale sombre n'est pas synonyme d'océan Arctique inactif.

Le zooplancton est présent tout au long de l'année dans les eaux arctiques canadiennes. Il se reproduit en harmonie avec les algues de glace ou la floraison de phytoplancton afin que les jeunes stades de zooplancton puissent se nourrir dans les eaux de surface. Le zooplancton *Calanus*, le plus important de l'Arctique canadien en ce qui a trait à la biomasse et au transfert d'énergie, se nourrit efficacement d'algues glaciaires et de phytoplancton pendant la floraison et constitue rapidement des réserves de graisse qui lui permet de survivre à des périodes non productives (c.-à-d. diapause) en hiver. De nombreuses espèces de copépodes font l'objet de migrations verticales saisonnières, et les profondeurs de la migration sont documentées comme étant propres à chaque espèce. Par exemple, *Calanus hyperboreus* peut migrer des centaines de mètres vers la couche profonde de l'Atlantique dans la mer de Beaufort canadienne (Darnis et Fortier 2014). Les migrations verticales saisonnières représentent un important transport actif de ressources riches en carbone et en lipides vers les couches de la colonne d'eau inférieure pendant l'automne et l'hiver (Darnis et Fortier 2012), avec des adultes hivernants qui retournent dans les eaux de surface en réponse à la productivité primaire printanière.

Les déplacements saisonniers des poissons sont explicitement évidents pour les espèces anadromes et se produisent également dans certaines espèces marines. Alors que les rivières ouvrent au printemps, les ombles qui ont passé l'hiver en eau douce peuvent migrer vers des habitats marins côtiers pour se nourrir de ressources marines abondantes et maximiser leurs possibilités de croissance avant de devoir retourner en l'automne. Les habitats côtiers et peu profonds qui ont été labourés par les glaces pendant l'hiver ou la débâcle printanière sont recolonisés par les poissons marins et les invertébrés qui tirent parti de la productivité accrue. Même le flétan du Groenland, malgré ses habitats en eau profonde, présente des mouvements saisonniers par rapport à la glace de mer, certains se déplaçant entre des habitats de fjord en hiver vers des habitats plus profonds, souvent le long de la rupture du plateau, en été (section 6.3).

Les mammifères marins appartiennent à deux grandes catégories : les résidents passent toute l'année dans l'Arctique, tandis que les migrants ne visitent l'Arctique que pendant les mois de juin à septembre. Pour la plupart des résidents, les saisons sont marquées par des migrations liées aux préférences et aux besoins en matière d'habitat (annexe A), et les déplacements dépendent des dates de fonte des glaces et de gel qui changent chaque année.

Il y a trois espèces résidentes de baleines (narval, béluga et baleine boréale) et trois pinnipèdes résidents (phoque annelé, phoque barbu [*Erignathus barbatus*] et morse) qui habitent l'Arctique toute l'année, alors que de nombreuses autres espèces migrent vers l'Arctique pendant les mois d'été (annexe B). Les cétacés résidents, comme le narval et le béluga, subissent des migrations

saisonniers vers les polynies et la glace de mer en mouvement en hiver (de décembre à mars environ), et retournent dans les estuaires, les fjords et les bras de mer en été (ils arrivent dans leurs zones d'estivage en juillet et y demeurent jusqu'en septembre environ). Les baleines boréales ont une grande répartition estivale et affichent des déplacements saisonniers dans les régions où la banquise est non consolidée en hiver (Chambault et coll., 2018) (figure 41). Certaines années, pour des raisons inconnues, les baleines quittent leur lieu d'été à la fin de la saison et si la température et les conditions glacielles changent rapidement, elles peuvent se retrouver coincées dans la glace. On ne sait pas à quel point les prises au piège sont courantes, mais en 2008 et 2015, il y a eu deux grands événements de prises au pièges de plus de 1 000 et 600 narvals dans les stocks d'Eclipse Sound. On a jugé que les baleines étaient trop loin de l'eau libre pour échapper d'être coincées dans les glaces et une récolte sans cruauté d'environ 600 et 250 baleines respectivement a eut lieu (MPO, 2018a). Les prises au piège dans les glaces peuvent avoir une incidence négative sur l'abondance des stocks de narvals si elles sont importantes et deviennent plus fréquentes (MPO, 2018a).

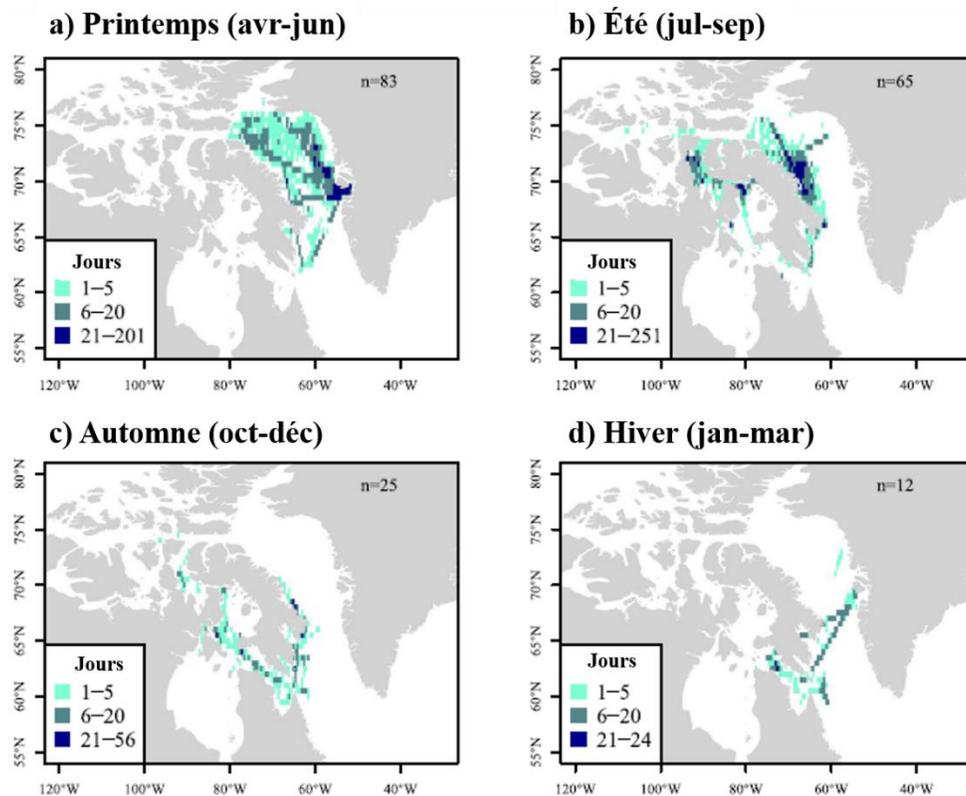


Figure 41. Exemple d'utilisation saisonnière de l'habitat (jours passés dans une même zone) que font les baleines boréales de la population allant de l'est du Canada à l'ouest du Groenland; au printemps (a), en été (b), en automne (c) et en hiver (d) (source : Chambault et coll., 2018).

Les pinnipèdes résidents sont présents dans l'Arctique toute l'année, avec une répartition circumpolaire (annexe B). Les phoques barbues préfèrent généralement un habitat de glace qui est en mouvement constant et qui produit des ouvertures naturelles et des zones d'eau libre, comme des chenaux, des fractures et des polynies pour respirer, se hisser sur la glace et accéder à l'eau

pour se nourrir (Cameron et coll., 2010). Pour demeurer dans leur habitat de glace préféré, les phoques barbus se déplacent généralement vers le nord à la fin du printemps et de l'été, à mesure que la glace fond, puis se déplacent vers le sud à l'automne, à mesure que la glace de mer se forme (Cameron et coll., 2010). Les phoques annelés adultes ont tendance à préférer la banquise côtière avec de la glace stable, une surface rugueuse pour permettre la dérive du vent et des chutes de neige relativement abondantes en hiver, alors que les jeunes phoques annelés demeurent près des polynies et des chenaux d'eau ouverts, ou migrent en saison vers la glace en mouvement près de la lisière de la banquise. Les morses sont répartis sur un vaste territoire et il y a peu de preuves de mouvements saisonniers concertés (COSEPAC, 2017).

ÉTUDE DE CAS 10 : Changements dans la phénologie du phytoplancton des plateaux aux bassins

Le moment des événements du cycle annuel (c.-à-d. la phénologie) influe sur le fonctionnement de l'écosystème marin dans son ensemble. Outre la floraison des algues de glace, la floraison printanière ou estivale du phytoplancton est souvent considérée comme l'événement le plus important du cycle saisonnier de production dans l'Arctique. Le transfert de la production primaire de la floraison phytoplanctonique de courte durée aux niveaux trophiques supérieurs dépend non seulement du couplage temporel et spatial entre le passage des brouteurs et le moment de la floraison, mais aussi de la composition taxonomique de la floraison. Dans un Arctique en plein réchauffement, le recul précoce de la glace de mer et l'englacement tardif modifient la phénologie, de la floraison phytoplanctonique. Les prévisions relatives à une deuxième prolifération automnale due à des saisons d'eaux libres plus longues (Kovacs et Michel 2011) sont maintenant documentées pour l'ensemble de l'Arctique et pour les plateaux canadiens (Ardyna et coll. 2014; Michel et coll. 2015).

La perte de glace pluriannuelle épaisse et l'amincissement général de la glace de mer de l'Arctique sont également à l'origine d'une augmentation marquée de la prévalence des conditions de lumière propices aux floraisons sous la glace. Au cours des dernières décennies, la fonte précoce et importante de la glace de mer a créé des conditions propices au développement de floraisons sous la glace, de sorte que près de 30 % de l'océan Arctique recouvert de glace est devenu un milieu favorable aux floraisons de phytoplanctons sous la glace en plein mois de juillet (Horvat et coll. 2017). L'une des conséquences importantes des floraisons sous la glace est qu'elles consomment une fraction substantielle des éléments nutritifs de surface au détriment de la production primaire dans la zone de glace marginale après le retrait de la glace (Palmer et coll. 2014). Bien que le rayonnement ultraviolet et les brouteurs de zooplancton aient peu d'effet sur la production primaire sous la glace, ils peuvent réduire l'ampleur de la production primaire en eaux libres, ce qui a d'importantes répercussions sur la production transférée aux réseaux trophiques pélagiques ou benthiques. La modification de la période de production primaire peut également avoir une incidence sur la productivité totale de l'écosystème en déséquilibrant la production dans la glace, en dessous de la glace et en eaux libres, et peut nuire aux transferts dans le réseau trophique en entraînant un décalage des cycles biologiques des brouteurs qui peut avoir des répercussions en cascade sur des niveaux trophiques supérieurs.

En plus de ces changements de saisonnalité, on observe également un déplacement de la lisière des glaces du plateau au bassin. Puisque l'emplacement de la lisière des glaces par rapport à la topographie est un paramètre clé de la remontée d'eau profonde et du mélange (Carmack et Chapman 2003), la connaissance de la distribution spatio-temporelle de la lisière des glaces est cruciale pour comprendre et prévoir les changements liés à l'ampleur et au type de producteurs primaires ainsi qu'aux réseaux trophiques qui en dépendent dans un Arctique en pleine évolution. Un schéma illustrant les changements liés à la phénologie de la production primaire sur les plateaux et les bassins, qui sont dus au réchauffement climatique, est présenté à la figure 42 et décrit ci-dessous.

Sur les plateaux productifs de l'Arctique, la débâcle printanière déclenche habituellement une floraison courte et intense à la lisière des glaces. Cette floraison est dominée par de grandes

diatomées, comme les espèces *Chaetoceros* et *Thalassiosira*, qui stockent l'énergie sous forme lipidique et sont très efficaces pour transférer cette énergie aux ressources exploitables, comparativement au phytoplancton de plus petite taille. Dans les régions encore couvertes de glace, la floraison d'algues de glace ou de phytoplancton sous la glace peut survenir lorsque suffisamment de lumière traverse la couverture glaciaire. À la suite de tels événements, la nature de la floraison estivale de phytoplancton change radicalement par rapport à la floraison qui se produit à la lisière des glaces. En réaction au manque d'éléments nutritifs à la surface, la floraison s'étend plus profondément dans la colonne d'eau où elle forme ce qu'on appelle un *maximum de chlorophylle subsuperficiel*. À mesure que les nutriments s'épuisent, de petites cellules phytoplanctoniques remplacent les diatomées, et les espèces adaptées à une faible luminosité, comme les espèces *Micromonas* sp., prennent le dessus lorsque le rayonnement solaire diminue et que l'hiver arrive.

Au cours des dernières années, des floraisons se sont formées à la lisière des glaces, au large des côtes. Bien que les floraisons hauturières soient dominées par les diatomées, l'ordre de grandeur de leur production est d'une fois inférieur à celui des floraisons qui se produisent sur le plateau en raison de la plus petite charge en éléments nutritifs de surface qui caractérise le bassin au départ (Coupel et coll. 2015). Simultanément, sur le plateau, le moment et l'emplacement des points chauds sont susceptibles de changer puisqu'ils dépendent de l'équilibre entre le mélange qui fournit les nutriments et la disponibilité de la lumière, qui sont tous deux liés à l'emplacement de la lisière des glaces. À la bordure du plateau, des conditions de vent favorables à la remontée d'eau profonde peuvent produire des floraisons automnales productives selon l'état de la glace et la lumière du jour.

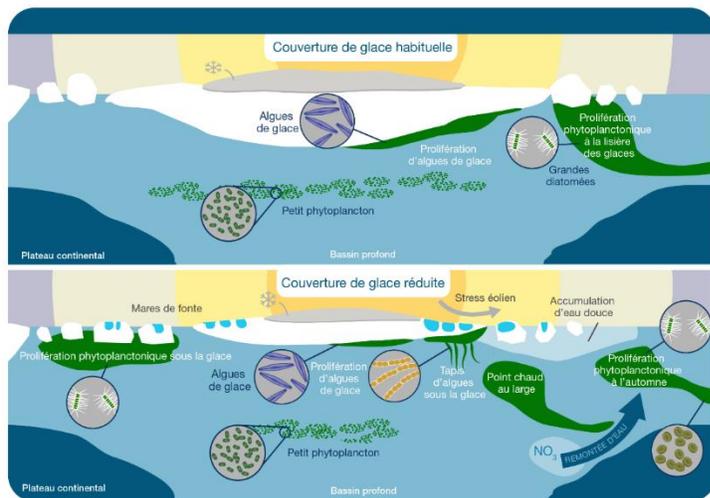


Figure 42. Changements phénologiques de la production primaire de la glace de mer et de la colonne d'eau dans des conditions habituelles (panneau supérieur) et réduites (panneau inférieur) de couverture de glace sur les plateaux et dans les bassins de l'Arctique.

Les différences régionales relatives au moment et à l'étendue de la superficie d'eaux libres ont d'importantes répercussions sur la phénologie des floraisons phytoplanctoniques (Barber et coll. 2015). Dans la mer de Barents, qui est influencée par l'Atlantique, les floraisons de phytoplancton commencent dès la fin avril alors qu'elles se développent habituellement après la mi-juin (Mundy et coll. 2014) ou la mi-juillet (Arrigo et coll. 2012) dans le secteur canadien. Dans l'ensemble, la dynamique complexe de la glace de mer influe sur le moment, l'emplacement, l'ampleur et la composition des producteurs primaires sur les plateaux et les bassins profonds

de l'Arctique. Notre compréhension globale de la phénologie du phytoplancton par rapport à la dynamique des glaces est remise en question par les changements rapides qui sont en cours, et les effets de la cascade trophique ne sont toujours pas bien compris.

4.6 Biodiversité

Les évaluations de la biodiversité de l'océan Arctique ont été menées par le Groupe de travail sur la conservation de la flore et de la faune arctiques (en anglais; Conservation of Arctic Flora and Fauna, CAFF) du Conseil de l'Arctique, qui a fourni une base de référence pour évaluer les changements (CAFF, 2013, 2017). Les principales conclusions du rapport de 2017 de groupe de travail sur la conservation de la flore et de la faune arctiques indiquent que la biodiversité dans l'Arctique canadien est et continuera d'être touchée par 1) l'expansion vers le nord des espèces arctiques; 2) l'augmentation saisonnière du nombre et de la diversité des espèces du sud dans les eaux arctiques (p. ex. épaulards, saumons, étude de cas 14); et 3) la disponibilité des ressources alimentaires. Le rapport souligne également la nécessité d'une surveillance à long terme de la biodiversité et des écosystèmes face aux changements environnementaux cumulatifs en cours. La richesse des espèces n'a pas été expressément abordée dans le rapport sur la biodiversité de 2017, mais les évaluations antérieures pour l'ensemble de l'Arctique signalent 2 000 taxons de phytoplancton, > 1 000 protistes associés à la glace, > 50 métazoaires associés à la glace, environ 350 espèces de zooplancton, > 4 500 protozoaires et invertébrés benthiques, ≥160 macroalgues (p. ex. varech), 243 poissons, 64 oiseaux de mer et 16 mammifères marins (Bluhm et coll. 2011).

Des espèces continuent d'être découvertes (tableau 3) dans l'Arctique canadien, et de nombreuses régions n'ont pas encore été explorées en ce qui concerne la richesse des espèces à de multiples niveaux trophiques. Par exemple, dans certaines régions de l'est de l'archipel canadien, on estime que jusqu'à 59 % des taxons mégabenthiques n'ont pas encore été découverts (Roy et coll., 2015b). Le tableau 3 fournit un résumé des études récentes qui contribuent à notre compréhension et à notre évaluation de la biodiversité marine dans la région de l'Arctique canadien.

4.6.1. Adaptation et résilience

La capacité d'adaptation des espèces marines de l'Arctique a fait l'objet de récentes études visant à déterminer la résilience des écosystèmes arctiques. La résilience des écosystèmes se réfère à la capacité de réagir aux perturbations et de se réorganiser tout en subissant des changements pour maintenir des fonctions critiques. Il est important de comprendre la résilience étant donné que les changements climatiques sont en partie responsables de la transformation rapide de la dynamique des écosystèmes marins de l'Arctique. La modélisation à grande échelle (temporelle et spatiale) des données recueillies au moyen de relevés scientifiques multi-espèces a montré un changement graduel de la répartition des organismes marins qui leur permet de faire face à l'augmentation des stress physiologique (p. ex. élévation de la température) et comportementaux (p. ex. interactions prédateurs-proies changeantes) causés par les changements climatiques dans les écosystèmes de l'Arctique (Cheung et coll., 2010; Fossheim et coll., 2015; Miller et coll., 2018). En plus de ces progrès quantitatifs, des explications mécanistes de la capacité d'adaptation des espèces (p. ex. la morue polaire) ont été évaluées (Drost et coll., 2016) et les caractéristiques propres aux espèces, comme la température, la salinité, le pH et les limites de tolérance à l'oxygène dissous, ont été examinées dans le cadre d'un effort récent visant à élaborer une base de données physiologiques pour les espèces de l'Arctique et de la région

subarctique (Steiner et coll., 2018). Cette base de données contient des renseignements sur 17 espèces, l’omble chevalier étant la seule espèce d’intérêt commercial (Steiner et coll., 2018). Des outils génomiques sont également mis au point pour déterminer le potentiel d’acclimatation et d’adaptation des individus en identifiant les gènes candidats dont l’expression est directement liée à un mécanisme d’adaptation aux changements climatiques (Franks et Hoffmann, 2012). Par exemple, des marqueurs génétiques Arctic Char sont en cours d’élaboration pour surveiller les facteurs de stress thermique et le potentiel de rétablissement dans des conditions physiologiques stressantes (Quinn et coll., 2011). Des données sont fournies sur la capacité des espèces arctiques à s’adapter au changement. Toutefois, d’autres recherches sont nécessaires pour prédire la résilience à long terme des écosystèmes marins de l’Arctique canadien.

Tableau 3. Évaluations et études récentes sur la biodiversité dans la région arctique canadienne.

Espèce/Groupe	Nouvelles connaissances	Références
Eucaryotes unicellulaires marins (phytoplancton)	1 229 espèces dans l’Arctique canadien, les organismes unicellulaires forment une part importante de la diversité totale des espèces.	Poulin et coll., 2011
Eucaryotes unicellulaires glaciaires (algues et protistes glaciaires)	540 espèces dans l’Arctique canadien, forte contribution des espèces de diatomées.	Poulin et coll., 2011
Poissons marins	Les 221 espèces de poissons marins (58 familles) connues dans l’Arctique canadien sont décrites dans un recueil complet comprenant des répartitions (occurrences) propres à chaque espèce. Des relevés au chalut (2012-2017) dans la mer de Beaufort ont permis d’identifier environ 16 nouvelles occurrences de poissons marins. Les relevés au chalut (annuels depuis 2004) dans la baie de Baffin et le détroit de Davis appuient la surveillance continue de la biodiversité benthique.	Jørgensen et coll., 2011; Majewski et coll., 2016; Coad et Reist, 2018
Répartition géographique du benthos arctique canadien	774 taxons benthiques identifiés dans les collections des musées (1920 aux années 1980). 527 taxons benthiques identifiés à partir de collections sur le terrain (2007 à 2011).	Roy et coll., 2015b; Roy et Gagnon, 2018
Copépodes <i>Monstrilloides</i>	Nouvelles espèces identifiées dans la région de Kitikmeot.	Delaforge et coll., 2017
Vers tubicoles <i>Siboglinidae</i>	Première communauté chimiotrophe vivante documentée dans l’ouest de l’océan Arctique	Paull et coll., 2016

	Associée à des volcans de boue actifs sur le versant continental de la mer de Beaufort canadienne.	
Polychètes sédentaires benthiques	Quatre nouvelles mentions et une nouvelle espèce de l'archipel canadien.	Løpez et coll., 2017
Évaluation de la diversité benthique dans les ports de l'Arctique	Études sur les invertébrés benthiques pour les espèces non indigènes et la qualité de l'habitat pour les espèces envahissantes potentielles liées à la navigation.	Goldsmid et coll., 2014; Goldsmid et coll., 2018
Cryptophytes (baie de Baffin)	Nouvelle famille (<i>Baffinellaceae</i>), genre et espèce décrits.	Daugbjerg et coll., 2018
Amphipodes d'eau marine	100 espèces putatives de l'Arctique canadien identifiées par codage à barres de l'ADN.	Tempestini et coll., 2018

ÉTUDE DE CAS 11 : Biodiversité des poissons de l'Arctique marin du Canada

Nous avons jusqu'à présent observé la présence d'environ 221 espèces appartenant à 138 genres et à 58 familles de poissons dans les eaux marines de l'Arctique canadien (Coad et Reist, 2018) (figure 43). Parmi ce nombre, 24 espèces appartiennent à six familles de poissons anadromes (qui remontent les fleuves pour pondre). On estime qu'il existe plus de 32 000 espèces de poissons distinctes à l'échelle mondiale (Nelson, 2006), dont près de 15 800 espèces marines et plus de 225 espèces diadromes (réunissant des espèces anadromes et catadromes). Ainsi, la biodiversité présente dans les eaux marines de l'Arctique canadien est, dans l'ensemble, relativement faible. En effet, l'ichtyofaune marine de l'Arctique représente seulement 25 % des familles et 15 % de la totalité des espèces de poissons que l'on retrouve au Canada (sachant que la totalité de l'ichtyofaune marine et d'eau douce du Canada compte environ 1 439 espèces appartenant à 233 familles). On ne connaît toujours pas le nombre exact d'espèces de l'océan Arctique, ce qui est attribuable aux incertitudes liées à la taxonomie et à la répartition des espèces, à l'abondance variable des taxons et à leur répartition souvent regroupée, à des taux rapides de changements dans les distributions en raison de la variabilité / modification environnementale croissante et à l'insuffisance de données provenant d'un échantillonnage continu. Par conséquent, l'état actuel des connaissances relatives aux poissons marins, comme le résumé Coad et Reist (2018), est incomplet et probablement désuet, d'où la nécessité de documenter de façon continue les changements et les nouvelles espèces observées.

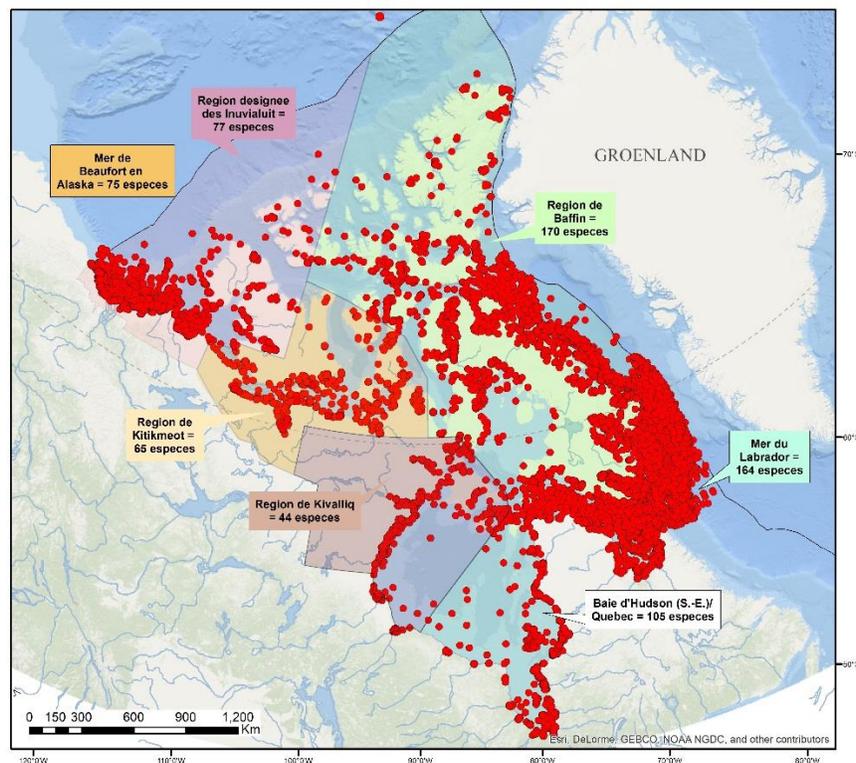


Figure 43. Nombre d'espèces de poissons marins et anadromes par région de la zone à l'étude. Les points rouges indiquent les présences documentées de toutes les espèces de poissons marins.

Quelles sont les sortes de poissons qui vivent dans l'océan Arctique canadien? On y observe la présence d'environ 20 espèces de poissons sans mâchoires (soit la myxine [1] et la lamproie [1]) ou cartilagineux (soit les chimères [3], les requins [5], les raies [9] et l'esturgeon [1]), tandis que les 201 autres espèces issues de 49 familles sont des poissons dotés de nageoires à rayons (Coad et Reist, 2018). L'espèce la plus nombreuse et couvrant la plus grande étendue géographique est la morue polaire (*Boreogadus saida*). À l'opposé, la présence du brotule arctique (*Bythites fuscus*), une espèce endémique des profondeurs de l'Arctique (c.-à-d. qu'on ne la retrouve nulle part ailleurs), est uniquement attestée par trois spécimens recueillis entre l'île de Baffin et le nord-ouest du Groenland. Sur le plan écologique, on ne connaît toujours pas exactement le rôle et l'incidence de plusieurs de ces espèces, en particulier les espèces qui vivent dans les eaux plus profondes. On estime généralement qu'une plus grande diversité permet une plus grande stabilité de la structure et du fonctionnement des écosystèmes, soulignant l'importance globale d'une grande diversité. Par conséquent, malgré la rareté de plusieurs des espèces de l'Arctique et la faible diversité de certaines familles de poissons, les efforts de conservation et de gestion adéquats devront nécessairement être mis en œuvre.

Les présences des espèces ne sont pas distribuées de façon égale dans l'ensemble des eaux marines arctiques du Canada. En effet, les disparités géographiques des espèces observées sont influencées par la proximité des mers et des océans adjacents, ainsi que par des facteurs abiotiques qui varient géographiquement, dont les courants et la structure des masses d'eau (Majewski et coll., 2017) ainsi que les obstacles physiques (p. ex., Bouchard et coll., 2018). En outre, des facteurs historiques comme le moment où la déglaciation s'est produite et les schémas de déglaciation, de même que la montée du niveau d'eau postglaciaire, ont eu une incidence sur l'accès des poissons à l'Arctique canadien et sur la colonisation des eaux. Cela étant, voici le nombre d'espèces présentes dans différentes sous-zones, d'est en ouest et au sud de l'Arctique canadien (figure 43) : 1) région désignée des Inuvialuit (Territoires du Nord-Ouest) – 77 espèces; 2) Kitikmeot (Nunavut) – 65 espèces; 3) Baffin (Nunavut) – 170 espèces; 4) Kivalliq (Nunavut), y compris l'ouest de la baie d'Hudson et les côtes de l'Ontario et du Manitoba – 44 espèces; 5) sud-est de la baie d'Hudson (et au Québec) – 105 espèces. Les combinaisons d'espèces observées au sein d'une même sous-région n'étant pas mutuellement exclusives, ces chiffres représentent des sous-ensembles du total de 221 espèces pour l'ensemble de la région.

En plus des 221 espèces connues dans les eaux canadiennes, près de 21 espèces *extra-limites* (dans les eaux marines adjacentes) vivent dans les eaux de mer de Beaufort et de la mer des Tchouktsches du côté de l'Alaska, mais n'ont jamais encore été observées dans les eaux arctiques de l'ouest du Canada. De même, environ 100 espèces sont présentes dans les eaux adjacentes du Groenland et du nord-ouest de l'Atlantique, mais n'ont jamais encore été observées dans les eaux de l'est de l'Arctique canadien. Puisque la majorité de ces espèces vivent en eaux plus profondes, il peut s'avérer difficile de documenter leur présence puisque des efforts spécialisés seraient nécessaires. Néanmoins, ces espèces pourraient éventuellement s'ajouter à la diversité de poissons dont la présence est connue dans les eaux canadiennes de l'Arctique (Coad et Reist, 2018). Des travaux récents portent à croire que certaines espèces pourraient s'étendre dans les eaux canadiennes sous l'effet de phénomènes migratoires vagabonds (c.-à-d. une répartition dépassant des limites connues des zones de reproduction) et possiblement d'une colonisation – p. ex. du saumon du Pacifique (espèce *Oncorhynchus*) – dans l'ouest de l'Arctique (Dunmall et coll., 2013). Une surveillance continue sera nécessaire pour documenter ces présences et

déterminer si ces espèces se sont reproduites (c.-à-d. par voie de colonisation) dans les eaux arctiques canadiennes. Pour toutes les nouvelles espèces observées, il est important de faire la distinction entre une nouvelle information au sujet d'une espèce qui se trouvait déjà dans la région et l'observation d'une espèce dont la présence est récente. Ainsi, bien que plusieurs espèces dont on a récemment observé la présence dans la partie canadienne de la mer de Beaufort représentent un nouveau nombre record pour le Canada (environ 16 nouvelles espèces), ces observations sont sans doute plutôt attribuables à une hausse des efforts d'échantillonnage dans ces régions sous-échantillonnées ou nouvellement échantillonnées qu'à de récentes colonisations d'espèces (Majewski et coll., 2016).

Dans l'est de l'Arctique, la baie de Baffin et le détroit de Davis forment une zone très diversifiée (170 espèces). D'autres zones caractérisées par une grande diversité de poissons semblent se situer là où des habitats distincts se rencontrent, ou encore là où différentes masses d'eau se croisent (Majewski et coll., 2017). De plus amples travaux seront nécessaires pour mieux caractériser ces régions sur le plan écologique et comprendre leur importance dans le maintien de la biodiversité. Le point le plus au nord de la région à l'étude où une espèce a été observée est le nord-ouest de l'île d'Ellesmere, où un seul spécimen de lycode glaciale (*Lycodes frigidus*) a été trouvé (Coad et Reist, 2018). Bien que d'autres espèces de poissons vivent sans doute sous la banquise polaire, notre connaissance des poissons de l'extrême Arctique est limitée par le peu d'échantillonnage ayant été effectué jusqu'à présent.

En examinant les processus postglaciaires (p. ex. les schémas de dissolution des masses de glace de l'ère glaciaire, les entrées d'eau douce de la fin du Pléistocène ainsi et les schémas océanographiques actuels), la presqu'île de Boothia semble représenter une frontière entre les zones zoogéographiques à l'ouest et à l'est (Coad et Reist, 2018). Ainsi, 136 espèces de l'Arctique (soit 61,5 % de toutes les espèces de l'Arctique canadien) sont uniquement présentes à l'est de la presqu'île de Boothia; 30 espèces (13,6 %) sont seulement présentes à l'ouest et 54 espèces (24,4 %) sont présentes dans les deux régions. Ces différences zoogéographiques sont pertinentes sur le plan de la structure, de la fonction et de la stabilité de l'écosystème, mais aussi en ce qui a trait à l'utilisation que l'humain peut faire des poissons marins.

Le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) et l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) ont évalué un grand nombre (mais pas la totalité) des taxons de poissons marins de l'Arctique canadien. Les constatations du COSEPAC concernant les taxons sont les suivantes : Non en péril – 2; données insuffisantes – 6; préoccupante – 6; menacée – 4; en voie de disparition – 3 (Coad et Reist, 2018). Les évaluations de l'UICN sont les suivantes : données insuffisantes – 4; risque faible/préoccupation mineure – 2; préoccupation mineure – 34, quasi menacée – 3; vulnérable – 2; en voie de disparition – 2. Au Canada, le Groupe de travail national sur la situation générale des espèces effectue lui aussi, tous les cinq ans, une évaluation de l'état d'un large éventail d'espèces. Les résultats les plus récents ont été publiés en 2016 (par le CCCEP [Conseil canadien pour la conservation des espèces en péril], CESCC, 2016). Dans la région ouest de l'Arctique, les espèces de poissons marins et anadromes ont été évaluées de la façon suivante : non en péril – 8; apparemment non en péril – 3; vulnérable – 2; en péril – 1; non classable – tout le reste (CESCC, 2016; Sawatzky et coll., 2018). Voici les résultats pour la partie est de l'Arctique : non en péril – 15; vulnérable – 6; en péril – 4; non classable – tout le reste (CESCC, 2016; Sawatzky et coll., 2018). Selon ce que

présentent ces sources, les nombreux taxons de la catégorie « données insuffisantes » ou « non classable » reflètent la nécessité de mener un important travail de fond pour combler les lacunes dans nos connaissances.

Notre base de connaissances est restreinte par l'inégalité ou l'absence des efforts visant à échantillonner les poissons marins dans certaines zones ou certains habitats (ou à l'aide d'équipements particuliers, y compris pour le chalutage en eau profonde). Une surveillance inadéquate, à l'échelle spatiale comme à l'échelle temporelle, exacerbe cette situation. Par conséquent, il demeure difficile de déterminer si une espèce nouvellement observée dans la région est le résultat d'un réel changement (p. ex. une présence vagabonde ou une colonisation) ou de nos connaissances encore lacunaires de ladite région. De même, il est impossible de déterminer avec précision la pertinence écologique d'une espèce, les réactions aux moteurs de changements et stressés environnementaux, voire d'évaluer l'état d'un écosystème. Il sera donc nécessaire de concevoir et d'exécuter des programmes de surveillance complets, à l'échelle spatiale (emplacement, habitats) et temporelle (fréquence) à l'ensemble du territoire de l'Arctique marin canadien.

5.0 Variabilité des écosystèmes

La variabilité étant une condition inhérente des écosystèmes de l'Arctique, il s'agit d'un facteur clé permettant de décrire l'état d'un système. Il est essentiel de comprendre la variabilité pour bien cerner ou prédire le changement et pour gérer les ressources de l'Arctique. La variabilité complique notre capacité à appliquer des généralisations à l'échelle de l'océan Arctique.

Le fait que les écosystèmes arctiques varient au fil du temps et selon l'emplacement est bien connu des peuples autochtones. Les connaissances inuites font état de la variabilité relative à de nombreuses composantes des écosystèmes, y compris la glace de mer (étude de cas 5), l'état des poissons côtiers, la présence ou l'absence d'espèces (p. ex., la méduse) et les habitudes migratoires (Brown et Fast, 2012; Brewster et coll., 2016; Byers et coll., 2019). Même si la variabilité fait partie de l'état naturel des écosystèmes, elle pose souvent problème dans la mesure où nous ne sommes pas en mesure de bien cerner la cause de la variabilité observée, ou de discerner à quel moment une variabilité est plutôt devenue un changement observable. La variabilité de composantes clés des écosystèmes arctiques (p. ex. la glace de mer, la pompe biologique) est liée à des variables comme la température de l'eau, le vent et la circulation océanique. Ces variables sont à leur tour touchées par des facteurs sus-jacents, dont la variabilité climatique inhérente générée par l'aspect naturellement chaotique du système climatique ainsi que par des forçages externes à l'échelle mondiale (p. ex. les gaz à effet de serre, l'ozone, etc.) et d'autres facteurs de stress locaux ou régionaux (section 1.3). Compte tenu de l'état actuel des connaissances sur les écosystèmes et le système climatique de l'Arctique, il est difficile de cerner les causes de la variabilité. Par conséquent, il est impossible de prédire la sécurité (dans un contexte de sécurité alimentaire pour les communautés) et la stabilité des écosystèmes arctiques, notamment en ce qui concerne les ressources de subsistance, culturelles et économiques, avec un degré de certitude élevé.

Les participants ont indiqué que le capelan est arrivé en grand nombre dans la région au cours des 5 à 7 dernières années. Il y en a tellement qu'ils forment une masse noire dans l'eau. Selon eux, l'omble chevalier anadrome se nourrit maintenant de cette abondante espèce, ce qui entraîne un changement de la couleur et du goût de sa chair (Nunavut Coastal Resource Inventory – Pangnirtung 2013).

J'ai l'impression que la glace s'amincit continuellement. Mais elle change chaque année, c'est-à-dire qu'elle est différente (Jobie Attitaaq, 2004, baie de l'Arctique, au Nunavut). [Traduction libre d'une citation tirée d'Archer et coll., 2017].

Le climat de l'Arctique dans son ensemble a considérablement changé au cours des dernières décennies (section 1.3). Les changements climatiques et la variabilité du climat ont été causés par des forçages externes (p. ex. les émissions de gaz à effet de serre), mais aussi par l'interaction naturelle entre les composantes du système climatique (c.-à-d. des interactions complexes entre l'atmosphère, la cryosphère marine et continentale et les systèmes océaniques) (IPCC 2013). La section 5.1 fournit un aperçu des principaux modes de variabilité climatique qui ont, en fin de compte, une incidence sur l'ensemble des composantes de l'écosystème marin. Ces modes de la variabilité climatique naturelle exercent une influence à des échelles temporelles allant de quelques jours à plusieurs décennies.

Pour ce qui est de l'océan Arctique canadien, nous ne sommes pas en mesure de fournir une description unifiée de la variabilité de l'écosystème pour l'ensemble des composantes écosystémiques. La collecte de données n'est pas assez uniforme à l'échelle de l'Arctique pour le permettre. À ce sujet, les sections suivantes présentent les tendances temporelles relatives à des zones de l'environnement océanique où des ensembles de données à long terme permettent d'évaluer la variabilité moyenne et connexe au cours des dernières années. Un exemple de variabilité/changement à l'échelle spatiale qui revêt une importance écologique par rapport aux producteurs primaires, ainsi que des exemples régionaux précis où la variabilité à une incidence sur les poissons et les mammifères marins sont présentés. Les études de cas qui suivent présentent des exemples de variabilité écosystémique dans la mer de Beaufort et le nord de la baie d'Hudson.

5.1 Variations atmosphériques dans l'Arctique

Il y a amplement de preuves de l'incidence de l'atmosphère sur la glace de mer dans l'Arctique. Par exemple, la très importante perte de glace de mer qui a été observée dans l'Arctique en 2007 (figure 4) a apparemment été causée par des conditions de vents et des températures de l'air anormalement élevées dans l'ouest de l'Arctique (Stroeve et coll., 2008) en combinaison avec une entrée d'eau accrue (Woodgate et coll., 2010) et une diminution du couvert nuageux (Kay et coll., 2008) dans le détroit de Béring. En 2012, alors que la glace de mer était déjà mince, une violente tempête dans le centre de l'Arctique a eu pour effet de réduire la couverture de glace de l'Arctique à la plus faible étendue jamais observée à ce jour (Zhang et coll., 2013).

L'énergie qui alimente la circulation océanique est engendrée par l'influence gravitationnelle du soleil et de la lune (les marées), par les différences de chaleur solaire, d'évaporation/précipitation et de gel/fonte à l'échelle mondiale, et par les vents. L'apport de l'énergie marémotrice varie principalement sur des cycles semi-quotidiens et quotidiens qui sont réguliers et prévisibles; sa variation sur des intervalles décennaux n'est pas préoccupante. L'atmosphère, quant à elle, influence les autres composantes de l'environnement terrestre – c'est-à-dire la terre, la mer, la glace et la neige – tout en étant elle-même influencée par ces dernières. De telles interactions bidirectionnelles entre deux éléments peuvent générer des comportements chaotiques et cycliques. Lorsque l'océan est l'un des éléments d'une interaction, les cycles peuvent s'échelonner sur plusieurs décennies, car l'océan réagit lentement en raison de sa masse immense et de sa capacité thermique. Le phénomène El Niño, qui prend naissance dans la partie tropicale de l'océan Pacifique, est possiblement le plus connu de ces cycles.

Dans l'Arctique, l'oscillation naturelle de l'atmosphère qui a le plus d'influence est le mode annulaire de l'hémisphère nord (Thompson, 2019), communément appelé l'oscillation arctique (OA). Elle a pour effet de déplacer l'air entre les latitudes moyennes (30-40 ° de latitude nord) et la calotte polaire nord, et ce, sur une échelle de plusieurs années. Ce transfert augmente ou diminue la pression d'air dans les différentes régions touchées, modifiant la force des vents et leur configuration, car le vent dépend des différences de pression d'air. L'empreinte géographique de l'oscillation arctique est illustrée à la figure 44. Lorsque l'oscillation déplace l'air vers le sud, passant de la zone bleue aux zones rouges, jaunes et orangées, la pression d'air à latitude moyenne augmente et la pression d'air dans l'Arctique diminue. Cette différence accrue de la pression entre le sud et le nord renforce les vents de l'ouest (affaiblissant les vents de l'est).

Quelques années plus tard, l'oscillation provoquera un déplacement de l'air vers le nord, causant une accumulation d'air dans l'Arctique et un affaiblissement des vents de l'ouest (renforçant les vents de l'est). Dans la région ouest de l'Arctique canadien, où les vents viennent habituellement de l'est ou du nord-est, cette moitié du cycle renforce le tourbillon de Beaufort.

L'oscillation arctique compte pour environ 20 % de la variation de la pression éolienne et de la pression d'air au nord du 20° parallèle nord. Le stade et la force de l'oscillation à tout moment sont représentés par un indice qui, par convention, est positif si la pression d'air à latitude moyenne est supérieure à la normale (la pression d'air dans l'Arctique étant alors inférieure à la normale). Ainsi, un indice positif correspond à un affaiblissement du tourbillon de Beaufort, et vice versa. Les valeurs de l'indice dérivées des observations météorologiques depuis 1950 sont indiquées à la figure 45. Les bandes grises du graphique indiquent les périodes d'intérêt dans la région de Beaufort, lesquelles sont abordées plus en détail à la section 5.2. Il n'existe aucune correspondance évidente entre l'indice et ces intervalles gris. Il est possible que cette faible corrélation soit attribuable au fait que l'indice est calculé sur une région qui, s'étendant bien au nord de 30° de latitude nord, est beaucoup plus grande que la région arctique canadienne. En effet, Proshutinsky et coll. (2015) ont constaté que le centre d'action de l'oscillation arctique dans l'Atlantique Nord se trouve à une distance considérable de l'Arctique nord-américain.

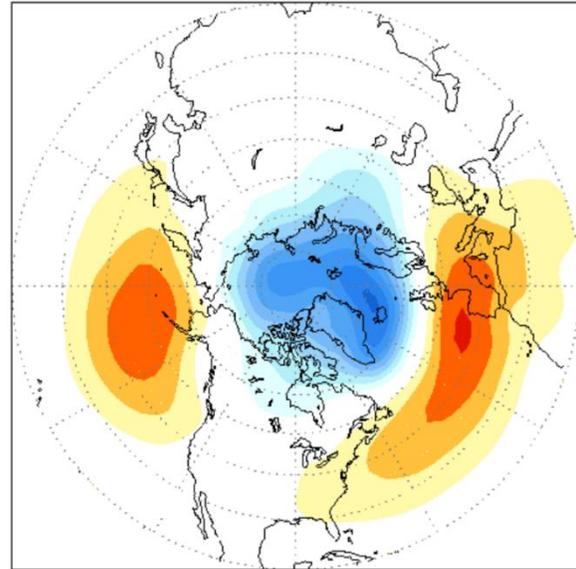


Figure 44. Répartition géographique de l'oscillation arctique. Il est à noter que ce phénomène dit « arctique » occupe en fait la moitié supérieure de l'hémisphère Nord.
http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.loading.shtml

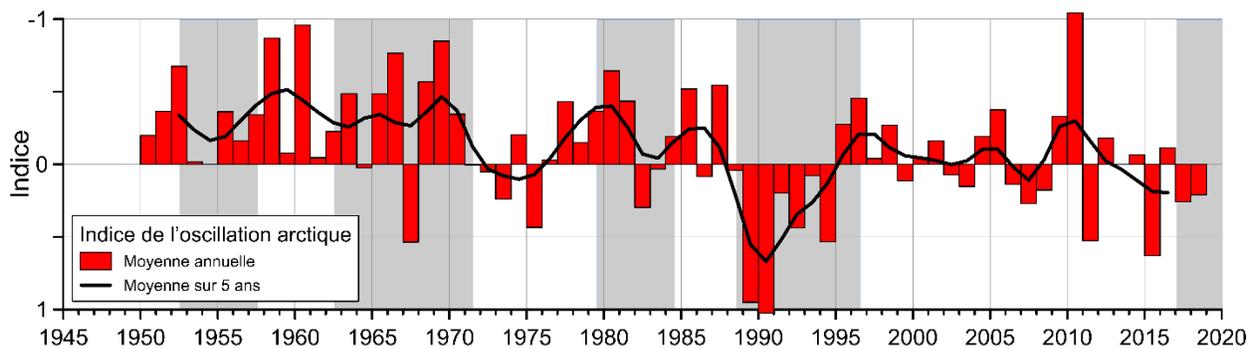


Figure 45. Variation de l'indice de l'oscillation arctique au fil du temps. Pour faciliter l'interprétation (et les comparaisons ultérieures) des données, ce graphique présente les valeurs négatives de l'index dans sa partie supérieure. Les bandes grises indiquent les périodes d'intérêt dans la région de Beaufort.
http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/monthly.ao.index.b50.current.as.cii

Les travaux de Wang et coll. (2009) ont décrit un deuxième schéma de variation de la pression au niveau de la mer dans l'Arctique, un phénomène appelé le dipôle arctique (DA), dont l'influence n'est toutefois pas aussi forte. Ce schéma associe une pression d'air élevée dans l'Arctique canadien à une basse pression d'air en Sibérie orientale, et vice versa. Lorsque la pression est élevée dans la région arctique canadienne, les vents liés au dipôle arctique proviennent du sud. En plus de pousser la glace de mer de l'Arctique vers l'Atlantique par la mer des Tchouktsches, dégageant ainsi la couverture de glace de la région arctique canadienne vers le nord-ouest, ces vents apportent dans l'Arctique un air plus chaud en provenance du Pacifique.

L'indice de variation atmosphérique du Pacifique Nord (Trenberth et Hurrell, 1994) est représentatif d'une région géographique qui se situe plus proche de la région arctique canadienne et dont la taille lui est plus semblable que dans le cas de l'indice de l'oscillation arctique. En effet, cet indice est fondé sur les moyennes mensuelles de la pression au niveau de la mer dans la région entre 30° N.-65° N. et 160° E.-140° O. L'incidence possible de cet indice sur la région arctique canadienne réside dans son rôle à l'extrémité sud d'un « mouvement de bascule » qui perturbe la différence nord-sud de la pression au niveau de la mer dans l'Alaska, ce qui influe à son tour sur la force des vents de l'est dans le sud de la mer de Beaufort.

Les valeurs de l'indice du Pacifique Nord (IPN) sont indiquées à la figure 46. La série chronologique de l'IPN ressemble, à certains égards, à celle de l'indice de l'oscillation arctique (figure 45), notamment pour ce qui est des sommets atteints en 1958, 1969, 1980 et 1987, puis la baisse en 1990. Cette ressemblance semble logique, puisque l'IPN décrit l'un des centres d'action de l'oscillation arctique. Toutefois, ces deux séries chronologiques ne sont manifestement pas identiques. Rappelons qu'il n'y a pas de correspondance évidente entre l'indice du Pacifique Nord et les intervalles gris qui décrivent la variabilité dans le tourbillon de Beaufort.

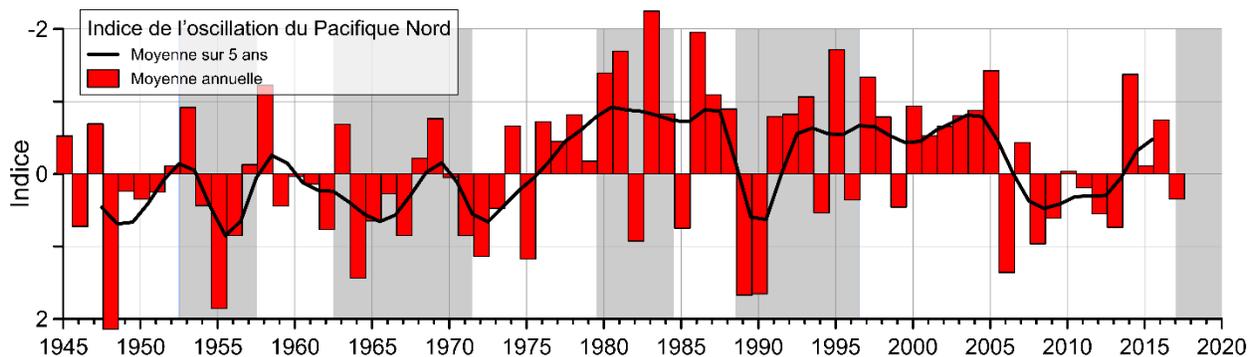


Figure 46. Variation de l'indice du Pacifique Nord au fil du temps. Pour faciliter l'interprétation (et les comparaisons ultérieures) des données, ce graphique présente les valeurs négatives de l'index dans sa partie supérieure. Les bandes grises indiquent les périodes d'intérêt dans la région de Beaufort. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/north-pacific-np-index-trenberth-and-hurrell-monthly-and-winter> (Trenberth et Hurrell 2019).

Un autre indice, l'oscillation du Pacifique Nord (Linkin et Nigam, 2008), a été utilisé pour caractériser les variations atmosphériques à l'échelle d'une région beaucoup plus vaste du Pacifique Nord, soit entre 15°N.-80° N. et 130° E.-120° O. Cet indice présente un point de vue légèrement différent sur la variabilité dans le Pacifique Nord. Il couvre une zone qui comprend

les latitudes arctiques, mais aussi une partie des tropiques. Zhang et coll. (2019) ont établi un lien entre l'indice de l'oscillation du Pacifique Nord au printemps et l'étendue de la glace de mer en septembre dans la mer de Beaufort. Ce lien semble découler de l'influence de l'oscillation du Pacifique Nord sur les vents de l'est au-dessus de la mer de Beaufort qui entraînent la glace au large et exposent ainsi l'océan à la chaleur du soleil qui, à son tour, favorise la fonte de la glace de mer.

En somme, l'indice de l'oscillation arctique et l'indice de l'oscillation du Pacifique Nord sont utiles à deux égards. En premier lieu, ils révèlent la variabilité pluriannuelle considérable de la pression du vent et de la pression d'air qui sont caractéristiques des régions tempérées du Nord et des régions polaires de la Terre. En second lieu, ils révèlent que cette variabilité est cyclique, en ce sens qu'elle oscille entre les extrêmes, mais que sa période est irrégulière, comme l'indiquent ces courts intervalles qui varient entre 2 et 20 ans.

5.2 Variations dans l'environnement océanique

La variation des conditions environnementales au fil du temps remet en question notre capacité à décrire de manière fiable l'état actuel de l'Arctique (voir la section 1.1). Ici, nous nous efforçons de décrire un « état de l'Arctique » qui correspond à une moyenne des conditions sur 5 ans (de l'automne 2012 à l'automne 2017), soit un laps de temps suffisant pour prendre en compte des variations interdécennales et ne pas perdre la valeur d'actualité.

À l'exception de l'étendue de la glace de mer, qui est surveillée étroitement depuis un demi-siècle, peu de données océanographiques ayant une couverture spatio-temporelle adéquate ont été récoltées dans la région arctique canadienne. Encore une fois, à l'exception de l'étendue de la glace de mer, les zones sur lesquelles nous disposons de suffisamment de données pour documenter l'état actuel de l'océan sont peu nombreuses (figure 47) :

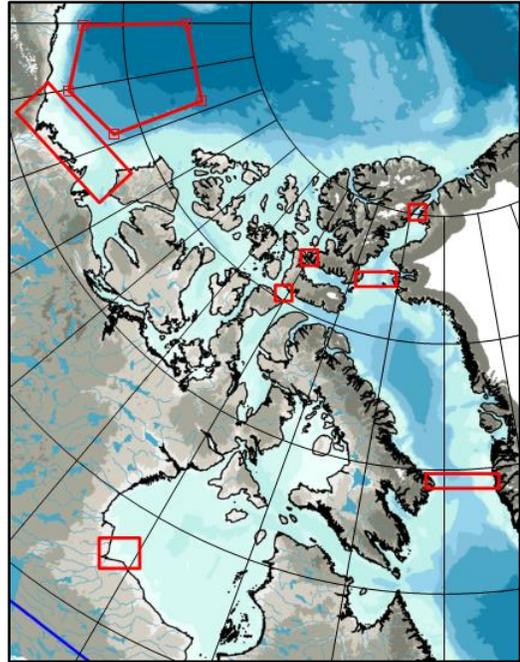


Figure 47. Polygones (rouges) délimitant certaines parties de la région arctique canadienne où les observations permettent de décrire certains aspects de l'état de l'environnement océanique.

- Bassin Canada, observation systématique de 2003 à aujourd'hui : cartographie géochimique annuelle en août, en septembre ou en octobre; observations à longueur d'année à partir de 3 systèmes d'amarrage océanographiques.
- Plateau de la mer de Beaufort/Golfe d'Amundsen, observation systématique de 1990 à aujourd'hui : observations à longueur d'année à partir de 2 à 10 systèmes d'amarrage océanographique; stations géochimiques occupées annuellement.
- Plateau polaire canadien, où un programme complet d'observation mis en place à la fin des années 1990 est devenu financièrement insoutenable en 2012 : systèmes d'amarrage océanographiques à longueur d'année et relevés géochimiques répétés.
- Baie de Baffin (Nord), observée systématiquement depuis 1998 : données principalement biogéochimiques.
- Détroit de Davis, observé systématiquement à longueur d'année depuis 2004.
- Baie d'Hudson : relevés en cours essentiellement biologiques.

Aucune des initiatives énumérées ci-dessus ne comprend la zone côtière, c'est-à-dire la région côtière de 10 km, bien que des connaissances inuites puissent être disponibles à proximité de certaines collectivités. La grande région à l'extérieur des polygones indiqués sur la carte montre clairement que la portée de la surveillance maritime dans les eaux canadiennes est inadéquate.

5.2.1 Bassin Canada

La zone du bassin Canada qui fait l'objet d'une surveillance annuelle depuis 2003 est délimitée par la région en forme de clé de voûte ombrée à la figure 48. Environ le tiers de cette région se trouve dans la ZÉE canadienne. Les lignes marquent la lisière de glaces à la fin de l'été pour la période de 1980 à 2000 (bleu) et les reculs records des glaces en 2007 (magenta) et en 2012 (vert).

Depuis 15 ans, le tirant d'eau de la glace (partie immergée de son épaisseur) est surveillé à longueur d'année dans 3 ou 4 sites dans la région en forme de clé de voûte. Krishfield et coll. (2014) discutent des observations recueillies jusqu'à l'automne 2013, et des données plus récentes sont disponibles (<http://www.whoi.edu/page.do?pid=66559>). La série chronologique mise à jour aux fins d'observations sur le site BGOS-D (site D, figure 48) est présentée à la figure 49. Contrairement aux conditions des décennies précédentes, la fraction de l'eau libre (figure 49a) à cet endroit à la fin de l'été a dépassé 50 % au cours de 8 des 12 étés d'observation; il y a eu plus de 75 % d'eau libre pendant un intervalle de temps prolongé au cours de 4 de ces étés. Au cours d'au



Figure 48. Emplacement du Beaufort Gyre Exploration Project (BGEPE) dans le bassin Canada (région en forme de clé de voûte ombrée). Les flèches sont les voies présumées de la circulation des eaux du Pacifique. Les lignes colorées marquent la lisière de glaces à la fin de l'été (2012 en vert, 2007 en rose magenta, moyenne sur 20 ans en bleu). Les points marquent les emplacements de surveillance de la glace (sites D et 1).

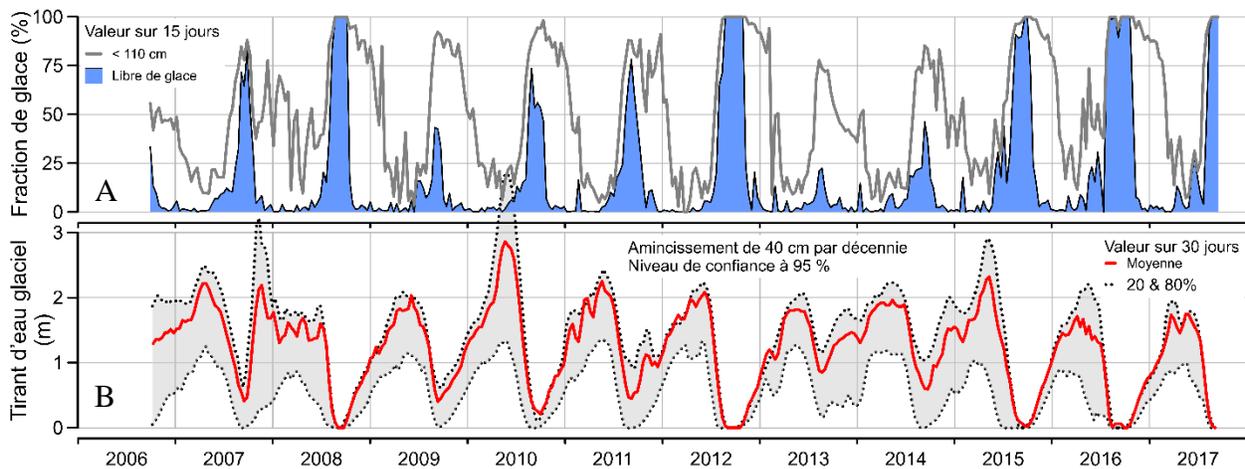


Figure 49. Variation de la banquise mesurée par un sonar de profilage de la glace sur le site D (figure 48) de l'Observatoire du tourbillon de Beaufort. a) montre l'étendue de l'eau libre et des glaces de moins de 1,1 m de tirant d'eau; b) montre le tirant d'eau moyen des glaces et ses centiles.

moins la moitié de la période de 11 ans, la superficie de couverture par une épaisseur de glace de plus de 1,2 m (tirant d'eau de 1,1 m) était inférieure à la moitié. Figure 49 b montre un cycle saisonnier dans le tirant d'eau moyen des glaces, qui passe d'environ 0,3 m en septembre à 2 m à la fin de mai (les régions d'eau libre sont incluses dans la moyenne à titre de glace au tirant d'eau nul); une telle variation saisonnière est caractéristique d'une zone de glace de mer saisonnière et atypique à cet emplacement qui se trouvait auparavant sous une banquise pluriannuelle. La courbe du 80^e centile montre que les glaces avec un tirant d'eau de plus de 2,5 m — généralement des crêtes de pression et de la vieille glace — sont devenues rares à cet

emplacement récemment. Le tirant d'eau moyen des glaces a diminué de 40 ± 20 cm par décennie depuis 2003, avec un niveau de confiance de 95 %.

Au cours de cette même période de modération des conditions des glaces, le volume d'eau douce diluant l'eau de mer de salinité nominale de 34,8 a augmenté dans la région du « tourbillon » de Beaufort – rotation de l'eau dans le sens horaire dans le bassin Canada. On trouve aujourd'hui un tiers d'eau douce de plus qu'en 2003 dans le tourbillon de Beaufort. De plus, l'augmentation de l'eau douce ayant été plus importante à faible profondeur qu'à grande profondeur, la stratification verticale (stabilité) de l'océan – ou sa résistance au mélange (Davis et coll., 2016) – a également augmenté. Une grande partie de l'eau douce supplémentaire dans la couche supérieure de l'océan (partie verte à la figure 50) provient des rivières arctiques. L'eau douce dans les parties plus profondes de l'océan (partie bleue à la figure 50) arrive par le détroit de Béring.

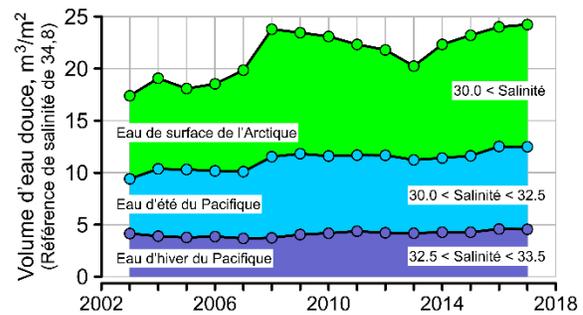


Figure 50. Volume d'eau douce diluée dans diverses masses d'eau de mer présentes dans le tourbillon de Beaufort. Données extraites de Proshutinsky et coll. (2019).

L'accumulation accrue d'eau douce dans le tourbillon de Beaufort reflète en partie la configuration récente des vents dominants dans l'Arctique. L'alternance à intervalles de 5 à 10 ans dans le bassin Canada entre les configurations de circulation des vents dans le sens horaire et dans le sens antihoraire (Thompson, 2019) est décrite à la section 5.1. Proshutinsky et Johnson (1997) ont montré que cette variation au-dessus de l'Arctique génère des phases alternées de circulation de l'eau dans le sens horaire et dans le sens antihoraire dans le bassin Canada, que les deux auteurs ont nommé l'oscillation de l'océan Arctique. La cartographie hydrographique annuelle du tourbillon a révélé qu'une phase positive du cycle en question (circulation dans le sens horaire) qui a débuté à la fin des années 1990 a persisté beaucoup plus longtemps qu'auparavant. En effet, l'oscillation de l'océan Arctique s'est avérée positive pour une 19^e année en 2017 (figure 51).

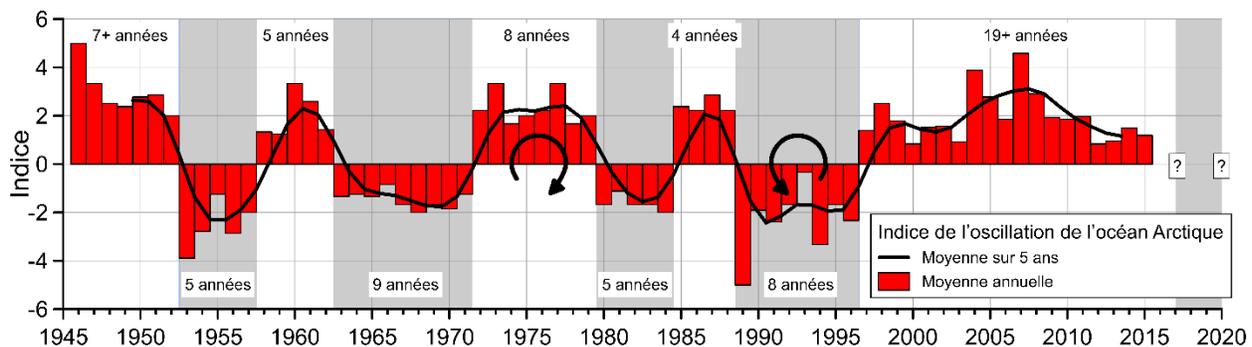


Figure 51. Variation de l'indice d'oscillation de l'océan Arctique indiquant les intervalles de l'alternance du sens de la rotation depuis 1945. La bande grise à droite est conjecturale. Données extraites de Proshutinsky et coll. (2015).

Les observations effectuées depuis 2003 révèlent que la productivité marine dans le bassin du Canada est passée à un état qui correspond à un accès réduit aux nutriments (Stanley et coll.,

2015). L'accès réduit découle en partie d'une augmentation de la consommation de nutriments en raison d'une augmentation de la production primaire. Celle-ci reflète à son tour l'augmentation de la lumière disponible à la surface de la mer dans la mesure où y a moins de zones d'ombre créées par la glace de mer en été aujourd'hui. Les nutriments dissous nécessaires à la croissance du plancton marin dans l'Arctique doivent être réapprovisionnés à partir de la couche d'eau du Pacifique immergée, car la lumière solaire nécessaire se trouve à la surface; c'est le mélange de la couche supérieure de l'océan qui rassemble ces éléments. Mais comme nous l'avons expliqué précédemment, le mélange de la couche supérieure de l'océan s'est appauvri dans le bassin Canada, en raison de l'accumulation d'eau douce près de la surface.

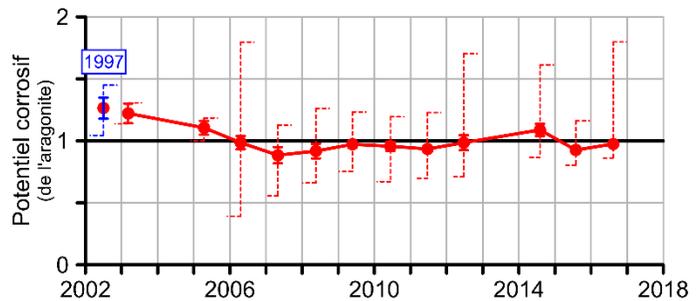


Figure 52. Valeurs d'un indice Ω dans les eaux de surface du bassin Canada. Ω représente l'effet corrosif de l'eau de mer sur les organismes à coquille dure, ici sur une pierre calcaire appelée aragonite. Le seuil de dommage est 1. Les lignes pointillées couvrent l'étendue des variations par année dans le bassin. Données non publiées, gracieuseté de Y. Zhang.

Une augmentation de l'acidité des eaux marines de surface est une nouvelle source de stress sur l'écosystème, qui a été découverte grâce à des observations soutenues dans le bassin Canada. L'augmentation de l'acidité résulte en partie de l'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, qui se dissout progressivement dans les océans du monde pour former de l'acide carbonique. Dans le bassin Canada en particulier, la fonte de la glace de mer et de l'eau des rivières, qui sont naturellement plus acides que l'eau de mer et qui, comme nous l'avons mentionné précédemment, se sont accumulées dans les eaux de surface du bassin Canada au cours des deux dernières décennies, a eu un effet cummulatif. Près de la surface et dans la couche froide au centre, à une profondeur d'environ 120 m, l'acidité de l'eau a suffisamment augmenté pour dissoudre les coquilles dures de certains organismes marins. La corrosivité de l'eau marine de surface dans le bassin Canada, représentée par la valeur Ω , propre à chaque type d'ion carbonate dans les coquilles, est indiquée à la figure 52 pour l'aragonite. Les valeurs de Ω de moins de 1e menacent les organismes marins.

5.2.2. Plateau du Mackenzie, golfe d'Amundsen

La zone marine du plateau du Mackenzie et du golfe d'Amundsen est la zone de l'Arctique canadien sur laquelle on dispose du plus de connaissances. Depuis 1990, plusieurs sites dans cette zone font l'objet d'observations soutenues tout au long de l'année à l'aide d'instruments autonomes sur des systèmes d'amarrage immergés et d'études annuelles à bord de navires. Les enregistrements continus que nous possédons sont ceux des variables océaniques dont l'observation par des instruments autonomes est la plus facile et la plus fiable. Ces enregistrements offrent des indications sur la variabilité et les changements dans l'océan, mais sont loin d'être exhaustifs dans un contexte écologique.

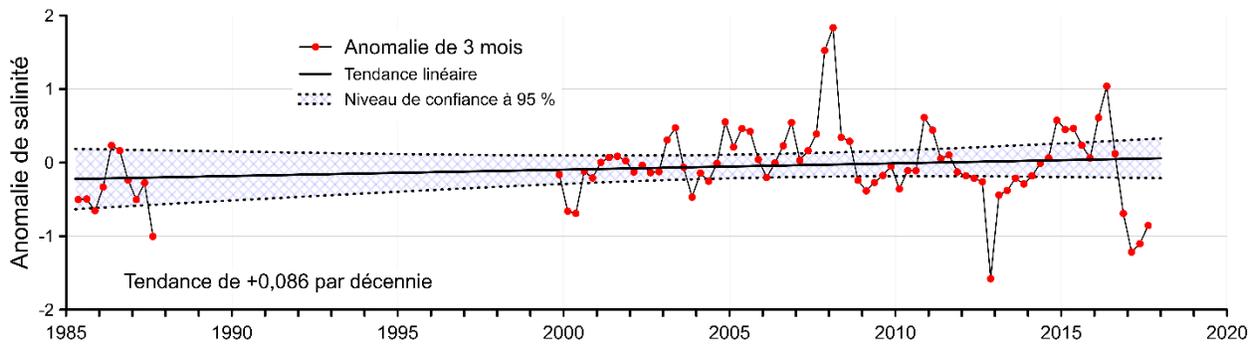


Figure 53. Anomalie sur 3 mois de la salinité de l'eau de mer près du plancher océanique du plateau du Mackenzie dans le sud de la mer de Beaufort (source : MPO, données non publiées).

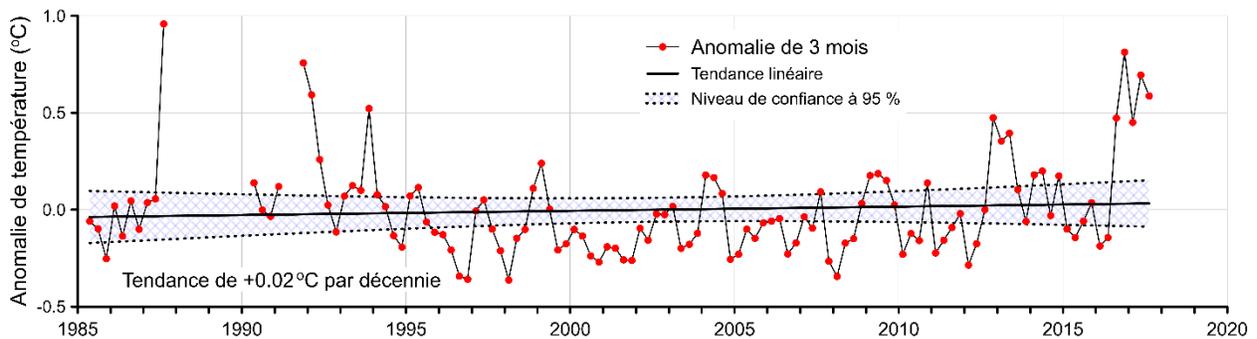


Figure 54. Anomalie sur 3 mois de la température de l'eau de mer près du plancher océanique du plateau du Mackenzie. (source: MPO, données non publiées).

Les enregistrements les plus longs documentent la salinité et la température à 3 m au-dessus du plancher océanique (profondeur de 53 m) au milieu du plateau du Mackenzie. La salinité moyenne à cet endroit est d'environ 32,5, la valeur la plus faible étant en été et la valeur la plus élevée en hiver; depuis 1985, les valeurs ont varié de 27 à 36,5. Dans la mesure où une telle variabilité masque les changements progressifs, nous examinons les anomalies saisonnières – soit les différences entre les valeurs saisonnières moyennes pour une année particulière et la moyenne de la saison sur toutes les années. figure 53 indique la série chronologique et sa tendance, soit une augmentation de 0,26 en 30 ans. Une augmentation, qui équivaut à une diminution de la quantité d'eau douce sur le plateau par rapport aux premières années, correspond à un transfert de l'eau douce du plateau vers le tourbillon de Beaufort, où l'eau douce s'est accumulée au cours des 15 dernières années. La tendance est trop faible par rapport à la variation naturelle (c'est-à-dire qu'elle ne diffère pas de zéro avec un niveau de confiance de 95 %) pour être considérée comme un changement important du régime de l'océan à cet endroit.

La température près du plancher océanique au milieu du plateau du Mackenzie se situe habituellement près de -1,5 °C, soit quelques dixièmes au-dessus du point de congélation. Depuis 1985, cette température a varié entre -2 °C et -1,5 °C. La série chronologique des anomalies saisonnières de température (figure 54) indique une tendance faible, un 50^e de degré par décennie, valeur également trop faible par rapport à la variation pour être considérée comme un changement important du régime de l'océan à cet endroit. À cet endroit et à cette profondeur, l'océan Arctique ne se réchauffe manifestement pas.

À cet endroit, nous avons également mesuré le courant océanique juste au-dessus du plancher océanique toutes les heures chaque jour depuis 1990. En additionnant chaque petit déplacement horaire sur une période d'un an, il est possible de calculer la distance et la direction annuelles du flux des eaux près du plancher océanique. La composante de ce flux qui est dirigé vers la côte représente le déplacement de l'eau des zones profondes vers les zones moins profondes. S'il est suffisamment intense et prolongé, un tel mouvement ascendant (« remontée d'eau ») peut soulever les eaux riches en nutriments du Pacifique des couches situées à plus de 100 m de profondeur du talus continental jusqu'à la zone ensoleillée du plateau interne. Figure 55 montre que cette composante de la remontée d'eau a doublé au cours du dernier quart de siècle; ce changement est suffisamment important par rapport à la variation pour être considéré, avec un niveau de confiance de 95 %, comme un changement important dans le régime de l'océan à cet endroit. L'augmentation mesurée de la remontée d'eau plus salée provenant de couches plus profondes correspond à l'augmentation de la salinité de l'eau du plateau déjà documentée. De plus, comme les vents favorables à la remontée d'eau dans le sud de la mer de Beaufort viennent de l'est et que les vents de l'est sont associés à une pression de l'air élevée au-dessus du bassin Canada, la remontée d'eau sur le plateau correspond à la phase anticyclonique prolongée de la circulation dans l'Arctique mentionnée précédemment. De plus, comme les concentrations de nutriments dissous augmentent avec la profondeur dans la couche supérieure de 150 m, une remontée d'eau plus forte pourrait être bénéfique pour le réseau trophique marin sur les plateaux du sud de la mer de Beaufort.

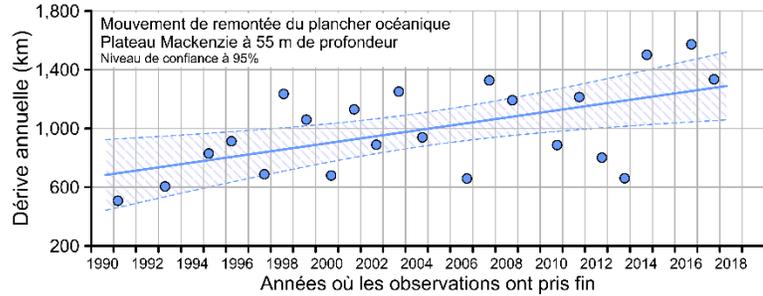


Figure 55. Distance parcourue annuellement dans le sens ascendant par les eaux près du plancher océanique au milieu du plateau du Mackenzie. Le doublement de ce mouvement au cours du dernier quart de siècle est statistiquement significatif avec un niveau de confiance de 95 % (source : MPO, données non publiées).

La glace de mer sur le plateau du Mackenzie est surveillée en détail depuis 1991. Cette région diffère du centre de l'océan Arctique dans la mesure où ses étés ont toujours été sans glace – elle fait partie du domaine de la glace saisonnière de l'Arctique. Comme dans le cas de la salinité et de la température de l'eau marine, la variation et les changements dans la glace sont plus facilement illustrés comme des anomalies par rapport à une moyenne à long terme. Nous utilisons les anomalies mensuelles de la glace de mer, car les propriétés de la glace varient considérablement au cours de l'année.

Figure 56 montre les anomalies de la concentration de glace mesurée par un sonar immergé au milieu du plateau. Les données des mois froids sont représentées par les points noirs; les anomalies de l'hiver sont très proches de zéro tout au long de l'enregistrement – aucun changement dans la concentration de la glace à cette période de l'année. Les données de la moitié la plus chaude de l'année sont représentées par les points rouges; les anomalies de l'été sont également généralement proches de zéro, ce qui indique que la mer demeure libre de glace à cet endroit en été comme par le passé. Il reste comme caractéristique une anomalie des doubles

pics pour la plupart des années, qui indique des conditions anormales en juin et en octobre entre l'hiver et l'été; les pics sont positifs (plus de glace que la moyenne à long terme) dans les premières années et deviennent négatifs dans les années plus récentes. Ceci montre qu'une réduction de la glace dans la zone de glace de mer saisonnière s'est produite via la prolongation de la période estivale sans glace aux deux extrémités. La tendance générale de 4,6 % par décennie n'est pas assez importante par rapport à la variation naturelle pour qu'elle soit considérée comme un changement de régime de l'océan et est sensiblement inférieure à la perte de (vieille) glace dans le centre de l'océan Arctique.

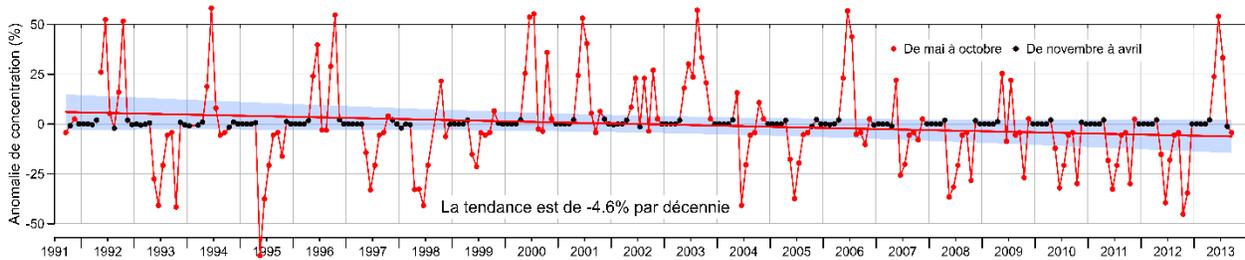


Figure 56. Anomalie mensuelle de la couverture fractionnelle de la glace de mer ou de la concentration de la glace, au milieu du plateau continental du Mackenzie. La concentration de la glace a diminué de 4,5 % par décennie en moyenne au cours du dernier quart de siècle. Niveau de confiance de 95 % en vert (source : MPO, données non publiées).

Ce changement s'inscrit également dans la phase prolongée de circulation de l'Arctique dans le sens horaire et le vent de l'est persistant dans le sud de la mer de Beaufort que cette circulation a généré au printemps et à l'automne (Proshutinsky et Johnson 1997). Un tel vent pousse aujourd'hui la glace plus rapidement vers l'ouest, établissant ainsi une surface de mer libre de glace plus tôt au printemps et plus tard à l'automne (figure 57). Les données de surveillance du MPO sur la glace du milieu du plateau du Mackenzie montrent une augmentation de cette poussée annuelle vers l'ouest de 150 km au cours des 25 dernières années.

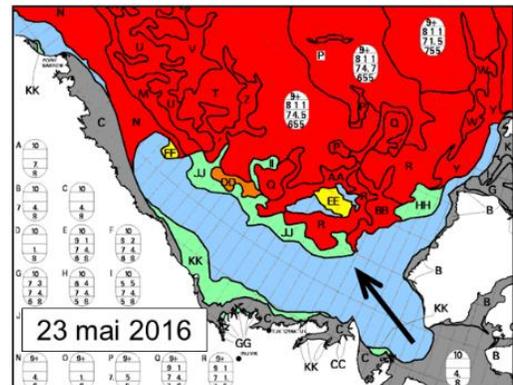


Figure 57. Carte des glaces de la mi-mai 2016 montrant une vaste étendue d'eau libre dans le sud-est de la mer de Beaufort. Les vents de l'est (flèche) libèrent généralement cette zone des glaces à la fin de l'hiver, bien avant le début de la fonte de la neige et de la glace.

La partie immergée (tirant d'eau) de la banquise fait également l'objet d'une surveillance sur le site 1 (figure 48) au milieu du plateau du Mackenzie depuis 1992 (Melling et Riedel, 1995, 1996; Melling et coll., 2005).

La figure 58 montre la fraction de superficie de l'eau libre et celle de l'eau libre plus la nouvelle glace, la glace mince et la glace moyenne (A) et les valeurs moyennes mensuelles du tirant d'eau moyen des glaces (B), y compris l'eau libre au titre de « glace » au tirant d'eau nul. Il est intéressant de comparer les observations du milieu du plateau du Mackenzie (site 1, figure 58) avec celles du site D (figure 49) dans la zone (ancienne) de vieille glace, à 460 km au nord-nord-ouest. La figure 49a (site D) et figure 58a (site 1) semblent très similaires, sauf pour la période annuelle d'eau libre qui est plus fiable et persiste plus longtemps sur le plateau. Un tirant d'eau maximum typique sur le plateau (site 1) à la fin de l'hiver est de 3 m, soit 50 % de plus que la valeur observée plus au large (site D). La valeur supérieure du tirant d'eau sur le plateau

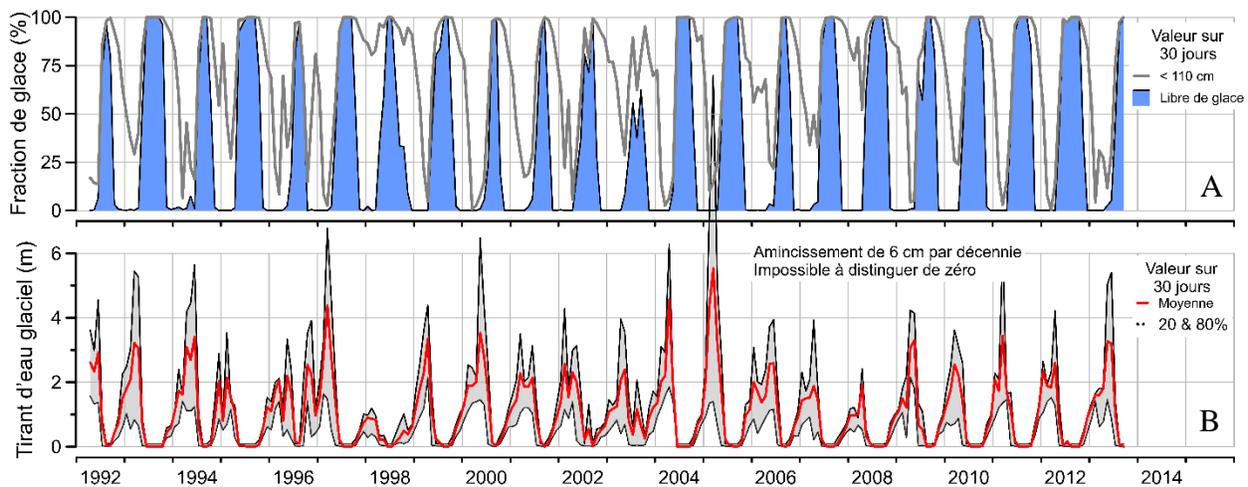


Figure 58. La variation de la banquise mesurée par un sonar de profilage de la glace sur le site 1 de l'Observatoire de Beaufort du MPO (milieu du plateau du Mackenzie) a) montre l'étendue de l'eau libre et des glaces de moins de 1,1 m de tirant d'eau; b) montre le tirant d'eau moyen des glaces et ses percentiles (source : MPO, données non publiées).

s'explique par un plus grand volume de glace dans les crêtes de pression à cet endroit. Le 80^e centile, une mesure de la formation des crêtes de glace, se situe entre 4 et 7 m sur le plateau, contre pas plus de 2 m plus au nord. Le site 1 a connu des hivers de glace très légère, en particulier les hivers 1997-1998 et 2007-2008; ces deux hivers correspondent à des conditions de vents de l'est forts et persistants qui ont poussé de manière continue la glace la plus récente en dehors de la région sud-est de la mer de Beaufort. La tendance du tirant d'eau moyen des glaces, calculé à partir des anomalies mensuelles du tirant d'eau (non représentées), consiste en un lent amincissement d'environ 6 cm par décennie, beaucoup moins que les 40 cm par décennie observés dans le bassin Canada. La faible tendance sur le plateau du Mackenzie ne diffère pas de zéro avec un niveau de confiance élevé. L'information fournie par cet enregistrement de données unique porte à croire que la glace saisonnière sur les plateaux continentaux réagit différemment aux changements climatiques que la vieille glace dans les bassins centraux profonds.

Les changements de la glace de mer entraînent une variété de répercussions écologiques. La diminution de la glace (étendue, épaisseur, mobilité) est bénéfique pour certaines formes de vie, en améliorant la facilité d'accès, la disponibilité de la lumière et la sécurité par rapport aux prédateurs, par exemple. La diminution de la glace nuit à d'autres formes de vie, en réduisant la facilité d'accès, la sécurité par rapport aux prédateurs et l'habitat. L'utilisation de la glace de mer par les mammifères marins est résumée à l'annexe A.

5.2.3. Plateau polaire canadien

Compte tenu du peu d'effort apporté aux activités d'observation soutenue du plateau polaire canadien, nous ne connaissons pas l'état de la majeure partie de cette vaste zone. Les connaissances sur les variations et les changements de la glace sont rares par rapport à celles sur la mer de Beaufort. Toutefois, nous disposons de longs relevés systématiques de l'état de la glace grâce aux satellites d'observation de la Terre et au Service canadien des glaces. La glace pluriannuelle sur le plateau polaire canadien présente un intérêt particulier, car, combinée à une partie adjacente de la zone économique exclusive canadienne, elle constituera probablement dans le futur, la majeure partie d'un « dernier refuge de glace » (<http://www.dfo-mpo.gc.ca/oceans/conservation/higharctic-hautarctique/index-fra.html>), vestige présumé de la banquise polaire actuelle après plusieurs dizaines d'années de réchauffement climatique. Melling (2002), Howell et coll. (2008) et Howell et coll. (2015) offrent de l'information sur la dynamique de la glace pluriannuelle dans cette zone.

Un demi-siècle d'observation de la couverture de glace par le Service canadien des glaces offre une vision à long terme des variations et des changements de la glace sur le plateau polaire canadien.

Figure 59 présente les fractions des types de glace calculées dans des sous-zones présentant au moins 20 % de glace pluriannuelle (Extrême-Arctique, détroit de Nares, chenal Parry [Ouest], détroit de M'Clintock, détroit de Larsen, détroit de Victoria). La date choisie montre la glace qui a survécu au dégel de l'été. La vieille glace couvre environ la moitié de la surface de la mer à cet endroit et le signal dominant est une variation décennale. La quantité de glace pluriannuelle a légèrement diminué (moins de 10 % sur 50 ans), ce qui, selon les statistiques, est probablement fortuit; la diminution est en grande partie attribuable aux périodes de diminutions importantes pendant la deuxième moitié de l'enregistrement (1998 à 2000 et 2008 à 2013).

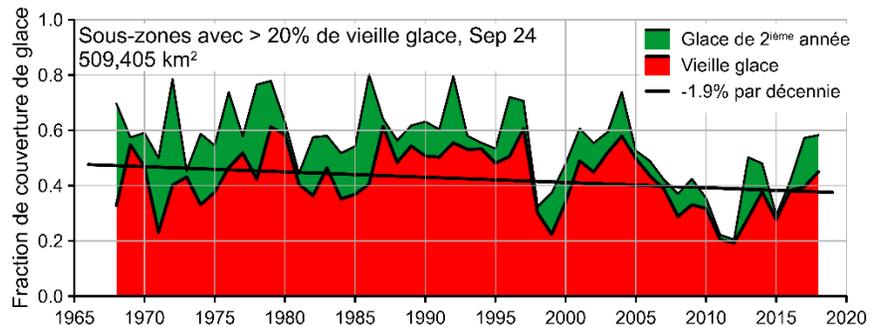


Figure 59. Fraction de glace pluriannuelle (rouge) dans des sous-zones du plateau polaire canadien où la fraction de la glace pluriannuelle moyenne est de 20 % ou plus. La zone verte représente la glace de première année le 24 septembre qui deviendra la glace de deuxième année le 1^{er} octobre (source : IceMap, Service canadien des glaces, 2019).

Les données des deux sources illustrent les variations et les changements de l'épaisseur de la glace sur le plateau polaire canadien. Les organismes météorologiques canadiens mesurent l'épaisseur de la glace fixée au littoral à divers endroits au Canada depuis la fin des années 1940 (Brown et Cote, 1992; Flato, 1996; Dumas et coll., 2005; Howell et coll., 2016). Trois stations, Eureka, Resolute Bay et Cambridge Bay, situées près des 80°, 75° et 69°N respectivement, offrent une vue le long d'un transect arctique nord-sud (figure 60). Les longs graphiques à la gauche montrent les valeurs annuelles (points rouges), une moyenne sur 5 ans et une ligne de tendance. Les tendances à la fois positives et négatives sont faibles (entre -3,8 cm et +1,7 cm par décennie) et ne se distinguent pas de zéro statistiquement. Les tendances de l'épaisseur de la

banquise sur le plateau de la mer de Beaufort et dans le bassin Canada sont de 1,5 à 3 fois plus importantes et plus de 10 fois plus importantes, respectivement, que sur le plateau polaire canadien. Les diagrammes de dispersion de l'épaisseur de la glace contre la hauteur de la neige (figure 60) montrent une forte corrélation négative entre les deux variables (graphiques à la droite), ce qui donne à croire que les variations de la température de l'air ont une importance secondaire sur la croissance de la glace d'hiver dans cette zone (Dumas et coll., 2005).

L'épaisseur de la glace fixée pluriannuelle dans l'ouest de l'Extrême-Arctique canadien a été systématiquement cartographiée pendant les hivers des années 1970 dans le cadre de forages lors de relevés sismiques (Melling, 2002). Cependant, ce n'est qu'en 2003 que le MPO a commencé à examiner la glace de plus près, en plaçant un sonar de profilage de la glace dans les détroits (détroit de Nares, détroit de Penny, détroit de Byam Martin) par lesquels la glace quitte le « dernier refuge de glace ». Les instruments utilisés dans le détroit de Nares de 2003 à 2012 ont permis d'obtenir la plus longue série chronologique récente; les valeurs moyennes d'épaisseur de la glace sur 25 km s'étendent de 3 à 6 m, avec une moyenne globale de 4,5 m (MPO, données non publiées). Bien que nous ne disposions pas de données sur les décennies précédentes à des fins de comparaison, les valeurs récentes correspondent à la configuration spatiale de l'épaisseur de la glace dans l'océan Arctique des années 1960 aux années 1980 (Bourke et Garrett, 1987), ce qui porte à croire que les changements sont limités.

Les observations effectuées dans le détroit de Byam Martin en 2011 sont comparées à celles des années 1970 (Melling, 2002) à la figure 61. Les données récentes (zone ombragée) montrent une distribution du volume de glace par rapport à l'épaisseur qui est égale ou supérieure à celle des années 1970 (lignes de couleur). Il apparaît clairement qu'en 2011 au moins, la glace pluriannuelle ressemblait beaucoup à celle des décennies précédentes. Les données de 2011 font partie de la série de quatre étés récents représentés à la figure 62. Les moyennes globales pour chaque été (environ 3 m) ont des valeurs proches et sont comparables aux mesures de la glace des années 1970. Dans le détroit de Byam Martin, nous n'avons aucune

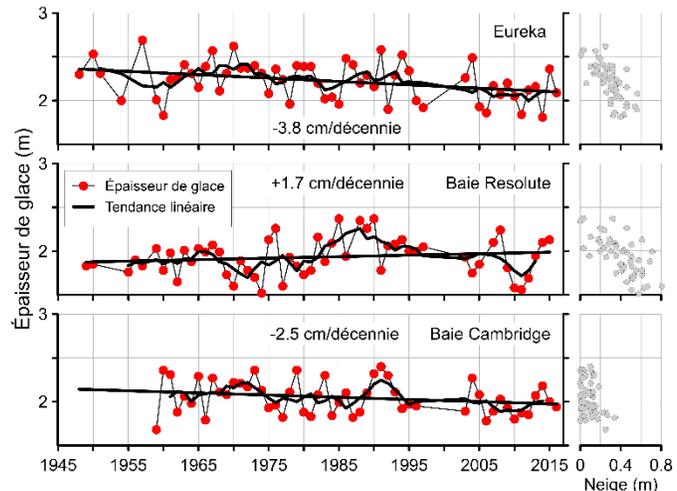


Figure 60. Épaisseur de glace fixée en fin d'hiver dans trois stations sur le plateau polaire canadien depuis la fin des années 1940. Les diagrammes de dispersion à droite montrent que les années où la glace est plus mince ont tendance à être celles où la neige est plus haute (source : Service canadien des glaces, données non publiées).

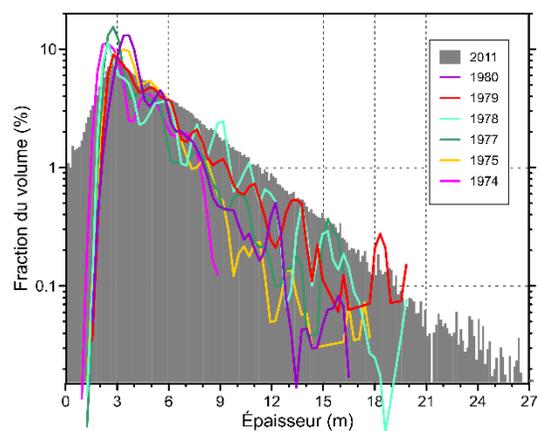


Figure 61. Fractions de volume de la banquise à chaque épaisseur de glace dans le détroit de Byam Martin. Les courbes colorées correspondent aux années 1970; la zone ombrée correspond à 2011 (source : MPO, données non publiées).

preuve d'un amincissement spectaculaire de la glace pluriannuelle au cours des 20 à 30 dernières années.

La surveillance de la circulation de l'eau de mer sur le plateau entre l'Arctique et l'Atlantique est la question océanographique sur le plateau polaire canadien qui a reçu le plus d'attention. La circulation des eaux de l'Arctique vers l'Atlantique apporte des nutriments dissous dans les océans productifs de l'est de l'Arctique et tempère les régions marines du Canada; les flux transportent de l'eau douce qui peut réduire le mélange des eaux de surface et des eaux intermédiaires, de sorte que l'apport de nutriments dans la zone photique peut être restreint; l'eau douce de l'Arctique en grande quantité peut réduire la convection profonde dans la mer du Labrador. Le déplacement de l'eau de mer de l'Atlantique vers le plateau polaire canadien via le courant de l'ouest du Groenland apporte de la chaleur qui réduit la formation de glace de mer, favorise le dégagement précoce de la glace dans l'est de la baie de Baffin et contribue à la fonte des glaciers d'eau de marée dans l'Extrême-Arctique canadien.

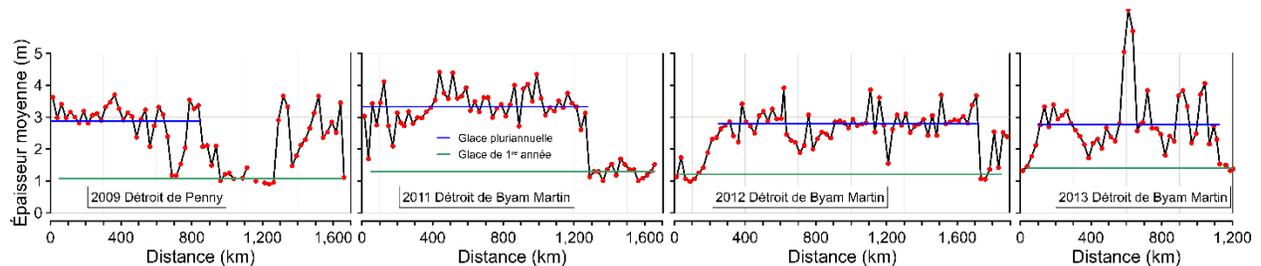


Figure 62. Valeurs moyennes d'épaisseur de la glace sur 25 km à la lisière sud du « dernier refuge de glace » pendant 4 étés récents. Des zones de glace de première année et de glace pluriannuelle ont été observées. L'épaisseur moyenne globale de la glace pluriannuelle était d'environ 3 m (source : MPO, données non publiées).

Les premières tentatives pour mesurer l'écoulement de l'eau dans l'Arctique canadien ont été faites dans le détroit de Barrow près de Resolute Bay au début des années 1980. Les efforts ont repris dans l'ouest du détroit de Lancaster à la fin des années 1990 avec une nouvelle technologie de sonar et de compas qui a permis de réduire les difficultés. Malgré ces tentatives, seules les observations des courants, de la température et de la salinité de l'océan ont été maintenues.

Le mouvement net vers l'est de l'eau de mer dans le détroit de Lancaster (Peterson et coll., 2012) est représenté dans le cadre en haut de figure 63; l'unité (milli-Sverdrup ou mSv correspond à $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ qui équivaut à $31\ \text{km}^3/\text{année}$). Un cycle annuel apparaît clairement avec un débit plus fort en été et une faible tendance à la baisse (ligne rouge) qui n'est pas statistiquement significative. La ligne pointillée noire correspond à la tendance de 2003 à 2009 dont il sera question ci-dessous. La valeur moyenne annuelle la plus faible est observée en 2007-2008, qui coïncide avec la valeur la plus élevée de l'indice d'oscillation arctique. Le débit moyen global était de 460 mSv. Cet observatoire a été fermé en 2011, mais des efforts sont actuellement déployés pour le remettre en fonction.

Un observatoire a été établi au milieu de l'année 2003 pour mesurer le débit de l'eau vers le sud de l'Arctique à l'Atlantique dans le détroit de Nares. L'observatoire a fonctionné dans sa configuration complète pendant 6 ans et dans une configuration réduite jusqu'en 2012, année où il a fermé. Le cadre au centre de la figure 63 montre les moyennes saisonnières et annuelles du mouvement net de l'eau vers le sud pendant les 6 premières années de fonctionnement de

l'observatoire (Münchow, 2016). La variation saisonnière n'est pas aussi prononcée dans ce détroit, mais une tendance à un débit plus fort est statistiquement significative. Il convient de noter que l'augmentation du débit de l'eau de l'Arctique dans le détroit de Nares de 2006 à 2009 a correspondu dans le temps et en ampleur avec la diminution du débit sortant dans le détroit de Lancaster (voir la ligne pointillée noire de la tendance dans le cadre en haut). Le débit moyen global était de 815 mSv.

Un observatoire couvrant le détroit de Davis a été mis en fonction en 2004, un an plus tard que dans le détroit de Nares. Cet observatoire est demeuré fonctionnel jusqu'en 2017, mais l'enregistrement actuellement disponible se termine au milieu de l'année 2010 (Curry et coll., 2014). L'installation visait à capter la majeure partie du débit de l'Arctique canadien sur une section transversale. Les observations sont présentées dans le cadre en bas de figure 63. Ce tracé fait place à des valeurs de débit plus élevées; il diffère également des deux tracés dans les cadres supérieurs dans le sens où seule l'eau de l'Arctique (salinité inférieure à 33,7 et débit vers le sud) a été prise en compte.

La forte circulation dans le sens antihoraire autour de la baie de Baffin d'eau plus salée du courant groenlandais de l'Ouest, qui ne fait pas partie du débit de l'Arctique, a été ignorée. Comme dans le détroit de Nares, la variation saisonnière ne constitue pas un signal fort. Comme dans le détroit de Lancaster, la faible tendance à la baisse mesurée sur 6 ans n'est pas statistiquement significative. Le débit moyen global était de 1 815 mSv, ce qui est sensiblement plus élevé que la somme des apports (1 275 mSv) du détroit de Nares et du détroit de Lancaster. Cependant, chacune des trois valeurs moyennes a été évaluée sur un intervalle de temps différent. Même lorsque le débit de 300 mSv dans le détroit de Cardigan et le canyon Hell Gate (MPO, données non publiées) est inclus, il reste une valeur appréciable résiduelle (240 mSv) qui attend une explication.

Les répercussions en amont et en aval de ces transferts d'eau de mer entre l'Arctique et l'Atlantique varient selon les taux de transport. Les océanographes s'efforcent d'obtenir les meilleures valeurs d'observation possible, afin que la fiabilité des modèles de prévision climatique dans la représentation du débit de l'Arctique canadien puisse être évaluée. Une fois ces efforts accomplis, les modèles validés peuvent être utilisés pour prédire l'ampleur et les répercussions écologiques des futurs changements.

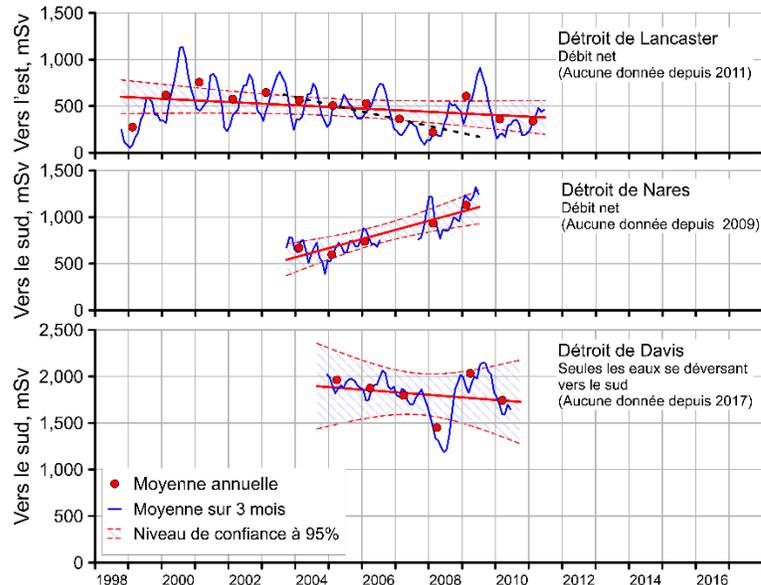


Figure 63. Mesures du débit de l'eau de mer allant de l'Arctique à l'Atlantique dans les détroits de Lancaster, de Nares et de Davis. Les deux premiers débits alimentent le troisième. L'unité est le milli-Sverdrup, qui correspond à 1 000 m³/s.

5.2.4. Baie de Baffin

Le temps de navire alloué à l'entretien de l'observatoire dans le détroit de Davis a permis la collecte annuelle de données chimiques océaniques le long de la section transversale où des instruments de mesures avaient été installés. Comme dans le bassin Canada, le dioxyde de carbone a été le produit chimique à l'état de trace d'intérêt en raison de son impact sur l'acidité de l'eau de mer. Dans la mesure où le dioxyde de carbone se dissout plus facilement dans l'eau froide, son impact sur les eaux arctiques et les organismes calcifiants revêt un intérêt particulier.

Le cadre supérieur de la figure 64 montre les valeurs d'une quantité Ω liée au potentiel corrosif de l'eau de mer sur les coquilles de carbonate (Azetsu-Scott et coll., 2010). Les valeurs Ω inférieures à 1 (jaune et rouge), potentiellement nocives pour les organismes à coquille, dominent près du fond marin. Les valeurs légèrement plus élevées (vert et bleu) près de la surface se situent dans la plage de tension. Le cadre inférieur montre les valeurs Ω à une profondeur à 50 m de 2005 à 2016. Les valeurs dans le débit de sortie de l'Arctique, du côté canadien, sont légèrement dommageables, tandis que celles du côté du Groenland sont moins alarmantes. Les données tracées n'indiquent pas une détérioration rapide des conditions du côté canadien, bien que des variations interannuelles apparaissent de manière évidente.

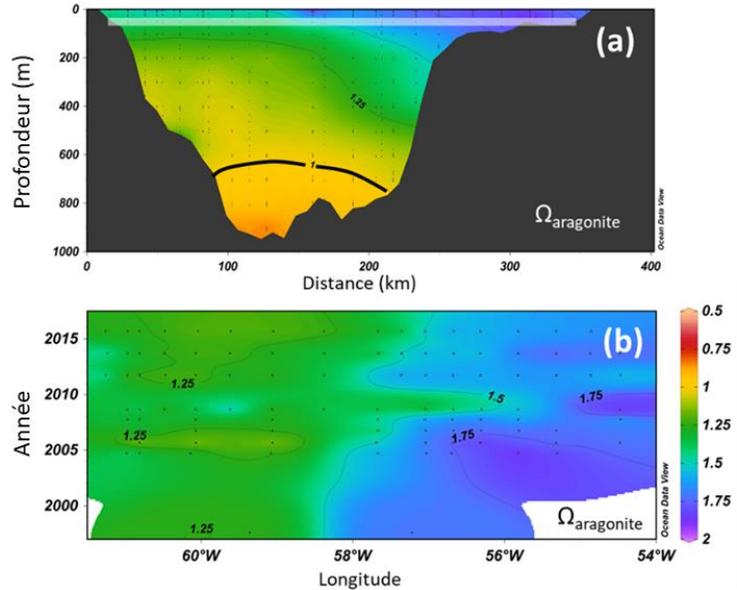


Figure 64. (a) acidité océanique moyenne dans le détroit de Davis de 1997 à 2015, en termes d'état de saturation Ω de l'aragonite, une forme de calcaire; (b) variation temporelle de Ω à 50-100 m. Les coquilles et les squelettes d'organismes commencent à se dissoudre dans l'eau de mer quand Ω est inférieur à 1 (source : MPO, données non publiées).

La couverture de glace dans la baie de Baffin est surtout saisonnière, et varie d'une couverture presque complète au 1^{er} avril à une petite zone de glace seulement dans le nord-ouest à la mi-septembre. Il est par conséquent plus utile d'examiner l'étendue de la glace pendant les saisons intermédiaires lorsque la couverture de glace diminue (au printemps) ou s'étend. À ces périodes, une tendance dans l'étendue de la glace équivaut à un changement dans la durée de la saison de couverture de glace. Figure 65 montre la

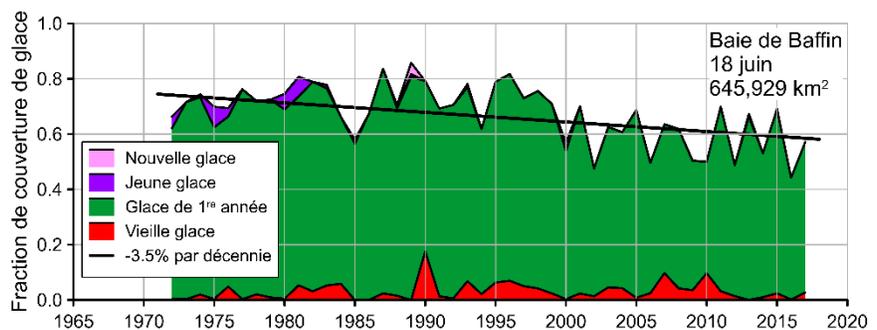


Figure 65. Couverture fractionnelle par type de glace dans la baie de Baffin à la mi-juin. La tendance à la baisse de l'étendue de glace à cette date (significative à un niveau de confiance de 95 %) indique que la banquise dans la baie de Baffin fond plus tôt au printemps (source : IceMap, Service canadien des glaces, 2019).

couverture fractionnelle par type de glace dans la baie de Baffin à la mi-juin. Outre les petites zones de vieille glace dans le nord-ouest, le type de glace dominant est la glace épaisse de première année. La couverture de glace épaisse de première année à cette date a diminué à un taux moyen de 3,5 % par décennie au cours des 47 dernières années. Toutefois, comme les conditions semblent avoir été stables dans la baie de Baffin jusqu'à la fin des années 1990, une grande partie du changement a eu lieu après les années 1990. La tendance à la baisse indique que la banquise fond aujourd'hui plus tôt au printemps que par le passé.

Une polynie est une zone de la surface de la mer en hiver où la couverture de glace est beaucoup plus mince que dans l'océan autour. Les eaux du Nord (étude de cas 8) représentent une grande polynie située dans le nord de la baie de Baffin et constituent une caractéristique écologique importante de la région arctique canadienne.

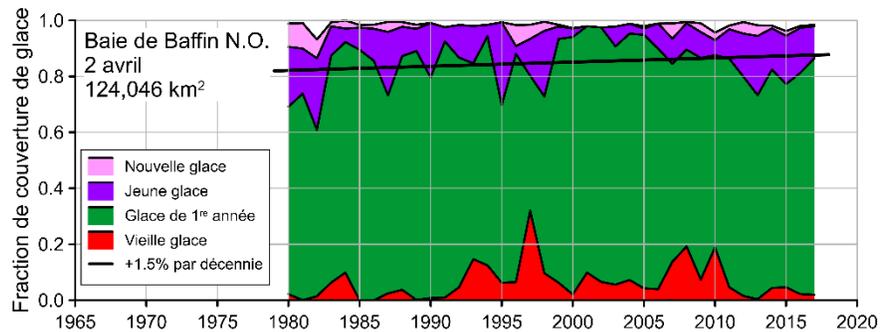


Figure 66. Couverture de glace fractionnelle dans le nord-ouest de la baie de Baffin début avril. Une faible tendance à la hausse dans l'étendue de la glace épaisse de première année à cette date implique une faible tendance à la baisse de la taille des eaux du Nord (source : IceMap, Service canadien des glaces, 2019).

L'existence de cette polynie est attribuable à l'influence des vents dominants qui soufflent depuis les détroits de Smith, de Lady Ann et de Lancaster et qui s'intensifient localement dans le confinement des hautes terres des îles voisines (Melling et coll., 2001; Samelson et coll., 2006). Les polynies constituent des caractéristiques dynamiques qui s'étendent et se contractent à des échelles de temps hebdomadaires à mesure que les zones de la surface de la mer exposée gèlent et que les vents changent. Toutefois, la présence d'eau libre, de nouvelle glace et de jeune glace dans le nord-ouest de la baie de Baffin au début du printemps permet de mesurer l'occurrence et les variations des eaux du Nord au fil du temps (figure 66). L'observation d'une faible tendance à la hausse de l'étendue de la glace épaisse de première année implique une faible tendance à la baisse de la taille des eaux du Nord (non significative statistiquement). Par conséquent, sauf dans le cas d'un niveau de variation interannuelle élevé, cette caractéristique semble être demeurée stable à cette période de l'année.

5.2.5. Baie d'Hudson

Les observations soutenues et systématiques dans la baie d'Hudson sont rares. Comme dans d'autres zones de l'Arctique canadien, les données sur la couverture de glace de mer forment l'enregistrement le plus utile pour déterminer les conditions passées et la probabilité de changement. Comme dans la baie de Baffin, ces données sont utiles pour examiner la couverture de glace à la mi-juin afin de déterminer d'éventuels signes de changement dans la durée de la saison de glace et début avril dans le nord-ouest de la baie d'Hudson, afin de déterminer si le

chenal de séparation libéré par les forts vents de terre à cette période de l'année s'est élargi au fil du temps.

Figure 67 montre la fraction de la couverture de glace par type de glace dans la baie d'Hudson à la mi-juin. Une fraction importante de la glace a déjà fondu à cette date, y compris toutes les formes de jeune glace, pour laisser presque que de la glace épaisse de première année. La tendance à la baisse de l'étendue de la glace (-2,1 % par décennie) est peu significative, mais comme dans la baie de Baffin, elle révèle une tendance au dégel précoce au printemps. Parce que la glace de mer circule dans le sens antihoraire autour de la baie d'Hudson, la zone nord-ouest de la baie est libérée des glaces la première par le vent du nord-ouest. En effet, un examen des relevés de la glace dans cette zone à la mi-juin (non représentés) révèle cette forte tendance à un dégel plus précoce ; la couverture de glace a diminué à un taux de -4,4 % par décennie pour cette semaine précise ou de 20 % sur les 45 ans de relevés.

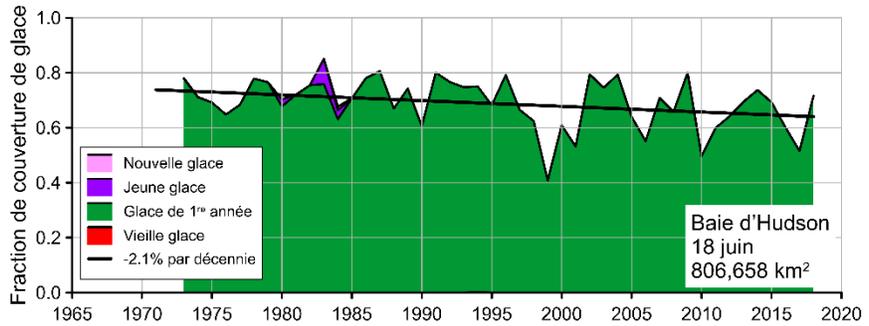


Figure 67. Couverture fractionnelle par type de glace dans la baie d'Hudson à la mi-juin. La faible tendance à la baisse de l'étendue de glace à cette date n'est pas significative statistiquement (source : IceMap, Service canadien des glaces, 2019).

Les données sur la glace dans le nord-ouest de la baie d'Hudson au début avril (figure 68) ressemblent à celles des eaux du Nord, tant pour les variations décennales que pour la tendance, ce qui laisse entendre une tendance faible à un chenal de séparation plus étroit. Cette tendance va à l'encontre de la tendance négative notable de -4,4 % par décennie dans la même zone 2,5 mois plus tard seulement. Cette différence pourrait indiquer que les changements atmosphériques n'ont pas encore exercé d'influence importante sur la couverture de glace dans la baie d'Hudson en plein cœur de l'hiver.

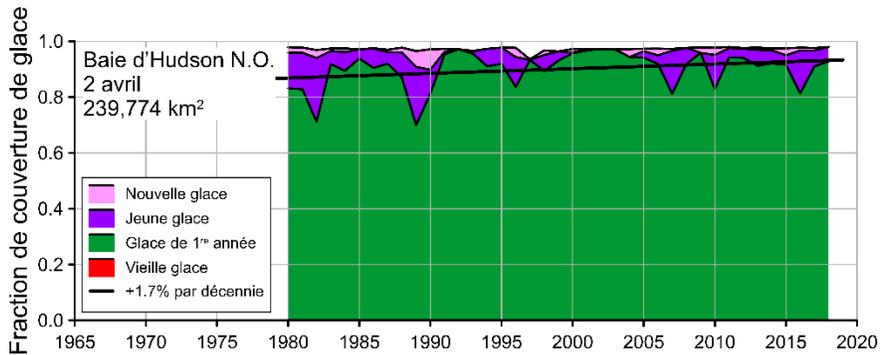


Figure 68. Couverture de glace fractionnelle dans le nord-ouest de la baie d'Hudson au début d'avril. Une faible tendance à la hausse de l'étendue de la glace épaisse de première année à cette date implique une faible tendance à la baisse de la largeur du chenal de séparation (source : IceMap, Service canadien des glaces, 2019).

5.3 Réponses régionales dans la production primaire : expansion vers le nord et points chauds

La floraison phytoplanctonique est un événement important dans la phénologie annuelle des écosystèmes de l'océan Arctique, car elle permet une grande partie de la production primaire qui alimente les niveaux trophiques supérieurs du réseau alimentaire marin. Le transfert de la production primaire de la floraison phytoplanctonique de courte durée aux niveaux trophiques supérieurs dépend en grande partie du couplage temporel entre les brouteurs et la floraison. Dans l'Arctique, en raison de la courte saison productive, de nombreuses espèces se sont adaptées à la flambée soudaine et intense d'aliments provenant de la floraison phytoplanctonique, menant à une connectivité temporelle étroite qui assure des transferts efficaces des producteurs primaires aux mammifères marins.

Comme leur nom l'indique, les producteurs primaires produisent de la matière organique à partir des éléments de la colonne d'eau (nutriments, section 4.2) en utilisant l'énergie solaire par l'entremise de la photosynthèse. Par conséquent, les producteurs primaires ont besoin à la fois de la lumière du soleil et des nutriments pour produire la matière organique qui alimente tous les niveaux trophiques du réseau marin. Les producteurs primaires fixent la limite de la production pour les niveaux trophiques supérieurs dans l'Arctique comme dans les autres océans, car la production ne peut pas être supérieure ce qui est alimenté par la matière organique de la production primaire.

Comme la glace de mer recouverte de neige atténue fortement la lumière et sa transmission à la colonne d'eau, les changements dans les conditions de la glace de mer entraînent des conséquences sur la production de phytoplancton. Dans l'Arctique canadien, les estimations par télédétection de la production primaire annuelle affichent une augmentation de plus de 40 % entre les périodes de 2002 à 2004 et de 2010 à 2014 (figure 69).

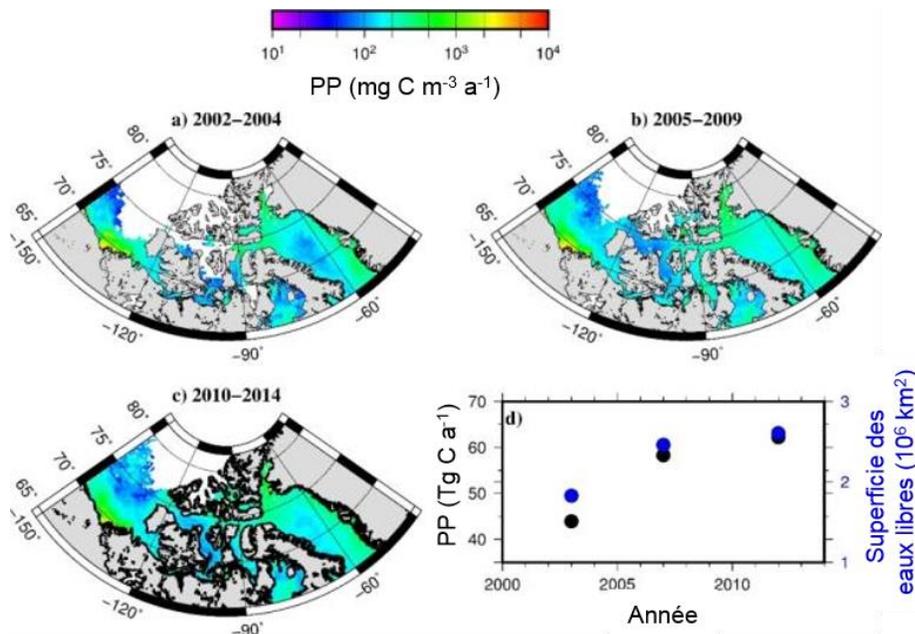


Figure 69. Production primaire (PP) moyenne dans l'Arctique canadien dérivée des images MODIS L3 pour trois périodes : a) 2002 à 2004, b) 2005 à 2009 et c) 2010 à 2014. Le tableau d) correspond à la production primaire annuelle moyenne totale pour les trois périodes (symboles noirs) et à la surface maximale des eaux libres pour chaque période (symboles bleus) (source de données : Takuvik, DOI 10.5884/12513).

Aux fins de ces estimations, l'Arctique canadien est défini comme la région limitée par les 65° et 85°N et par les 40° et 110°O. L'augmentation de la production primaire dans les eaux canadiennes est attribuable à une saison d'eau libre plus longue et à une augmentation de la superficie de la couverture de l'eau libre pour une période donnée (p. ex. section 5.2.4). Il existe une forte corrélation entre la superficie maximale de l'eau libre et la production primaire annuelle selon les estimations tirées de l'imagerie satellitaire.

En plus de l'augmentation de la production primaire annuelle en eau libre au cours de la dernière décennie, la floraison phytoplanctonique progresse également vers le nord. Dans la mer de Beaufort, la floraison phytoplanctonique observée par télédétection s'est rapprochée du 80°N entre 2010 et 2014, tandis que la floraison de surface a été observée que jusqu'à une latitude approximative de 75,5°N entre 2002 et 2004. Des floraisons à la lisière des glaces sont également documentées dans des régions de latitude élevée où on n'avait jamais observé de floraison auparavant (figure 70). À l'échelle de l'Arctique, malgré une forte variabilité régionale, la floraison phytoplanctonique à la lisière des glaces a progressé vers le nord à un rythme de 1 degré de latitude par décennie entre 2003 et 2013 pour atteindre le 82°N (Renaut et coll., 2018).

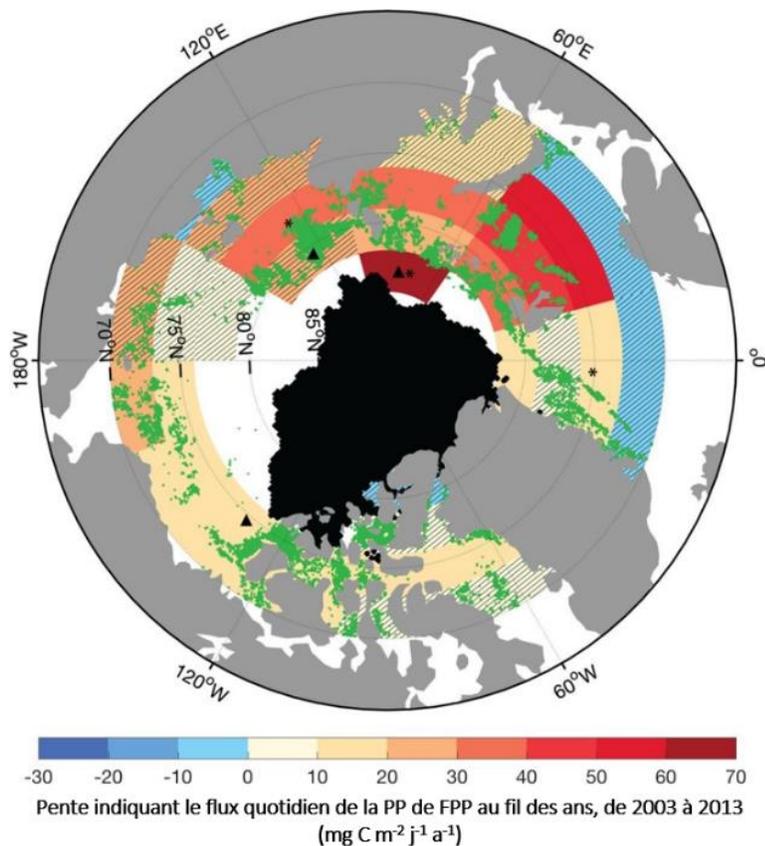


Figure 70. Tendances annuelles de la productivité primaire (PP) au cours de la période de floraison phytoplanctonique printanière (FPP) estimées à partir de données satellitaires sur la couleur des océans entre les 70° et 90°N. Noter que les pixels verts correspondent aux nouvelles floraisons phytoplanctoniques printanières observées à partir de 2010. Les bandes de couleur indiquent si la PP annuelle a diminué (tons bleus) ou augmenté (tons orangés/rouges) au cours de la période d'étude (2003 à 2013). Les bandes rayées désignent les zones sans tendance significative de la productivité primaire. Les zones noires sont exemptes de données en raison de la présence de glace de mer. Les zones blanches ne sont pas incluses dans l'analyse ou n'offrent pas suffisamment d'observations. (Source : Renaut et coll., 2018).

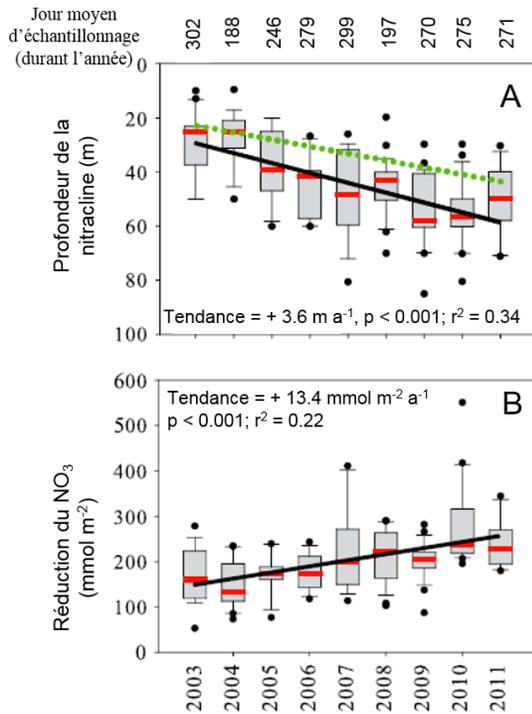


Figure 71. Tendances de a) la profondeur de la nitracine et b) la réduction du NO₃ dans la mer de Beaufort de 2003 à 2011 (source : Bergeron et Tremblay, 2014).

Le tourbillon anticyclonique de Beaufort favorise l'accumulation d'eau douce provenant de la fonte des glaces et des rivières dans la région (section 5.2.1, figure 50), ce qui nuit à la capacité du phytoplancton d'accéder au réservoir de nutriments à un niveau profond et limite la production primaire (McLaughlin et coll., 2010; Coupel et coll., 2015). Le renforcement de la stratification de surface nuit également au réapprovisionnement en nutriments pendant hiver. Par conséquent, les concentrations de nitrate hivernales peuvent être d'un ordre de grandeur plus faible dans les bassins que sur le plateau (Codispoti et coll., 2013), ce qui ouvre la voie à une production primaire réduite. De même, on a observé une diminution de la production primaire liée au recul de la glace de mer et aux changements connexes dans la stratification et le mélange de surface dans la baie de Baffin (Bergeron et Tremblay, 2014) et dans la polynie des eaux du Nord (étude de cas 8).

Les processus régionaux influent également sur la composition des communautés phytoplanctoniques et, par conséquent, sur les transferts dans le réseau trophique. À mesure que la couche de surface mélangée s'enfonce sur le plateau, les communautés phytoplanctoniques dominées par des espèces adaptées aux conditions de faible luminosité s'épanouissent, au profit des nanoflagellés (Coupel et coll., 2015). En revanche, dans la couche supérieure appauvrie en nutriments des bassins extracôtiers, les plus petites cellules de phytoplancton (picotaille) dominent, car elles sont plus efficaces à de faibles concentrations ambiantes de nutriments (Li et coll., 2009). Ces changements dans la structure des écosystèmes marins jouent un rôle essentiel sur les flux d'énergie et de matière vers les ressources exploitables, dans la mesure où les

Les changements régionaux de la glace de mer entraînent des effets régionaux différents sur la production primaire. Une analyse de la télédétection à l'échelle de l'Arctique met en évidence une gamme de changements dans la production primaire, allant du déclin à des augmentations importantes sur les différents plateaux de l'Arctique (Arrigo et van Dijken, 2015).

Dans la région de l'Arctique canadien, les réponses sont fortement régionalisées. Sur le plateau de la mer de Beaufort (section 5.2.2), le changement de la couverture de glace de mer permet une pénétration plus en profondeur de la lumière dans la colonne d'eau, ce qui offre des conditions propices à la croissance du phytoplancton. L'effet produit consiste en une augmentation de la réduction du nitrate et de la productivité annuelle, car les cellules de phytoplancton peuvent accéder à un réservoir de nutriments à un niveau plus profond (Bergeron et Tremblay, 2014) (figure 71).

En revanche, dans les zones extracôtiers comme le bassin Canada, il y a des évidences que le

différents groupes phytoplanctoniques ne contribuent pas de la même manière aux transferts dans le réseau trophique.

Dans l'ensemble, ces changements de l'ampleur et de la répartition des producteurs primaires devraient se répercuter sur l'ensemble des réseaux trophiques marins et profiter aux espèces qui peuvent tirer parti de la période d'eau libre plus longue plutôt qu'aux « spécialistes » comme la morue polaire, les phoques et l'ours polaire qui sont adaptés à la glace de mer et à sa chaîne alimentaire pour répondre à leurs besoins énergétiques (études de cas 4 et 9). Les processus régionaux qui influent sur l'emplacement des points chauds en matière de production et la composition des espèces de phytoplancton ont également des effets en cascade dans l'ensemble du réseau trophique, avec des conséquences largement méconnues sur les stocks de ressources locaux, régionaux et mondiaux.

5.4 Variabilité des poissons et des invertébrés

5.4.1 Poissons anadromes

Les poissons anadromes constituent un groupe qui pourrait profiter des tendances documentées de saisons d'eau libre plus longues et des changements régionaux de la productivité dans l'océan Arctique. Ces espèces utilisent les habitats côtiers de manière saisonnière, puisque les poissons anadromes migrent à partir des refuges hivernaux et des zones de frai/de croissance en eau douce, vers les eaux marines peu après la fonte des glaces au printemps. Ces espèces passent la courte période estivale arctique à se nourrir et à profiter de la productivité élevée des eaux saumâtres créées par le déversement des affluents allant des nombreuses petites décharges de lac qui caractérisent une grande partie du littoral de l'île de Baffin à l'est (Moore, 1975; Loewen et coll., 2010), aux rivières plus grandes comme celles de la côte de Kivalliq et du Versant nord du Yukon (rivières Firth, Babbage, Big Fish) et les rivières Hornaday et Mackenzie à l'ouest. Les grandes rivières peuvent imposer que les espèces migrent sur de longues distances (Sprules, 1952). Par exemple, l'inconnu (*Leucichthys de Stenodus*), une espèce ayant une des plus longues migrations, effectue des déplacements vers la mer pouvant atteindre 1 800 km (Stephenson et coll., 2005).

Presque toutes les espèces anadromes du Nord (dont la plupart sont des salmonidés) alimentent d'importantes pêches de subsistance et commerciales, ainsi qu'une pêche récréative limitée. L'omble chevalier et le Dolly Varden (*malma salvelinus*), en particulier, sont très appréciés et des pêches annuelles de subsistance ont lieu régulièrement près de nombreuses collectivités. Les pêches se déroulent en général à des endroits où les poissons se rassemblent en grand nombre le long de la côte ou sur les routes migratoires pendant les migrations en amont à l'automne. Dans certains cas, les stocks d'omble chevalier hivernant sont récoltés sous la glace des lacs (p. ex. omble chevalier de la rivière Kuujuua dans le lac Tatik; Harwood et coll., 2013; différents stocks dans les lacs de l'île de Baffin; Mulder et coll., 2018). Une récolte automnale limitée du Dolly Varden est également effectuée sur la rivière Big Fish, dans les fosses de frai ou d'hivernage du poisson, à l'aide de méthodes traditionnelles de pêche à la senne. Ces récoltes annuelles offrent des occasions idéales de surveillance communautaire des caractéristiques démographiques et des taux de prise. Certaines des séries chronologiques de données d'évaluation des stocks de poissons arctiques à plus long terme ont été obtenues dans le cadre de programmes de

surveillance impliquant les ombles anadromes récoltés par les pêcheurs communautaires (p. ex. Dolly Varden de la rivière Rat, omble chevalier des rivières Hornaday et Kuujjua, tableau 4). Ces ensembles de données à long terme permettent d'examiner des tendances temporelles et offrent un aperçu des effets potentiels de la variabilité environnementale sur les habitats en eau douce et en milieu marin de ces espèces.

Voici des exemples de tendances des stocks où des liens avec les changements récents de l'environnement océanique ont été documentés :

Dans la baie Cumberland dans l'est de l'Arctique, Ulrich (2013) a documenté un changement entre 2002 et 2011 dans le régime alimentaire estival de l'omble chevalier, qui est passé d'invertébrés principalement au capelan. Ce changement de régime montre des signes d'effet positif sur les taux de croissance de l'omble chevalier dans les populations examinées, mais les conséquences à long terme sur les tendances de la population de l'omble demeurent inconnues. Bien que le capelan ne soit pas nouveau dans l'Arctique – des données remontent aux années 1820 (Coad et Reist, 2018) – les connaissances inuites (p. ex. ministère de l'Environnement du Nunavut, Nunavut Coastal Resource Inventory – Pangnirtung, 2013) et les études sur le régime alimentaire des mammifères marins et des poissons (p. ex. Ulrich, 2013; Yurkowski et coll., 2017, 2018) indiquent que, depuis 10 à 20 ans, le capelan a augmenté dans certains écosystèmes côtiers. À ce jour, l'abondance du capelan dans l'Arctique canadien n'a pas été évaluée directement.

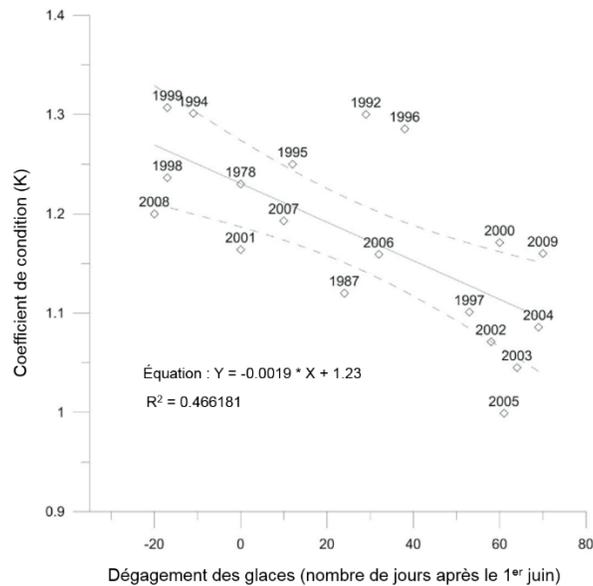


Figure 72. Lien entre l'état corporel de l'omble chevalier de la rivière Kuujua et le recul des glaces dans la mer de Beaufort (source : Harwood et coll., 2013).

La surveillance à long terme des pêches pendant la montaison à l'automne du stock d'omble chevalier de la rivière Kujjua vers le lac Tatik sur l'île Victoria, a révélé une variabilité de l'état corporel annuel moyen corrélé au moment du recul de la glace de mer au printemps dans la mer de Beaufort (Harwood et coll., 2013, 2015a) (figure 72). Un recul de la glace plus précoce a été

associé à une amélioration de l'état du poisson. Ces résultats concordent généralement avec les observations provenant des pêches qui indiquent une augmentation des taux de croissance et de la taille des poissons et une tendance à une abondance supérieure de ce stock au cours des 10 dernières années (Harwood et coll., 2013, 2015a; MPO, 2016a), ainsi que d'autres stocks d'omble chevalier voisins comme ceux de la rivière Hornaday (MPO, 2015). Une relation similaire entre l'amélioration de l'état somatique et le recul des glaces plus précoce dans la mer de Beaufort a également été observée dans le cadre d'une surveillance à long terme de la récolte de Dolly Varden dans la rivière Rat (Harwood et coll., 2009). Ces résultats scientifiques correspondent aux connaissances inuites selon lesquelles, ces dernières années, des Dolly Varden plus gros et plus grands ont été pêchés sur les côtes (Byers et coll., 2019). Les changements d'état des poissons observés sont associés de manière présumée à une amélioration de la productivité environnementale (Harwood et coll., 2015a). Parallèlement, la perte précoce de glace de mer pourrait également permettre à ces espèces de migrer vers la mer plus tôt et de s'alimenter plus longtemps. On peut s'attendre à ce que les changements de possibilités alimentaires côtières et la croissance connexe entraînent des répercussions sur les trajectoires du cycle biologique et, par extension, sur la dynamique des populations, comme le montrent des études récentes sur la croissance et la reproduction des populations de Dolly Varden du Nord, où la croissance s'est avérée un facteur clé du comportement migratoire et de la fréquence du frai (Morrison, 2017; Gallagher et coll., 2018a).

Si ces ensembles de données à long terme permettent d'examiner les effets de la pêche et des facteurs environnementaux, les données sur les stocks de poissons anadromes dans l'Arctique canadien sont rares. Seul un petit nombre de pêches clés (tableau 4) font l'objet d'une surveillance régulière, mais on estime qu'il y aurait de 195 à 400 stocks anadromes récoltés dans l'Arctique canadien (Tallman et coll., 2013, 2019). Parmi les stocks surveillés, un petit nombre seulement offrent des données sur plus de 5 ans, ce qui rend difficile l'application de méthodes typiques d'évaluation des stocks pour estimer les trajectoires des populations et évaluer l'état des stocks (tableau 4), en particulier en association avec la variabilité des paramètres environnementaux. Roux et coll. (2011, 2019) ont proposé une approche de rechange aux évaluations traditionnelles. À l'aide d'une analyse de productivité-sensibilité, ils ont examiné la vulnérabilité sur la récolte de 95 stocks d'omble chevalier au Nunavut (figure 73). Parmi les principaux stocks récoltés, les pêches de subsistance de l'omble chevalier et du Dolly Varden dans l'Arctique occidental offrent une information très complète sur les tendances démographiques. Plusieurs de ces stocks ont connu des périodes de déclin par le passé, en raison en partie de la surexploitation, mais des changements environnementaux dans les habitats riverains ont également été mis en cause (Howland et coll., 2012; Byers et coll., 2019). Toutefois, des évaluations plus récentes indiquent des tendances stables ou croissantes en matière d'abondance (tableau 4) et, dans certains cas, une augmentation de la taille selon l'âge. L'amélioration de la situation des stocks semble être liée à une cogestion des pêches solide et à la mise en œuvre connexe de plans de pêche communautaires assortis de quotas volontaires utilisés au cours des 10 dernières années.

Bien que les tendances démographiques soient généralement positives et que la croissance du poisson semble augmenter à l'ouest de l'Arctique, les mouvements côtiers et les associations aux conditions de la glace de mer sont complexes et mal compris. Par exemple, les pêcheurs signalent que les prises de Dolly Varden sur la côte de la mer de Beaufort ont diminué au cours

des dernières décennies, mais ils ne savent pas si cela est attribuable à la diminution des populations d'omble ou à un changement dans les migrations côtières, l'omble nageant plus au large, au-delà des lieux de pêche au filet (Byers et coll., 2019). On pense qu'un manque récent de glace de mer près des côtes et des conditions côtières plus vaseuses en raison de l'érosion des côtes pourraient avoir une incidence sur l'utilisation des corridors de migration près du littoral par les Dolly Varden (Byers et coll., 2019). Des études scientifiques récentes sur le Dolly Varden à l'aide de techniques de télémétrie par satellite offrent également des indications sur l'utilisation d'habitats en haute mer (Courtney et coll., 2018). Toutefois, on ne sait pas s'il s'agit d'un changement de comportement récent, puisque nous ne disposons pas d'études antérieures sur l'utilisation des habitats côtiers.

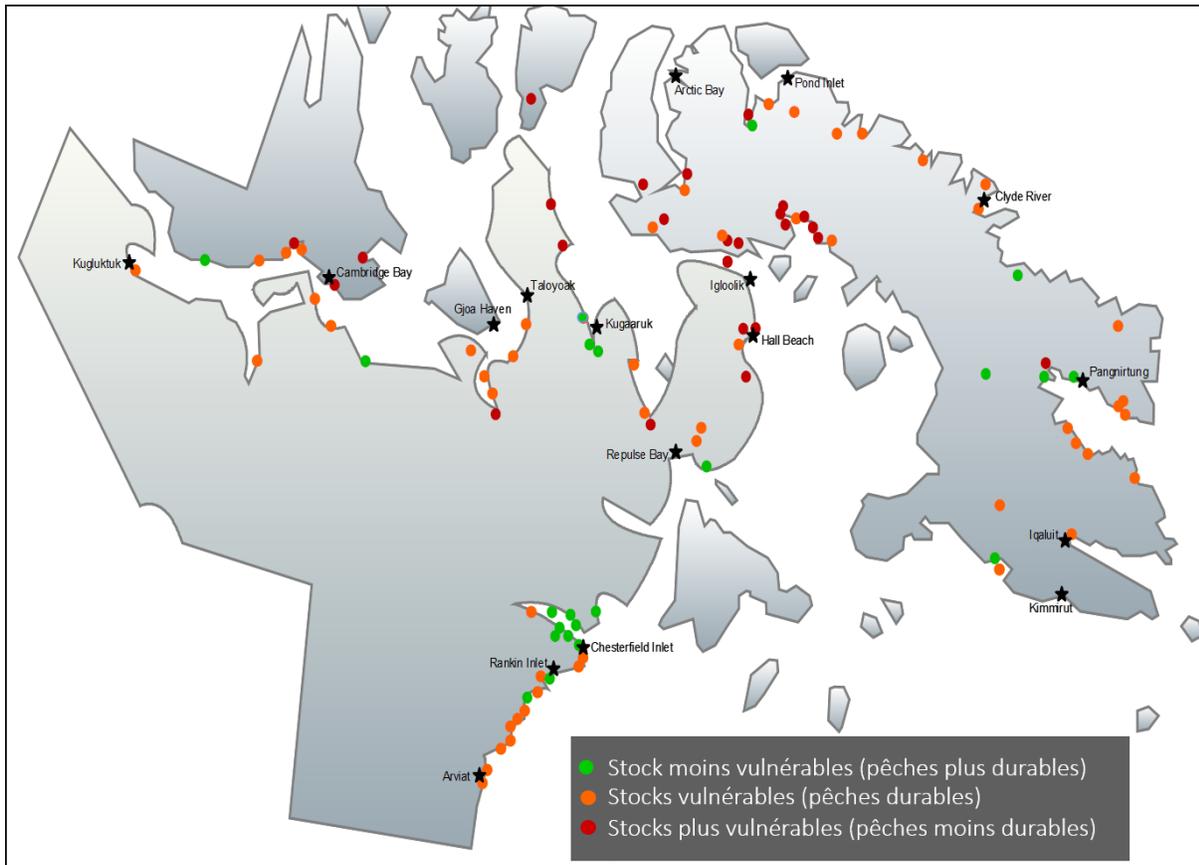


Figure 73. Vulnérabilité à la pêche relative des stocks d'omble chevalier au Nunavut établie à l'aide d'une analyse productivité-sensibilité (données de : Roux et coll., 2011; Tallman et coll., 2019).

Tableau 4. Estimations de l'abondance, indices biologiques et tendances des principaux stocks de poissons anadromes pêchés dans l'Arctique canadien.

Nom commun	Stock	Répartition des aires d'alimentation côtières en été	Indices biologiques	Estimations de l'abondance	Cadre temporel (années)	Tendances/état de la population	Références
Dolly Varden	Rivière Rat	Est de la mer de Beaufort (de l'île Herschel à la pointe Shingle)	Oui	Oui	1995-2014	Baisses antérieures, actuellement stable/à la hausse	Sandstrom et coll., 2009; Roux et coll., 2012; Howland et coll., 2012; MPO, 2017a; Harris et coll., 2017; C. Gallagher et coll., 2019
Dolly Varden	Rivière Big Fish	Est de la mer de Beaufort (de l'île Herschel à la pointe Shingle)	Oui	Oui	1972-2011	Baisses antérieures, actuellement stable/à la hausse	Gallagher et coll., 2011, 2013; Howland et coll., 2012; MPO, 2013a; Harris et coll., 2017
Dolly Varden	Rivière Babbage	Est de la mer de Beaufort (de l'île Herschel à la pointe Shingle)	Oui	Oui	1990-2014	Stable/à la hausse	MPO, 2017b; Harris et coll., 2017; Gallagher et coll., 2018 b
Omble chevalier	Rivière Hornaday	Baie Darnley	Oui	Oui	1990-2013	Baisses antérieures, actuellement stable/à la hausse	MPO, 2016a; Gallagher et coll., 2017; Zhu et coll., 2017
Omble chevalier	Rivière Kuujua	Détroit de Prince-Albert/inlet Minto	Oui	Non	1991-2015	Baisses antérieures, actuellement stable/à la hausse	Harwood et coll., 2013; MPO, 2016b
Omble chevalier	Rivière Lauchlan	Cambridge Bay	Oui	Oui	1985-2018	À la hausse	MPO, 2013b; Day et Harris, 2013
Omble chevalier	Rivière Halovik	Cambridge Bay	Oui	Oui	1985-2018	En baisse	MPO, 2013b; Day et Harris, 2013
Omble chevalier	Lac Jayko	Cambridge Bay	Oui	Oui	1985-2018	En baisse	MPO, 2013b; Day et Harris, 2013

Nom commun	Stock	Répartition des aires d'alimentation côtières en été	Indices biologiques	Estimations de l'abondance	Cadre temporel (années)	Tendances/ état de la population	Références
Omble chevalier	Rivière Ekalluk	Cambridge Bay	Oui	Non	1985-2018	Stable	MPO, 2013b; Day et Harris, 2013
Omble chevalier	Rivière Paliryuak	Cambridge Bay	Oui	Non	1985-2018	Stable	MPO, 2013b; Day et Harris, 2013
Omble chevalier	Lac Kipisa	Baie Cumberland	Oui	Non	1998-2003	Stable	MPO, 2005
Omble chevalier	Lac Iqaluit	Baie Cumberland	Oui	Non	2005-2011	Stable	MPO, 2005
Omble chevalier	Rivière Sylvia Grinnell	Baie Frobisher	Oui	Oui	1947-2018*	À la hausse	MPO, 2013c
Omble chevalier	Baie Millut	Baie Cumberland	Oui	Oui	2008-2014	Stable	Y. Janjua, données non publiées
Omble chevalier	Naulinarvik	Baie Cumberland	Oui	Non	2010-2018	Stable	C. Lewis, données non publiées
Omble chevalier	Kanayuktuk Ikpit	Baie Cumberland	Oui	Non	2003-2012	Stable	Y. Janjua, données non publiées
Omble chevalier	Inlet Irvin	Baie Cumberland	Oui	Oui	2008-2014	Stable	Y. Janjua, données non publiées
Omble chevalier	Iqalujjuaq	Baie Cumberland	Oui	Oui	2008-2014	Stable	Y. Janjua, données non publiées
Omble chevalier	Ijaruvung	Baie Cumberland	Oui	Oui	2008-2014	Stable	Y. Janjua, données non publiées
Omble chevalier	Anaktuayuit	Baie Cumberland	Oui	Non	2008-2014	Inconnu	
Omble chevalier	Arvtuajuk	Baie Cumberland	Oui	Non	2010-2018	Inconnu	

*Noter que la série chronologique est intermittente – la plus longue période consécutive est de 5 ans.

5.4.2 Poissons de mer commerciaux

Les stocks de flétan du Groenland dans la baie de Baffin Bay et le détroit de Davis (sous-secteur 0 de l'Organisation des pêches de l'Atlantique Nord-Ouest; S-S 0 de l'OPANO) sont évalués chaque année à l'aide des données des relevés au chalut de fond réalisés par le MPO. Les indices de biomasse et d'abondance des stocks dans le S-S 0 de l'OPANO ont montré des tendances générales à la hausse de 1999 à 2016, mais une diminution marquée en 2017 (Treble et Nogueira, 2018). Les fréquences de longueur dans les données des relevés ont varié d'une année à l'autre; plusieurs modes ont été observés certaines années (p. ex. 27 cm et 45 cm en 2017),

mais en général, les cohortes individuelles ne peuvent pas être suivies de manière fiable au fil du temps. Le nombre de gros poissons pêchés dans les relevés a augmenté de 1999 à 2004 et de 2008 à 2014. Dans l'ensemble, les stocks de flétan du Groenland dans le S-S 0 de l'OPANO sont stables depuis un certain nombre d'années et la pêche n'a jamais connu de baisse importante soutenue (figure 74). Il est extrêmement difficile de déterminer l'âge du flétan du Groenland puisqu'il subit très peu de changements saisonniers de température de l'eau ou de disponibilité de nourriture dans ses habitats en eaux profondes (généralement à plus de 400 m). En raison du manque de données selon l'âge, il est difficile de mettre en œuvre des modèles d'évaluation de stock qui nécessitent une structure d'âge de la population pour produire des résultats fiables. Les recherches en cours visent à améliorer les méthodes pour déterminer l'âge du flétan du Groenland et à mieux comprendre son écologie et sa dynamique des populations afin de pouvoir utiliser des modèles de population moins dépendants d'une structure d'âge robuste.

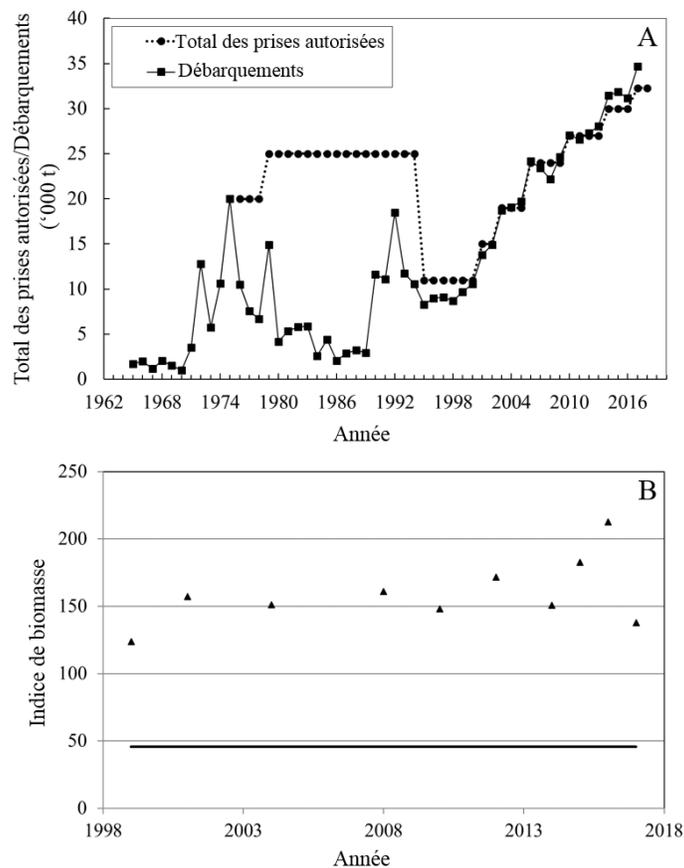


Figure 74. Total des prises autorisées et total annuel des prises débarquées (en milliers de tonnes) (A) pour le flétan du Groenland, et indice de biomasse (B) dans la baie de Baffin et le détroit de Davis ensemble. Limite inférieure de l'indice de biomasse au cours de la période du Plan intégré de gestion des pêches indiquée par une ligne pointillée dans b.

En plus de la pêche commerciale hauturière du flétan du Groenland dans le S-S 0 de l'OPANO, une pêche commerciale communautaire hivernale du flétan du Groenland se déroule dans la baie Cumberland depuis 1986. Malgré un bon départ, l'intérêt et l'effort de pêche ont diminué au cours des années 1990 et au début des années 2000, car la pêche était pratiquée sur la glace de

mer dont l'étendue a diminué de manière constante, forçant l'exercice de la pêche dans des habitats de moins en moins profonds, ce qui a entraîné des taux de prise plus faibles (Hussey et coll., 2017). L'état des stocks a fait l'objet d'une surveillance par la collecte de données dans un sous-échantillon de la prise commerciale (surveillance des caractéristiques démographiques et des taux de prise), mais aucune évaluation indépendante des pêches n'a été effectuée. Depuis 2011, la pêche a rebondi, au point où la totalité du quota de 500 tonnes a été pêchée en 2018, après la découverte d'habitats en eau plus profonde qui n'étaient pas visibles sur les cartes hydrographiques existantes et qui sont très en retrait de la lisière de la banquise. Les taux de prise du flétan du Groenland en hiver ont été plus élevés dans ces habitats en eau profonde.

Le succès de la pêche du flétan du Groenland dans la baie Cumberland près de la collectivité de Pangnirtung a contribué à des efforts de développement de la pêche dans d'autres collectivités. La pêche exploratoire du flétan du Groenland a été pratiquée à Qikiqtarjuaq, à Clyde River et dans l'inlet Pond, situés dans l'est de l'île de Baffin. Le développement de nouvelles pêches commerciales dans ces collectivités pourrait accroître la pression sur le stock de flétan du Groenland dans le S-S 0 de l'OPANO, puisque ces pêches seraient pratiquées dans les eaux côtières directement adjacentes à la pêche hauturière et sur la même population de poisson.

En plus des activités de surveillance des populations ciblées par les pêches commerciales actuelles et en développement, toutes les espèces inscrites au registre de la LEP ou répertoriées par le COSEPAC sont évaluées régulièrement. Les évaluations du poisson-loup, du grenadier et du sébaste dans la S-S 0 de l'OPANO ont permis de conclure que les populations sont stables malgré les interactions directes et indirectes des pêches.

5.4.3. Stocks de crevettes commerciales

La crevette nordique et la crevette ésope font l'objet d'évaluations annuelles depuis 2006 dans le détroit de Davis (zone d'évaluation de l'est correspondant à la zone de pêche de la crevette 2) et depuis 2007 dans le détroit d'Hudson (zone d'évaluation de l'ouest correspondant à la zone de pêche de la crevette 3, figure 75). L'évaluation est fondée sur les indices de biomasse du stock reproducteur (BSR; toutes les crevettes femelles sans égard à leur taille) et pêchable (longueur de carapace supérieure à 17 mm). En règle générale, la crevette nordique est 4,5 fois plus abondante que la crevette ésope dans la zone d'évaluation de l'est, alors qu'à l'inverse, dans la zone d'évaluation de l'ouest, la crevette ésope est 2,8 fois plus abondante que la crevette nordique.

La pêche à la crevette, qui a commencé à la fin des années 1970 (figure 76) est pratiquée avec une couverture d'observateurs à 100 % qui permet une surveillance étroite des prises accessoires (p. ex. augmentation de la morue polaire, prises accessoires des dernières années). Depuis la

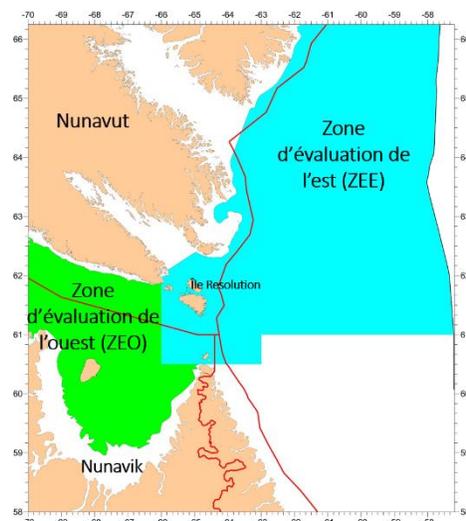


Figure 75. Zones d'évaluation de l'est et de l'ouest pour les espèces de crevettes commerciales dans la région de Baffin de l'Arctique canadien. Les limites des zones visées par les revendications territoriales du Nunavut, du Nunavik et du Nunatsiavut sont indiquées en rouge.

mise en œuvre d'une approche précaution en matière de gestion des crevettes en 2006-2007 dans la zone d'évaluation de l'est, les stocks de crevettes nordiques et de crevettes ésope se sont retrouvés sous le niveau de référence supérieur 8 % (1 an sur 12) et 50 % (6 ans sur 12) du temps, respectivement. Cette situation indique que le stock de crevettes nordiques dans la zone d'évaluation de l'est est généralement considéré comme sain, tandis que le stock de crevettes ésope est plus variable. Des efforts sont en cours pour élaborer un cadre d'approche de précaution écologique dans la zone d'évaluation de l'ouest pour les deux espèces de crevettes.

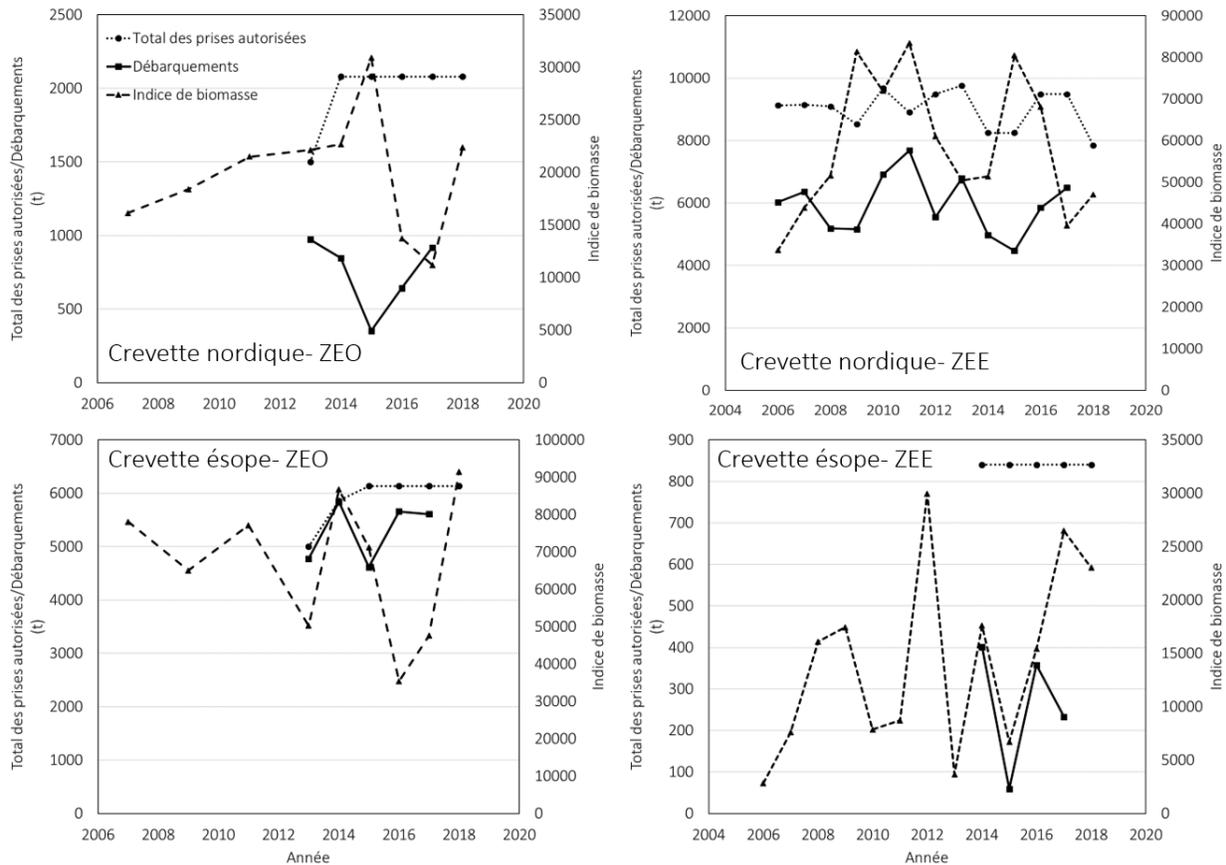


Figure 76. Total des prises autorisées, total annuel des prises débarquées et indice de biomasse pour les crevettes nordiques et ésope pêchées dans les zones d'évaluation de l'ouest (ZEO) et de l'est (ZEE) de la baie de Baffin.

5.5 Stabilité des populations de mammifères marins : observations et tendances

Les collectivités côtières de l'Arctique sont les mieux placées pour observer les mammifères marins sur des bases saisonnière et annuelle. Les données locales de captures et les connaissances autochtones sur les poissons et les mammifères marins représentent les séries de données écologiques temporelles les plus longues pour l'Arctique canadien (études de cas 17 et 18). Les Inuits de Tuktoyaktuk (T.N.-O.), collectivité qui pêche le plus de bélugas à l'heure actuelle, rapportent une variabilité dans la date d'arrivée des bélugas au printemps, notamment une arrivée précoce notable en 2016 (2 à 2,5 semaines plus tôt que les années précédentes) (Waugh et coll., 2018). Les connaissances inuites recueillies récemment font également état d'une variabilité dans l'occurrence des espèces. Des entrevues avec des membres de la

communauté de Hall Beach en 2017, dans le cadre du Nunavut Coastal Inventory, révèle l'occurrence de plusieurs espèces; des exemples sont présentés à la figure 77. Les aires de répartition sont fondées sur des observations individuelles et les lieux où les espèces sont habituellement pêchées. L'information consignée comprend également des observations de la variabilité temporelle ou saisonnière. Des renseignements similaires existent aujourd'hui dans plusieurs collectivités du Nunavut.

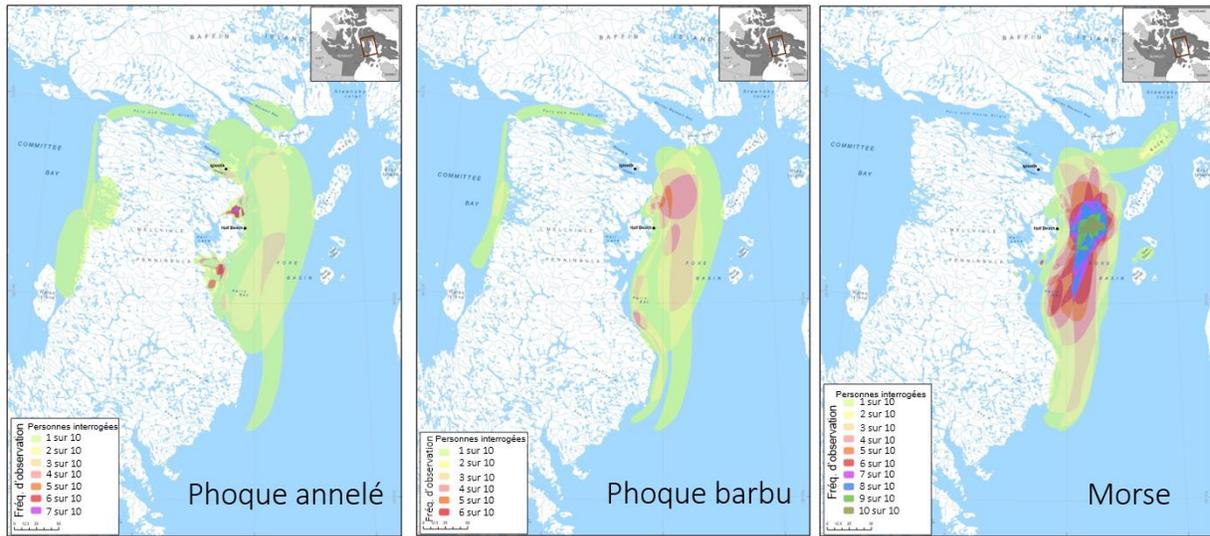


Figure 77. Cartes thermiques de l'observation de la présence de mammifères marins près de Hall Beach (Nt). Les observations représentent les connaissances à longueur d'année relatives aux espèces résidentes (source de données : Nunavut Coastal Inventory).

La variabilité interannuelle et les tendances à long terme de l'abondance des mammifères marins sont difficiles à évaluer à partir à la fois des connaissances inuites et de l'information scientifique. Des relevés exhaustifs sont effectués régulièrement sur les stocks préoccupants (p. ex. narvals, morses). Toutefois, pour les stocks moins préoccupants (p. ex. phoques annelés), aucun plan de rotation de relevés n'est en vigueur. Pour certains stocks de mammifères marins, plus de 10 ans se sont écoulés entre les évaluations de leurs populations (p. ex. béluga de la mer de Beaufort, béluga de l'Extrême-Arctique et morse de l'Extrême-Arctique). Les tendances actuelles des populations de mammifères marins sont pour la plupart inconnues dans l'Arctique canadien (annexe B). Les baleines boréales sont la seule population de cétacés résidents dont on sait qu'elle augmente en abondance (Schweder et coll., 2010), après des déclinis attribuables à des pratiques de pêche à la baleine historiques. Les seules autres tendances connues de mammifères marins portent sur les ours polaires, dont les populations sont stables dans le détroit de Davis, le bassin Foxe et le nord de la mer de Beaufort. La population dans le bassin Kane augmente, tandis que les populations au sud de la mer de Beaufort ainsi qu'au sud et à l'ouest de la baie d'Hudson semblent décliner (Durner et coll., 2018).

ÉTUDE DE CAS 12: Variabilité de l'écosystème dans le sud de la mer de Beaufort au Canada

Au cours des 15 dernières années, l'écosystème marin de la mer de Beaufort a suscité l'attention de nombreux chercheurs. La recherche administrée par le gouvernement fédéral, y compris le Programme d'études du milieu marin côtier du Nord (MPO 2003-2009), ArcticNet (2003 à ce jour), l'évaluation environnementale régionale de la mer de Beaufort (2011-2015) et l'évaluation actuelle des écosystèmes marins de la mer de Beaufort au Canada (EEM-MBC 2017), ont permis de générer des données biologiques de référence pour le milieu marin hauturier et commencent, pour la première fois, à produire une série chronologique de données biologiques associées aux caractéristiques physiques et chimiques des habitats. Les résultats indiquent une variabilité spatiale et interannuelle importante pour plusieurs composantes clés de l'écosystème, posant ainsi un défi lié à la détermination de la variabilité naturelle dans un environnement qui évolue lui aussi rapidement en raison des changements climatiques. Ce défi touche également d'autres régions de l'Arctique canadien parmi lesquelles plusieurs sont peu étudiées.

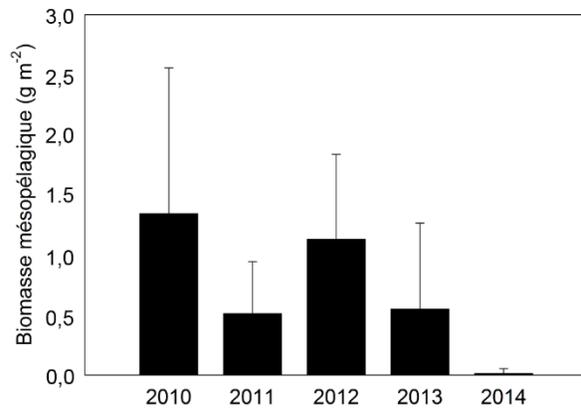


Figure 78. Biomasse mésopélagique de la morue polaire dans le sud de la mer de Beaufort canadienne calculée à partir de données hydroacoustiques (source : M. Geoffroy, données non publiées).

La morue polaire (*Boreogadus saida*) est un élément important de la base fourragère marine de la mer de Beaufort et joue un rôle important à la fois comme brouteur et comme proie des poissons, des phoques, des baleines et des oiseaux (Mueter et coll. 2016). Des relevés hydroacoustiques conjoints effectués à bord du navire de la Garde côtière canadienne *Amundsen* et du F/V *Frosti* entre 2010 et 2014 ont révélé une variabilité interannuelle importante de la biomasse de la morue polaire, tant pour les spécimens de moins d'un an (âge 0) que pour les spécimens adultes, et une forte diminution de la biomasse des morues adultes a été observée au cours de l'année d'échantillonnage 2014 (figure 78). Ce déclin a été précédé d'une baisse générale de l'abondance et de la biomasse de la morue d'âge 0 entre 2010 et 2013. Dans une analyse ultérieure, ces données ont été intégrées à des ensembles de données acoustiques provenant de l'ensemble de l'Arctique canadien et ont permis de déterminer que la biomasse de la morue d'âge 0 en août et en septembre était corrélée négativement à la semaine de débâcle et positivement à la température à la surface de la mer (Bouchard et coll. 2017), ce qui indique un contrôle ascendant pour certains niveaux trophiques, comme les poissons pélagiques.



Figure 79. Béluga ayant la bouche pleine de lançons (photo gracieusement fournie par Loseto et coll. 2018a).

Parallèlement à la faible biomasse de la morue polaire adulte dans la mer de Beaufort canadienne en 2014, des observations remarquables ont été faites dans d'autres secteurs de l'écosystème, y compris en régions côtières. Plus de 30 bélugas ont été capturés près d'Ulukhaktok, seul prélèvement de cette ampleur jamais enregistré pour cette communauté (Loseto et coll. 2018a). Les observations effectuées dans l'estuaire du Mackenzie et dans la baie Darnley dans le cadre des programmes de surveillance écologique indiquent que l'estomac des bélugas était généralement vide au moment du prélèvement (Harwood et coll. 2015b). Le régime alimentaire des bélugas de l'est de la mer de Beaufort a été principalement déduit d'études sur les biotraceurs (Loseto et coll. 2009), d'études sur l'utilisation de l'habitat menées pendant les expériences de marquage (Hauser et coll. 2017) et de relevés aériens (Hornby et coll. 2016, 2017). Toutes ces études montrent que la morue polaire est l'une des proies principales du béluga dans les eaux marines hauturières. Les bélugas capturés à Ulukhaktok en 2014 étaient les seuls à avoir de nombreuses proies dans leur estomac, mais ne semblaient pas se nourrir de morue polaire de façon substantielle. C'est plutôt le lançon (espèce *Ammodytes*) (figure 79) qui était la proie dominante observée dans les entrailles, avec le calmar (déduit par la présence de becs) et d'autres espèces de poissons dans une bien moindre mesure (Loseto et coll. 2018). Les bélugas capturés dans la région désignée des Inuvialuit en 2014 avaient un indice d'état corporel inférieur à celui des individus observés au cours des trois saisons précédentes, ce qui donne à penser que la variabilité annuelle des proies pourrait être associée à une variation interannuelle de l'état des bélugas (Choy et coll. 2017).

Les contenus intestinaux de l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) prélevés à Ulukhaktok en 2014 et en 2015 indiquent que le régime alimentaire de l'espèce peut être très variable et peut être lié à la disponibilité des proies préférées. Comme pour le béluga, le lançon était très répandu dans le régime alimentaire de l'omble chevalier, tout comme les amphipodes marins. Ces résultats contrastent avec les échantillons recueillis à Ulukhaktok en 1977 et en 1978, qui contenaient surtout de la morue polaire (E. Lea, données non publiées).

Les estimations de la production primaire sont aussi un indicateur de la variabilité interannuelle apparente de l'écosystème de la mer de Beaufort. Malgré une année de biomasse apparemment faible pour la morue polaire en 2014, et malgré des changements simultanés dans la distribution et le régime alimentaire des espèces de subsistance, la biomasse des producteurs primaires, qui est indiquée par les concentrations de chlorophylle *a*, a atteint des valeurs six fois plus élevées qu'en 2013 ou en 2017, l'accumulation de biomasse étant la plus élevée dans le sud-ouest de l'île Banks (C. Michel, données non publiées) (figure 80). Ces résultats indiquent que des ressources suffisantes étaient disponibles, du moins à l'échelle locale, pour soutenir une forte productivité secondaire.

Les observations et les résultats tirés de la saison des eaux libres de 2014 fournissent un exemple distinct de la variabilité interannuelle qui s'est produite à de multiples niveaux trophiques et qui a été observée tant au large qu'en milieu côtier. La variabilité influe sur les récoltes de subsistance de la région, entraînant ainsi des avantages et des incertitudes pour différentes collectivités (Loseto et coll. 2018a). Compte tenu du nombre limité d'années où des observations soutenues ont été effectuées dans l'écosystème de la mer de Beaufort canadienne, il n'est pas possible de désigner l'année 2014 à titre d'anomalie écologique. D'autres travaux sont nécessaires pour comprendre les facteurs des changements observés dans les écosystèmes même si l'on reconnaît que ces facteurs peuvent être à l'origine des changements survenus au cours des

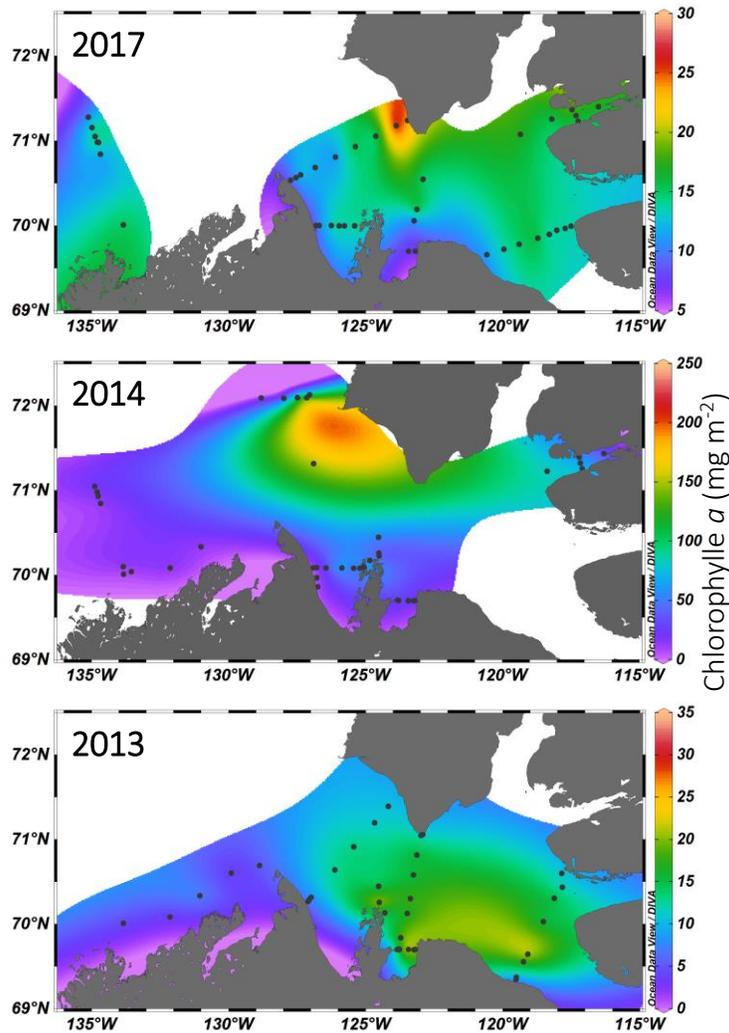


Figure 80. Concentrations de chlorophylle *a* dans la mer de Beaufort, intégrées pour la zone euphotique, en 2013, en 2014 et en 2017. Cartes créées avec Ocean Data View, Schlitzer, R., <https://odv.awi.de>, 2018.

saisons ou des années précédant la saison des eaux libres de 2014. On s'attend à ce que la variabilité et la survenance d'événements anormaux deviennent plus fréquentes à mesure que la planète se réchauffe (GIEC, 2014). Par conséquent, la surveillance écologique nécessaire pour comprendre les facteurs de variabilité de l'écosystème, y compris les couplages physiques et biologiques, est essentielle pour prévoir les effets locaux et en aval des changements climatiques dans la mer de Beaufort, ainsi que pour orienter les stratégies d'adaptation dans la région désignée des Inuvialuit (RDI).

ÉTUDE DE CAS 13 : Les interactions des écosystèmes influent sur la variabilité observée dans le nord de la baie d’Hudson – glace de mer, œufs et ours

Dans l’ensemble, la quantité totale de glace de mer et le nombre de jours de glace de mer solide dans le nord de la baie d’Hudson et le sud de la région de Baffin ont diminué entre 1988 et 2012 (figure 81). Dans la mesure où les périodes libres de glace sont plus longues, les ours polaires (*Ursus maritimus*) disposent de moins de temps pour capturer le phoque et ont du mal à satisfaire leurs besoins énergiques. Par conséquent, les ours polaires sont sept fois plus présents dans les colonies d’oiseaux marins (eider à duvet [*Somateria molissima*] et marmette de Brünnich [*Uria lomvia*]). Cette situation est attribuable à la modification du régime alimentaire des ours, qui se tournent vers les œufs des oiseaux marins pour répondre à leurs besoins nutritionnels (Iverson et coll., 2014).

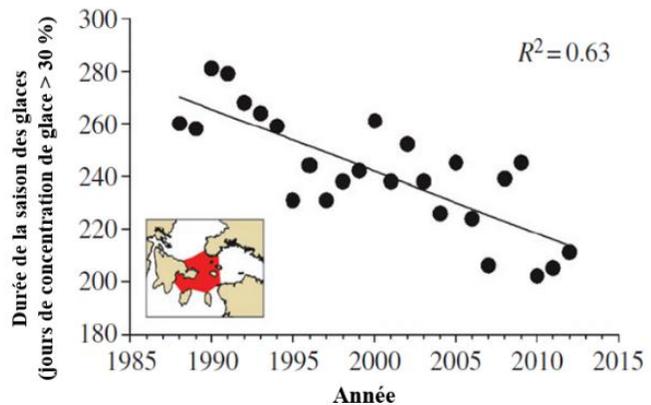


Figure 81. Diminution de la durée de la glace de mer dans le nord de la baie d’Hudson de 1988 à 2012 (source : Iverson et coll., 2014).

L’état des glaces devrait continuer à changer, et les effets négatifs sur les ours polaires et les oiseaux marins devraient également se poursuivre. Des travaux de modélisation ont été effectués, qui intègrent les connaissances inuites sur la situation des ours au fil du temps et les événements de prédation dans les colonies d’oiseaux marins avec des données empiriques sur le terrain.

Les modèles utilisent le comportement alimentaire des ours polaires et la réaction à la pression de prédation sur les eiders à duvet pour prédire les effets de la perte continue de glace de mer. Ces modèles ne reproduisent pas seulement les résultats empiriques obtenus par Iverson et coll. (2014), qui indiquent qu’à mesure que la glace de mer diminuera, les ours polaires recourront davantage

aux œufs d’oiseaux marins pour se nourrir (Dey et coll., 2017). Ils montrent également que l’état corporel de l’ours polaire pendant la période libre de glace continuera de décliner chaque année au sein de la population (figure 82). En réponse à la prédation croissante, les eiders à duvet migreront plus près des zones continentales avec une plus grande dispersion des nids. Ces réactions comportementales des eiders à duvet pourraient augmenter l’exposition des oiseaux

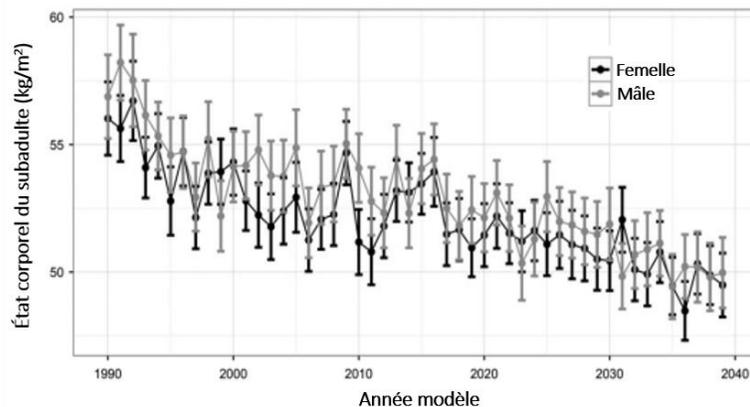


Figure 82. Au fil des ans, on prévoit un déclin de l’état corporel des ours polaires au stade subadulte, tant chez les mâles que chez les femelles (source : Dey et coll., 2017).

aux prédateurs terrestres (p. ex. le renard arctique [*Vulpes lagopus*]) et avoir une incidence sur les ressources des peuples autochtones qui récoltent les œufs et le duvet des eiders.

Bien que les changements de la glace de mer puissent avoir des effets négatifs sur le comportement de nidification des eiders à duvet, les changements climatiques pourraient également augmenter la propension à la reproduction et la taille des couvées chez les eiders femelles, entraînant un effet positif sur la taille de la population grâce à un accès aux ressources pendant une plus longue période et à l'amélioration de leur état corporel et à l'augmentation de leur activité de reproduction (Dey et coll., 2018). Toutefois, en raison de l'augmentation des taux de prédation par les ours polaires, la taille de la population des eiders à duvet devrait demeurer stable sur une période de 50 ans (figure 83).

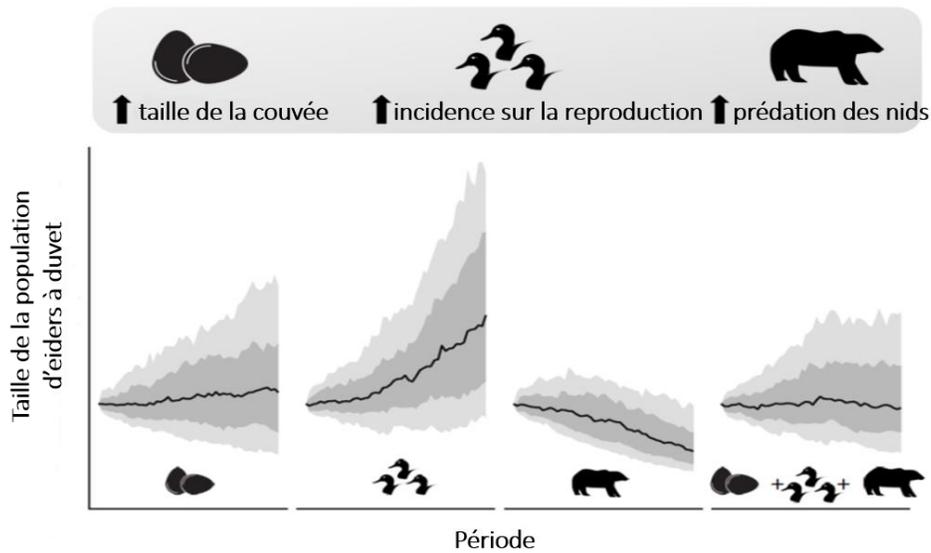


Figure 83. Effets multiples des changements climatiques sur les eiders à duvet (adapté de Dey et coll., 2018).

6.0 Connexions de voisinage

Différentes unités de mesures permettent de suivre les connectivités entre les océans et à l'intérieur des océans. Les unités de mesures couramment utilisées pour décrire la connectivité physique comprennent les masses d'eau, le carbone et les nutriments. Les espèces très mobiles et migratrices, qui se déplacent dans l'Arctique canadien et y entrent et en sortent, décrivent la connectivité biologique. La connectivité biologique montre comment l'Arctique canadien procure des services essentiels aux écosystèmes des autres océans. Il est nécessaire de comprendre les connexions physiques et biologiques pour mesurer l'accumulation et le recyclage de l'énergie dans les écosystèmes, y compris la production importée et la production locale. Les sections qui suivent traitent des traceurs physiques et biologiques de la connectivité et montrent comment la présence et la colocalisation des espèces peuvent déterminer les connexions existantes et en évolution qui influent sur les modes de fonctionnement des écosystèmes.

6.1 Flux entrants et sortants

Les couches des masses d'eau dans l'Arctique sont illustrées à la section 4.1.3 – Eau arctique au-dessus, suivi de l'eau du Pacifique et de l'eau de l'Atlantique en-dessous. La section 4.1.3 offre également un aperçu de la circulation générale de ces masses d'eau autour de l'Arctique, en montrant comment les trois océans du Canada sont connectés les uns aux autres. Les eaux en provenance du Pacifique suscitent un intérêt particulier en raison de leur richesse en nutriments dissous.

Les eaux du Pacifique atteignent l'Arctique par le détroit de Béring, en suivant une pente de la surface de la mer descendante vers le nord. Le vent dominant ralentit l'afflux, plus fortement en hiver qu'en été. Au-delà du détroit, le flux diverge pour suivre plusieurs voies sur le plateau de Tchoukche peu profond avant de se glisser dans le bassin arctique plus en profondeur entre les eaux de l'Arctique moins salines et les eaux de l'Atlantique plus salines. Le flux s'étend ensuite dans le centre de l'Arctique pour former une vaste masse d'eau dans la colonne d'eau de mer allant jusqu'à la dorsale Lomonosov près du pôle Nord.

Deux voies s'ouvrent pour les eaux du Pacifique qui quittent l'Arctique. L'une passe près de l'extrémité nord du Groenland pour rejoindre le courant groenlandais de l'Est dans le détroit de Fram, contournant ainsi les eaux canadiennes; l'autre traverse le nord du plateau polaire canadien par des chenaux entre les îles de la Reine-Élisabeth ou par le détroit de Nares. L'eau ne rencontre aucun obstacle par la voie du Groenland. Toutefois, les seuils aux eaux peu profondes limite le flux sortant par le plateau polaire canadien à des profondeurs de 80 m à 220 m, selon la voie.

Les observations révèlent que le débit de sortie des eaux du Pacifique par diverses voies varie au fil du temps. Les données présentées à la section 5.2.3 indiquent qu'une diminution du débit des eaux qui traversent l'Arctique canadien dans le détroit de Lancaster dans les années 2000 a été compensée par une augmentation du débit dans le détroit de Nares. On soupçonne des modèles de compensation semblables dans les flux sortants de l'est du Groenland. L'analyse statistique des fluctuations du débit dans le détroit de Lancaster met en cause la variation de la force du tourbillon de Beaufort (voir la discussion sur l'oscillation de l'océan Arctique à la section 5.2). En résumé, les nutriments des eaux du Pacifique atteignent les eaux canadiennes à des taux

changeants, par des voies changeantes et probablement après des délais variables à partir de leur entrée dans le détroit de Béring. Ces facteurs variables contribuent probablement à la variation interannuelle des niveaux de nutriments dissous et de la productivité des écosystèmes dans les eaux de l'Arctique canadien.

6.2 Nutriments : sources, diminution et effets en aval

La connexion étroite entre les eaux de l'Arctique canadien et les eaux provenant du Pacifique a plusieurs conséquences sur la disponibilité des nutriments et la productivité biologique. Dans les zones à teneur minimale en oxygène du Pacifique Nord, la dénitrification des colonnes d'eau et, dans une moindre mesure, l'oxydation anaérobie de l'ammonium, résultent de la décomposition de la matière organique produite par la remontée des nutriments le long de la partie est de la marge du Pacifique. Ces processus microbiens génèrent un déficit d'azote, qui est renforcé par la dénitrification des sédiments à mesure que les eaux s'écoulent au nord dans les mers de Béring et des Tchouktches, et maintient une productivité biologique relativement faible dans les zones côtières connectées de l'Arctique et du Canada atlantique (Tremblay et coll., 2015). L'indice de suffisance en azote illustré à la figure 84 montre la manière dont l'Arctique canadien est influencé par cette connectivité à grande échelle et que l'azote disponible permet à une petite fraction du phosphore disponible d'être consommée par le phytoplancton. Nous manquons cruellement de connaissances sur la réponse actuelle ou future de dénitrification et, plus généralement, du bilan azote en réaction au réchauffement et à la perte de glace de mer, et les conséquences de cette réponse sur les écosystèmes marins de l'Arctique canadien.

Malgré la dénitrification et le déficit relatif de nitrate par rapport à d'autres nutriments dans les eaux provenant du Pacifique, les remontées d'eau dans le Pacifique Nord entraînent l'injection de quantités considérables de nutriments dans la mer des Tchouktches peu profonde. Dans la couche supérieure de 50 m, les apports de nitrate dans l'océan Arctique par la mer de Béring sont près de 20 fois plus importants que par l'Atlantique Nord dans la même couche de profondeur (Tremblay et coll., 2015). Ces nutriments empruntent deux voies principales pour atteindre l'Arctique canadien (Anderson et coll., 2013). L'une d'elles apparaît avec la convection de l'eau d'hiver pendant le refroidissement et la formation de glace sur la mer des Tchouktches. En l'absence d'une production primaire importante, la formation d'eau dense peut entraîner l'eau riche en nutriments vers le bas et en dehors du plateau pour préserver la couche halocline supérieure dans l'ensemble de la mer de Beaufort. L'autre est le produit de l'approvisionnement en nutriments reminéralisés qui suit la décomposition de la matière organique produite par les algues sur le plateau pendant l'été (Granger et coll., 2018). Ces nutriments s'accumulent dans la couche halocline, se propagent vers l'Arctique canadien et maintiennent un taux maximum de nutriments à mi-eau, où la concentration de phosphate est de $0,8 \mu\text{m}$, comme le montre la figure 84. Ce maximum est essentiel à la productivité des couches de phytoplancton sous-surface et à l'injection de grandes quantités de nutriments à la surface pendant les remontées d'eau épisodiques (Tremblay et coll., 2011). Toutefois, nous connaissons mal la sensibilité climatique de l'halocline et des processus à distance qui génèrent les taux maximums de nutriments contenus dans cette couche.

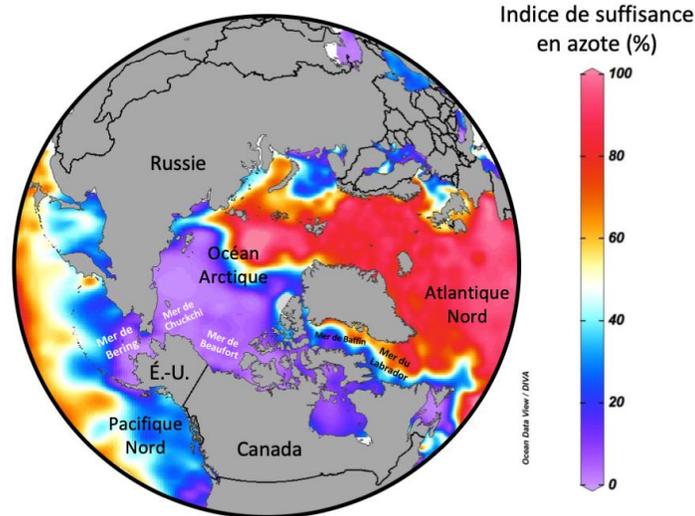


Figure 84. Vision à grande échelle de l'indice de suffisance en azote à une profondeur où la concentration de phosphate est de $0,8 \mu\text{m}$. Les faibles valeurs correspondent aux endroits où l'azote disponible limite la production primaire potentielle. Une valeur de 100 % indique que le phytoplancton dont le besoin N/P est de 16 dispose de suffisamment de nitrate pour consommer tout le phosphate disponible. La trajectoire des eaux à faible indice de suffisance en azote provenant du Pacifique dans l'Arctique canadien est clairement visible (nuances bleues et mauves). Les données proviennent de la World Ocean Data Base (WOD) (Boyer et coll., 2013) et des expéditions ArcticNet (Tremblay et coll., 2015) et couvrent la période de 1928 à 2017, la plupart des données ayant été obtenues entre 1985 et 2005. La répartition des indices de suffisance en azote devrait donc être considérée comme une climatologie plutôt que comme un instantané à n'importe quel moment dans le temps. L'indice de suffisance en azote est calculé en multipliant les concentrations de nitrate observées par 100 et en les divisant par les concentrations de phosphate observées multipliées par 16 (rapport nitrate/phosphate moyen mondial du phytoplancton).

Les concentrations de tous les nutriments, et celles du phosphate et du silicate en particulier, ont diminué dans les eaux qui quittent l'Arctique par l'ouest de la mer du Labrador et le nord de la baie de Baffin (Hátún et coll., 2018; P. Coupel, données non publiées), ce qui a une incidence négative sur la productivité (Bélangier et coll., 2013; Bergeron et Tremblay, 2014) et les grandes diatomées (Blais et coll., 2017). Ces tendances des nutriments ne peuvent pas être entièrement expliquées, mais semblent résulter d'une stratification verticale plus importante (Peralta-Ferriz et Woodgate, 2015), de changements éloignés « en amont » dans le transport des nutriments provenant des océans Pacifique Nord ou Atlantique (Woodgate et coll., 2012) et de modifications biogéochimiques (Tremblay et coll., 2015).

Dans les eaux provenant du Pacifique Nord, les oscillations climatiques régionales transmettent des périodicités importantes aux concentrations des nutriments de surface (Di Lorenzo et coll., 2009; Yasunaka et coll., 2016). Toutefois, lorsque cet effet est supprimé des données, une série chronologique pour la période de 1961 à 2012 indique des concentrations de nitrate stables et une tendance à la baisse pour le phosphate et le silicate (Yasunaka et coll., 2016). Ceci s'explique par une réduction du mélange vertical et, pour le nitrate, par un apport d'azote compensatoire par dépôt atmosphérique (Yasunaka et coll., 2016). L'intensification de la dénitrification dans le Pacifique-Arctique pourrait expliquer le léger déclin du nitrate dans la mer du Labrador et dans le nord de la baie de Baffin, mais pas les changements concomitants des

autres nutriments et de la suffisance en azote. Ce changement correspond à la tendance négative des concentrations de phosphate et de silicate dans le Pacifique Nord, mais peut également découler d'une diminution de l'apport des eaux du Pacifique par rapport à celles de l'Atlantique au flux de l'Arctique. Cette diminution concorde avec la présence accrue d'eaux provenant de l'Atlantique dans le nord de la baie de Baffin le long de la côte du Groenland. Parmi les conséquences probables pour les régions « en aval », mentionnons la réduction de la productivité biologique dans les principales zones de pêche de l'est du Canada et des apports de nutriments dans le tourbillon subpolaire (Hátún et coll., 2017) et le centre de la mer du Labrador où se forment les eaux profondes (P. Coupel, données non publiées).

6.3 Habitudes de déplacement des poissons marins et connectivité

Contrairement aux nouvelles connaissances sur les traceurs physiques de la connectivité à l'échelle des océans (sections 6.1 et 6.2), la plupart des nouvelles connaissances sur la connectivité biologique sont locales ou régionales. La télémétrie acoustique et satellitaire a permis d'étudier les déplacements des poissons marins de l'Arctique. Des espèces d'eau profonde, en particulier le flétan du Groenland (Barkely et coll., 2018), la laimargue atlantique (*Somniosus microcephalus*, Hussey et coll., 2018) et la raie arctique (*Amblyraja hyperborean*, Peklova et coll., 2014), ont été marquées à divers endroits dans l'est de l'Arctique canadien, y compris : baie Cumberland, Île Scott, large de l'île Broughton, détroit de Jones, détroit de Tremblay, détroit d'Éclipse, inlet Pond et des endroits au large des côtes dans la baie de Baffin et le détroit de Davis. Des poissons plus petits, y compris la morue polaire, le saïda imberbe (*Arctogadus glacialis*) et les chabots, ont été marqués dans des zones côtières. Les déplacements des poissons portant des étiquettes acoustiques ont été suivis pendant des périodes allant de plusieurs mois (poissons plus petits) à environ 5 ans (flétan du Groenland et laimargue atlantique). Le flétan du Groenland est également marqué avec des étiquettes en plastique externes portant un numéro unique (étiquettes Floy) pendant les relevés annuels dans la baie Cumberland et la baie de Baffin. Les étiquettes Floy inertes exigent qu'un poisson soit recapturé pour offrir des données sur les habitudes de déplacement ou la connectivité, mais elles sont beaucoup moins coûteuses que les étiquettes électroniques, ce qui permet de marquer un plus grand nombre de poissons chaque année, et ne sont pas limitées par la couverture de glace ou l'autonomie des piles (bien qu'elles puissent se briser ou être perdues avec le temps).

Les habitudes de déplacement du flétan du Groenland sont particulièrement intéressantes en raison de son double rôle de prédateur marin et de proie des mammifères marins dans l'écosystème et de la valeur de la pêche commerciale du flétan du Groenland au Nunavut et au Canada. Peklova et coll. (2012) ont utilisé des étiquettes satellites enregistreurs détachables pour étudier les habitudes de déplacement du flétan du Groenland dans la baie Cumberland en lien avec la température de l'eau, le cycle diurne et la date. Aucune tendance diurne dans l'utilisation de l'habitat (c.-à-d. la profondeur) n'a été observée, mais la profondeur préférée a changé entre les saisons ainsi que la température ambiante de l'eau qui a légèrement changé (> 2,3 °C de septembre à novembre; de 1,8 à 1,9 °C de février à avril). Hussey et coll. (2017) ont examiné de plus près les habitudes de déplacement du flétan du Groenland dans la baie Cumberland à l'aide d'étiquettes télémétriques acoustiques et ont constaté que des facteurs biotiques et abiotiques influent sur les déplacements du poisson. Le flétan du Groenland s'est déplacé de façon saisonnière entre les régions sud et nord de la baie Cumberland en réaction aux changements de

la température de l'eau, des niveaux d'oxygène dissous et de la couverture de glace de mer. Barkeley et coll. (2018) ont marqué le flétan du Groenland dans l'île Scott avec des étiquettes télémétriques acoustiques et suivi les poissons individuellement pendant une année afin d'évaluer l'utilisation de l'habitat local et la connectivité entre le stock de flétan du Groenland du fjord et le stock hauturier dans la baie de Baffin. L'analyse des données a permis de classer la plupart des flétans du Groenland dans deux catégories de déplacement distinctes. La plupart des poissons marqués ont été détectés dans le système (fjord et baie de Baffin) étudié après le marquage, mais se sont déplacés dans des eaux du large plus profondes à la fin de novembre lorsque la glace de mer a commencé à se former (n = 47; 72 %). Un deuxième petit groupe de poissons est demeuré dans le système après le marquage, s'est déplacé au large en même temps que les autres poissons, puis est revenu dans le système du fjord pendant l'hiver après la formation de la glace de rive (n = 8; 12 %). Des flétans du Groenland marqués avec les étiquettes Floy dans la baie Cumberland et la baie de Baffin ont été recapturés sur les Grands Bancs et au large de la côte ouest de l'Islande deux ans ou plus après leur remise à l'eau, ainsi que dans l'est de l'Arctique canadien (K. Hedges, données non publiées). Les flétans du Groenland marqués d'une étiquette Floy recapturés ont révélé des déplacements beaucoup plus grands que ceux documentés avec les étiquettes télémétriques satellitaires ou acoustiques, mais ce phénomène est probablement attribuable au plus grand nombre de poissons marqués d'une étiquette Floy, à l'autonomie limitée des piles des étiquettes satellites (les longs déploiements ont duré environ 1 an) et à la dépendance des étiquettes acoustiques à une infrastructure pouvant détecter les transmissions des étiquettes (p. ex. les récepteurs acoustiques amarrés).

Les habitudes de déplacement de la laimargue atlantique sont également très intéressantes; cette espèce est un prédateur de premier plan dans les écosystèmes marins de l'Arctique et une prise accessoire des pêches hauturière et côtière du flétan du Groenland. Hussey et coll. (2018) ont utilisé une nouvelle application d'étiquettes satellites pour suivre les déplacements des laimargues atlantiques, qui a permis de déterminer plusieurs lieux par individu (habituellement, seulement deux lieux sont déterminés pour les poissons d'eau profonde : le lieu de marquage et le lieu de récupération de l'étiquette) et ont révélé une migration orientée de l'Extrême-Arctique canadien (détroit de Jones) vers le nord-ouest du Groenland jusque-là inconnue. Les données de suivi récentes montrent une plus grande connectivité et que les caractéristiques océanographiques, comme les seuils, ne sont pas des obstacles complets au déplacement des poissons, comme on le croyait auparavant.

6.4 Connectivité et concurrence

À mesure que le réchauffement se poursuit, les aires de répartition du phoque annelé et du phoque du Groenland devraient se chevaucher, ce qui pourrait entraîner une nouvelle concurrence entre les deux espèces (Ogloff et coll., 2019). Cette concurrence se produira à mesure que la répartition des phoques du Groenland s'étendra vers le nord de la région de l'Atlantique à la région de l'Arctique. Les phoques du Groenland ont besoin de la banquise pour se reposer, pour mettre bas et pour nourrir leurs petits, et une diminution de la banquise saisonnière dans le Canada atlantique pourrait forcer les phoques du Groenland à s'adapter en se déplaçant vers le nord, réponse qui pourrait être renforcée par des changements dans leur proies de base (Hammill et coll., 2005). Les phoques du Groenland dans les eaux de Terre-Neuve semblent cibler le capelan et pourraient synchroniser leur migration vers le nord avec la saison

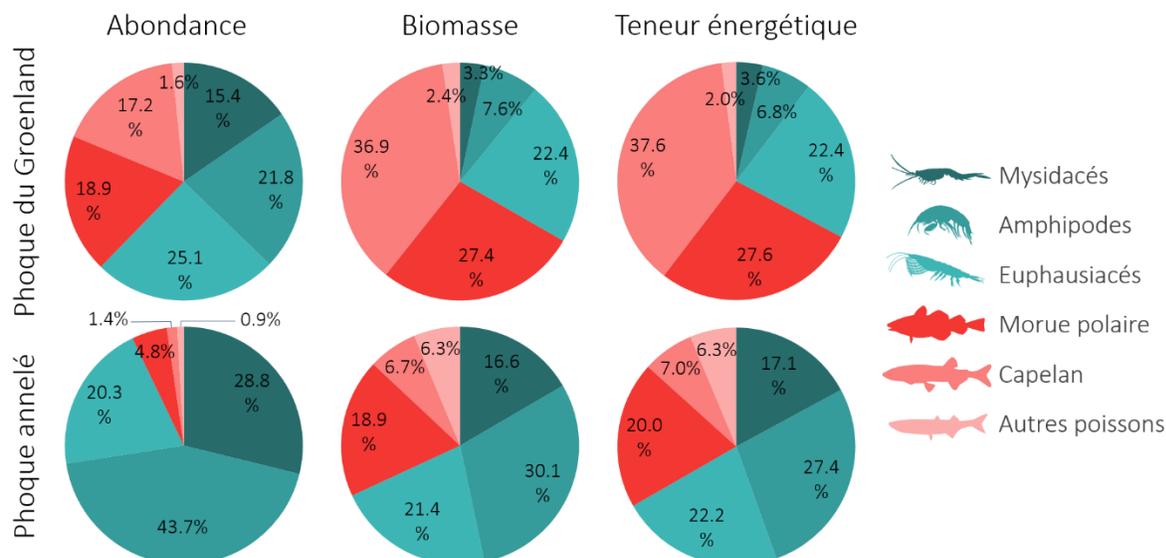


Figure 85. Composition moyenne en pourcentage des proies fréquemment présentes dans l'estomac des phoques annelés (n = 65) et des phoques du Groenland (n = 18) capturés dans la baie Cumberland de 2008 à 2016 pendant la période des eaux libres. Les phoques de tous les âges sont regroupés. Le pourcentage de composantes du régime alimentaire fréquemment présentes est indiqué en fonction de l'abondance moyenne (par nombre), de la biomasse sèche moyenne et du contenu énergétique moyen (source : adapté d'Ogloff et coll., 2019).

du frai du capelan pour maximiser leur consommation de ce poisson (Beck et coll., 1993). En revanche, la morue polaire semble être un pilier du régime alimentaire des phoques annelés dans la région de l'Arctique canadien, et les preuves s'accumulent selon lesquelles la morue pourrait y être moins présente dans les environnements subpolaire en raison des changements environnementaux (Gaston et al. 2003). Des études récentes sur le régime alimentaire (figure 85) des phoques dans la baie Cumberland indiquent que même si les phoques du Groenland consomment beaucoup des mêmes proies que les phoques annelés, les phoques du Groenland ont tendance à consommer des poissons plus gros que les phoques annelés, probablement en raison de différences de taille corporelle et de capacité de plongée (Wathne et coll., 2000; Ogloff et coll., 2019). Actuellement, les preuves manquent pour envisager une concurrence directe entre les phoques annelés et les phoques du Groenland dans la baie Cumberland, bien que les similitudes de leur régime alimentaire laissent croire qu'ils pourraient se faire concurrence dans le futur si les changements dans leur proies de base persistent.

6.5 Migrations des oiseaux marins – Matières océaniques multiples

L'étude du cycle annuel complet d'un organisme joue un rôle essentiel pour comprendre comment les effets des comportements et des conditions environnementales se répercutent entre les saisons, en particulier dans un contexte de changement de l'état des glaces et d'augmentation des activités humaines. Pour documenter les déplacements annuels des oiseaux marins qui nichent près de l'île de la baie de l'Est, dans l'est de l'Arctique canadien, de multiples techniques de suivi sont utilisées selon les différentes espèces, y compris la télémétrie satellitaire pour les eiders à duvet et les eiders à tête grise (*Somateria spectabilis*) et des dispositifs GPS pour les goélands argentés. En appui à leur reproduction, ces espèces migrent vers et depuis leurs sites de

reproduction, pour accéder à d'abondantes ressources alimentaires dans l'Arctique. En particulier, les eiders se nourrissent de proies benthiques, et les goélands dans les zones intertidales, dont la disponibilité et la superficie augmentent respectivement quand la glace arctique fond et se brise au début du printemps.

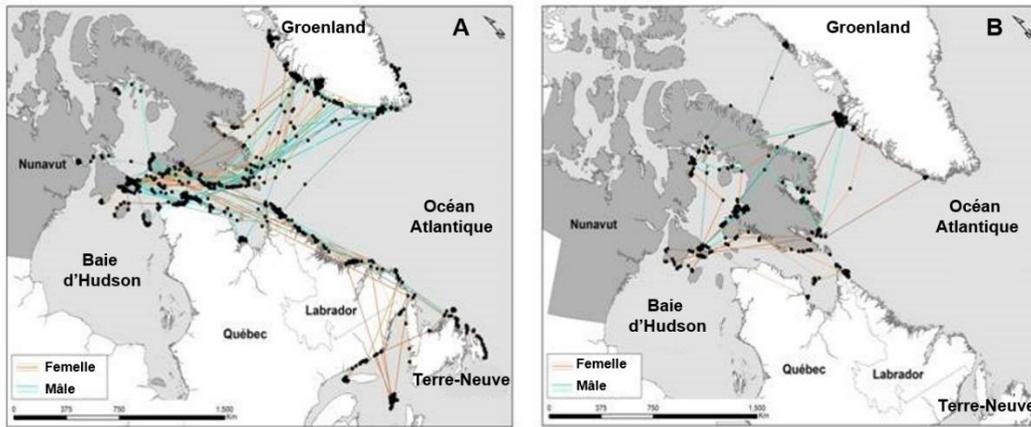


Figure 86. Mouvements migratoires annuels (migration automnale vers les aires d'hivernage, vers le Groenland ou vers le Sud) des eiders à duvet (A) et des eiders à tête grise (B), mâles et femelles. Chaque couleur représente un individu distinct. (source : F. Jean-Gagnon, données non publiées).

Malgré la présence d'eiders à duvet et d'eiders à tête grise dans la baie de l'Est se reproduisant dans la même colonie, les espèces et les individus présentent des différences importantes en ce qui concerne leurs décisions, leurs stratégies et leurs voies migratoires (figure 86). Le mouvement migratoire des eiders à tête grise est plus lent que celui des eiders à duvet, chaque individu mettant plus de temps pour se rendre sur son aire d'hivernage car la majorité d'entre eux migre au Groenland pendant les mois d'hiver avant de revenir dans l'Arctique canadien pour se reproduire (F. Jean-Gagnon, données non publiées). Dans l'ensemble, les eiders à duvet nichent dans la colonie de la baie de l'Est à deux endroits : Groenland ou le long de la côte du Labrador et de Terre-Neuve (figure 86). Les oiseaux qui hivernent au Groenland ont tendance à rester au même endroit tout l'hiver, trouvant de l'eau libre dans les baies et les polynies, tandis que les oiseaux qui hivernent à Terre-Neuve-et-Labrador ont tendance à se déplacer vers le sud le long de la côte du Labrador à mesure que la glace de mer se forme, poussés plus loin vers le sud dans les eaux non gelées et les aires d'alimentation, avant de retourner dans les aires de reproduction au Nunavut au printemps.

Les goélands argentés qui se reproduisent dans l'Arctique migrent sur de longues distances pour passer l'hiver dans les habitats marins du golfe du Mexique (Anderson, 2017) (figure 87). Bon nombre des goélands argentés qui se reproduisent au Nunavut font des haltes automnales prolongées (19 à 101 jours) dans le détroit d'Hudson et le détroit de Foxe au début de leur migration, pour se préparer à voler sur de longues distances jusqu'à leurs prochaines escales; les oiseaux parcourent souvent 2 000 km ou plus en 3 jours. Les goélands ont manifesté des préférences pour les habitats côtiers, probablement parce qu'ils contiennent des sources d'aliments prévisibles et que la topographie côtière offre des possibilités d'envol économes en énergie. Cette information fournit une base de référence importante pour démontrer la connectivité de longue portée entre les océans. La compréhension de cette connectivité est

nécessaire pour examiner les effets potentiels des changements environnementaux à grande échelle et l'influence humaine sur les aires de reproduction dans l'Arctique et les aires d'hivernage à l'extérieur.

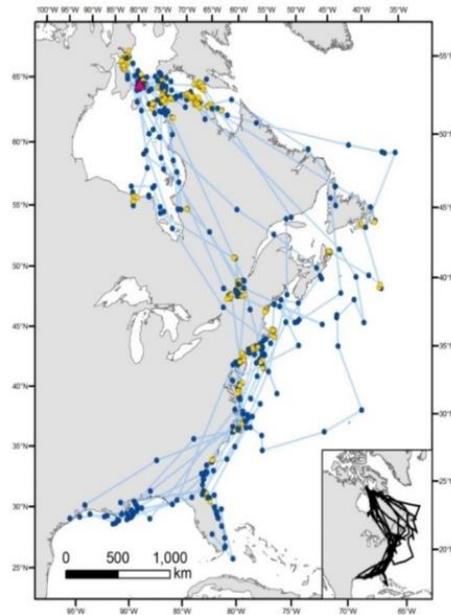


Figure 87. Mouvements migratoires vers le Sud (points bleus) et haltes migratoires (points jaunes) des goélands argentés qui nichent dans la baie de l'Est (source : Anderson, 2017).

ÉTUDE DE CAS 14 : Extension des aires de répartition et présence de nouvelles espèces

L'Arctique est de toute évidence une région isolée, intrinsèquement dynamique et extrêmement vaste, et certaines régions connaissent des changements rapides à l'égard de leur biodiversité qui ont des répercussions à la fois locales et mondiales. En effet, les changements climatiques sont actuellement la menace la plus importante pour la biodiversité de l'Arctique (CAFF 2013), car le Nord est perçu à la fois comme un havre de conservation mondial pour les espèces qui se déplacent vers le Nord (Yoon et coll. 2015) et comme un danger potentiel pour la conservation mondiale des espèces adaptées au froid dans un environnement en plein réchauffement (Reist et coll. 2006a). L'importance de l'évaluation de la biodiversité est ancrée dans la conciliation du potentiel émergent de l'Arctique avec la protection de son environnement, de ses espèces et de ses cultures autochtones.

Les espèces indicatrices pertinentes sur les plans biologique, culturel et économique fournissent de l'information pour évaluer les répercussions sur l'écosystème des changements environnementaux en cours dans l'Arctique. Ils servent également de guide pour la création de nouvelles possibilités. Toutefois, pour être un indicateur efficace de l'évolution de l'Arctique, les espèces doivent être sensibles aux changements environnementaux et refléter un changement survenu dans un laps de temps défini, détectable dans l'ensemble d'une région éloignée et supérieur à la variabilité ambiante, scientifiquement fondé, mais qui ne provient pas nécessairement de la science, et ayant un rapport direct avec des enjeux plus vastes (MPO 2015).

Le saumon du Pacifique (espèce *Oncorhynchus*) est un bon indicateur de changement parce qu'il a été désigné comme indicateur de l'état de l'océan (Irvine et Riddell 2007), qu'il réagit aux conditions environnementales changeantes (Grebmeier et coll. 2006; Dunmall et coll. 2013; Nielsen et coll. 2013), et qu'il peut être surveillé aux limites de son aire de répartition du Nord dans le cadre d'un programme de surveillance écologique par les collectivités (Dunmall et coll. 2013) (figures 88 et 89). La répartition des espèces de saumon peut refléter l'évolution des conditions environnementales à la fois directement parce que les poissons, en tant qu'ectothermes, maintiennent leurs préférences thermiques par des choix comportementaux (Reist et coll. 2006a), mais aussi indirectement en raison du lien qui existe entre une productivité accrue et la disponibilité des proies pour les espèces potentiellement colonisantes (Dunmall et coll. 2013). Bien que la présence du saumon en Arctique ne soit pas une nouveauté (examiné dans Nielsen et coll. 2013), les augmentations



Figure 88. Charlie Erigaktoak et Danny Gordon Jr. avec un saumon qu'ils ont pêché en 2016 à Shingle Point, au Yukon (crédit photo : Michelle Gruben).

actuelles de l'abondance et de la répartition du saumon dans cette région reflètent probablement des changements à plus grande échelle. Le saumon est un indicateur unique des liens entre les océans, les pays, les cultures, les économies et les écosystèmes.

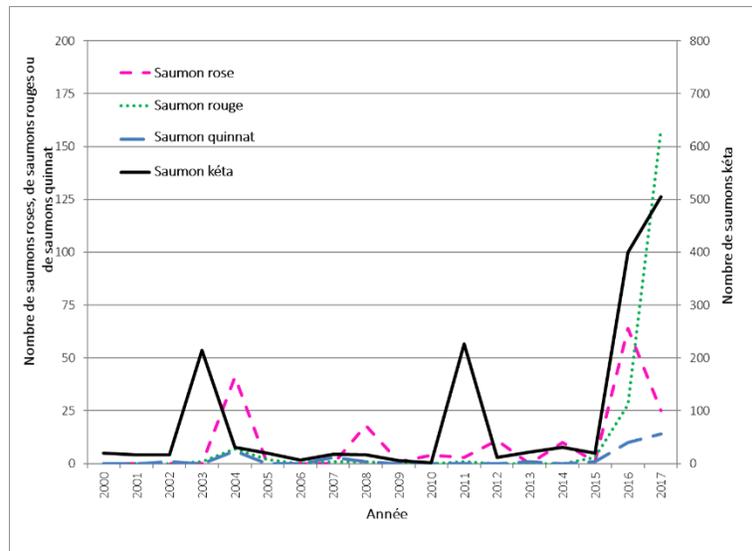


Figure 89. Nombre de chaque espèce de saumon du Pacifique obtenu par le programme de surveillance communautaire du saumon de l'Arctique auprès des pêcheurs dans l'ensemble de l'Arctique canadien de 2000 à 2017. Un seul saumon coho a été signalé au cours de cette période (en 2011); il n'est donc pas inclus dans le graphique (source : modifié de Dunmall et coll. 2018).

Les épaulards (*Orcinus orca*) représentent également la connectivité entre les océans du Canada et les changements qui s'y produisent. Dans l'est de l'Arctique canadien, les épaulards (figure 90) sont présents de façon saisonnière de juillet à octobre environ, lorsque les eaux libres leur permettent d'entrer dans les baies et les bras de mer pour chasser divers mammifères marins. Les observations d'épaulards ont augmenté au cours des dernières décennies dans toute leur aire de répartition, soit du nord de l'île de Baffin au sud de la baie d'Hudson (Higdon et Ferguson 2009; Higdon et coll. 2013). Bien que les épaulards soient répartis dans le monde entier et qu'ils soient présents en densités relativement hautes à des latitudes élevées, ils évitent généralement les régions glacielles de l'Arctique (Matthews et coll. 2011). L'augmentation récente des observations a été corrélée à des réductions simultanées de l'étendue et de la persistance de la glace de mer à des endroits où des zones auparavant couvertes de glace qui constituaient des obstacles s'ouvrent maintenant et permettent le passage des épaulards dans des zones où ils ont rarement, voire jamais été observés (Higdon et Ferguson 2009). Les Inuits de l'est de l'Arctique canadien ont signalé que la présence d'épaulards augmente dans toute la région (Higdon et coll. 2013). La baie d'Hudson, en particulier, a connu une augmentation presque exponentielle du nombre d'observations d'épaulards au cours des dernières décennies, alors que la région a connu des réductions radicales de l'étendue des glaces marines (Higdon et Ferguson 2009). Bien que les données sur les observations, qui ne sont pas recueillies lors d'enquêtes organisées, soient susceptibles d'être faussées en raison d'une sensibilisation accrue au signalement, il semble probable que la hausse du nombre d'observations reflète un changement de répartition, un nombre plus élevé d'individus ou une combinaison des deux.

Les conséquences de l'accroissement de la présence des épaulards et de la diminution de la glace de mer de l'Arctique ont fait l'objet de recherches à Pêches et Océans Canada (MPO) au cours de la dernière décennie. Les connaissances écologiques inuites et les rapports d'observations historiques qui portent sur des événements de prédation indiquent que les mammifères marins sont les principales proies, sinon les seules, des épaulards de l'Arctique (Hidgon et coll. 2013; Westdal et coll. 2016a). Les exercices de modélisation indiquent que la mortalité due à la prédation des épaulards pourrait être suffisamment élevée pour avoir une incidence sur d'autres populations de mammifères marins de l'Arctique (Ferguson et coll. 2012). D'autres études récentes menées par le MPO montrent que les effets négatifs de la prédation des épaulards vont au-delà de la mortalité directe des proies. Les épaulards, par exemple, ont une incidence importante sur le comportement et la distribution des narvals. En l'absence d'épaulards, les narvals préfèrent vivre en eaux libres et profondes, alors qu'en leur présence, ils préfèrent les zones littorales peu profondes (Breed et coll. 2017). Bien que ce comportement soit connu depuis longtemps des Inuits, cette étude est unique parce qu'elle montre que la réaction du narval est maintenue tant et aussi longtemps qu'il partage le bras de mer relativement grand avec les épaulards, et qu'elle persiste au-delà d'événements ponctuels de prédation. Le comportement de la baleine boréale (*Balaena mysticetus*) et le choix de l'habitat de la glace de mer sont également grandement influencés par la présence des épaulards. Les baleines boréales du golfe de Boothia préfèrent également un habitat en eaux libres en l'absence d'épaulards, mais elles se retirent rapidement sous la couverture de glace et près des rives en présence de tels prédateurs (C. Matthews, données non publiées). Encore une fois, le comportement a été observé à l'échelle du golfe pour toutes les baleines boréales marquées pendant toute la durée de leur présence. Cette réaction n'avait jamais été documentée à si grande échelle pour des vertébrés marins. Les changements prononcés liés au comportement et à l'utilisation de l'habitat des proies des mammifères marins de l'Arctique, qui sont entraînés par la présence des épaulards, pourraient se traduire par des effets coûteux non liés à la prédation, comme la perte de possibilités alimentaires ou un stress accru. Ces changements pourraient avoir un effet néfaste sur les populations de proies, et ces répercussions sont susceptibles d'être exacerbées par les changements climatiques (Breed et coll. 2017; C. Matthews, données non publiées).

L'extension prévue de l'aire de répartition des épaulards dans l'Arctique, cependant, n'est peut-être pas sans équivoque. Certes, les observations d'épaulards ont augmenté dans l'est de l'Arctique canadien, mais le nombre d'emprisonnements d'épaulards dans les glaces s'est lui aussi accru. Hidgon et Ferguson (2014) et Westdal et coll. (2016b) font état de plusieurs emprisonnements mortels d'épaulards dans l'est de l'Arctique canadien depuis le début des années 1950, ce qui est



Figure 90. Épaulard dans le détroit d'Éclipse, au Nunavut, à l'été 2018 (crédit photo : Maha Ghazal).

plus que le nombre d'événements semblables déclarés au cours du siècle dernier. Au cours du plus récent de ces événements, en 2016, on a observé des épaulards hivernant dans le sud-est de la baie d'Hudson, mais on les a retrouvés morts le printemps suivant. Matthews et coll. (2019) ont émis l'hypothèse selon laquelle les baleines seraient entrées dans la baie d'Hudson à la poursuite des bélugas l'été précédent, mais n'auraient pas réussi à en sortir avant la formation des glaces et seraient mortes de faim après avoir été incapables de satisfaire leurs besoins énergétiques pendant l'hiver. Les quatre décès confirmés à la suite de l'événement le plus récent, combinés aux décès causés par les précédents emprisonnements dans les glaces, représentent une portion importante de la population estimée d'épaulards dans l'est de l'Arctique canadien (Young et coll. 2011). L'emprisonnement de l'épaulard dans les glaces est presque toujours mortel, et peut anéantir des groupes familiaux entiers et avoir des incidences démographiques à long terme (Higdon et coll. 2013). L'emprisonnement dans les glaces pourrait donc ralentir l'expansion de l'aire de répartition des épaulards de l'Arctique, notamment dans les régions où les épaulards qui ne sont pas habitués à la configuration de la glace de mer ne parviennent pas à sortir avant la formation des glaces en hiver (Matthews et coll. 2019).

ÉTUDE DE CAS 15: Points chauds des mammifères marins : points focaux de transfert énergétique dans l'Arctique canadien

La quantification des attributs biogéographiques, comme les déplacements des prédateurs marins de l'Arctique et leur répartition, a d'importantes répercussions sur notre compréhension de la structure et du fonctionnement de l'écosystème arctique (Moore et Huntington 2008). Les prédateurs marins très mobiles (p. ex. les mammifères marins, les oiseaux de mer et les gros poissons) intègrent des ressources à de nombreuses échelles spatiales et temporelles et peuvent donc servir de sentinelles pour les zones à productivité élevée et les changements saisonniers dans des environnements très dynamiques comme l'Arctique (Boyce et coll. 2015). Il est difficile d'observer les animaux dans l'environnement dynamique du milieu marin arctique, mais l'utilisation de dispositifs de télémétrie animale a révolutionné notre compréhension de l'écologie du mouvement des espèces marines (Hussey et coll. 2015). Traditionnellement, les études de télémétrie sur les prédateurs marins de l'Arctique se sont concentrées sur une seule espèce ou quelques espèces, mais étant donné la quantité de données de télémétrie actuellement disponibles pour les prédateurs marins de l'Arctique, on peut maintenant quantifier les points chauds liées à la diversité des espèces et déduire l'emplacement des zones d'importance biologique supérieure (c.-à-d. des points chauds) pendant la période été-automne et hiver-printemps.

Une compilation des données existantes sur le suivi des animaux a été recueillie entre 1989 et 2016 pour 1 283 individus de 21 espèces marines arctiques emblématiques comprenant des cétacés, des pinnipèdes, des oiseaux de mer, des ours polaires (*Ursus maritimus*) et des poissons. Parmi les espèces emblématiques, on compte les bélugas (*Delphinapterus leucas*), les narvals (*Monodon monoceros*), les phoques annelés (*Pusa hispida*), les morses de l'Atlantique (*Odobenus rosmarus rosmarus*), les eiders à duvet (*Somateria mollissima*), les fulmars boréaux (*Fulmarus glacialis*), les marmettes de Brünnich (*Uria lomvia*) et les requins du Groenland (*Somniosus microcephalus*). Les points chauds se trouvaient généralement le long du plateau continental et du talus continental tout au long de l'été et de l'automne et se situaient généralement au large des zones connues de banquise en mouvement pendant l'hiver et le printemps, ce qui correspond généralement aux modèles de productivité saisonnière (figures 91 et 92). Ces déplacements présentent une connectivité saisonnière et une connectivité entre les chenaux d'énergie hauturiers et littoraux pendant la période hiver-printemps et été-automne, respectivement. Plus précisément, à l'ouest, les eaux riches en nutriments de l'océan Pacifique et de la mer de Béring s'écoulent vers le nord à travers le détroit de Béring et le sud de la mer des Tchoukches, ce qui accroît la biomasse faunique pélagique et benthique dans la région et le long du plateau continental et du méridien vers le Delta du Mackenzie (Grebmeier et coll. 2006). Au cours de l'hiver et du printemps, des points chauds ont été observées dans les zones situées à l'ouest de la polynie du cap Bathurst. Dans l'Est, l'île de Baffin se compose de nombreux fjords productifs en raison de l'augmentation de la teneur en carbone organique de la colonne d'eau (Syvitski et coll. 1990). Pendant l'hiver, les points chauds liées à la diversité des espèces étaient concentrées dans les zones de banquise mobile dense de la baie de Baffin et du détroit de Davis. Dans le Sud, les points chauds liées à la diversité des espèces coïncidaient avec les modèles de productivité du complexe de la baie d'Hudson (Harvey et coll. 2006). Les régions d'hivernage se trouvaient quant à elles à l'intérieur de la banquise en mouvement et dans les zones d'eaux libres du détroit d'Hudson. Dans l'ensemble, les points chauds de la période hivernale soulignent

l'importance écologique des polynies et des zones de banquise pour la structure et la fonction des écosystèmes arctiques (Stirling 1997). Ainsi, la détermination des zones où les densités de prédateurs sont les plus élevées fournit des renseignements essentiels pour comprendre la dynamique du transfert énergétique dans l'Arctique et démontre ainsi l'importance de la connectivité pour les efforts de conservation.

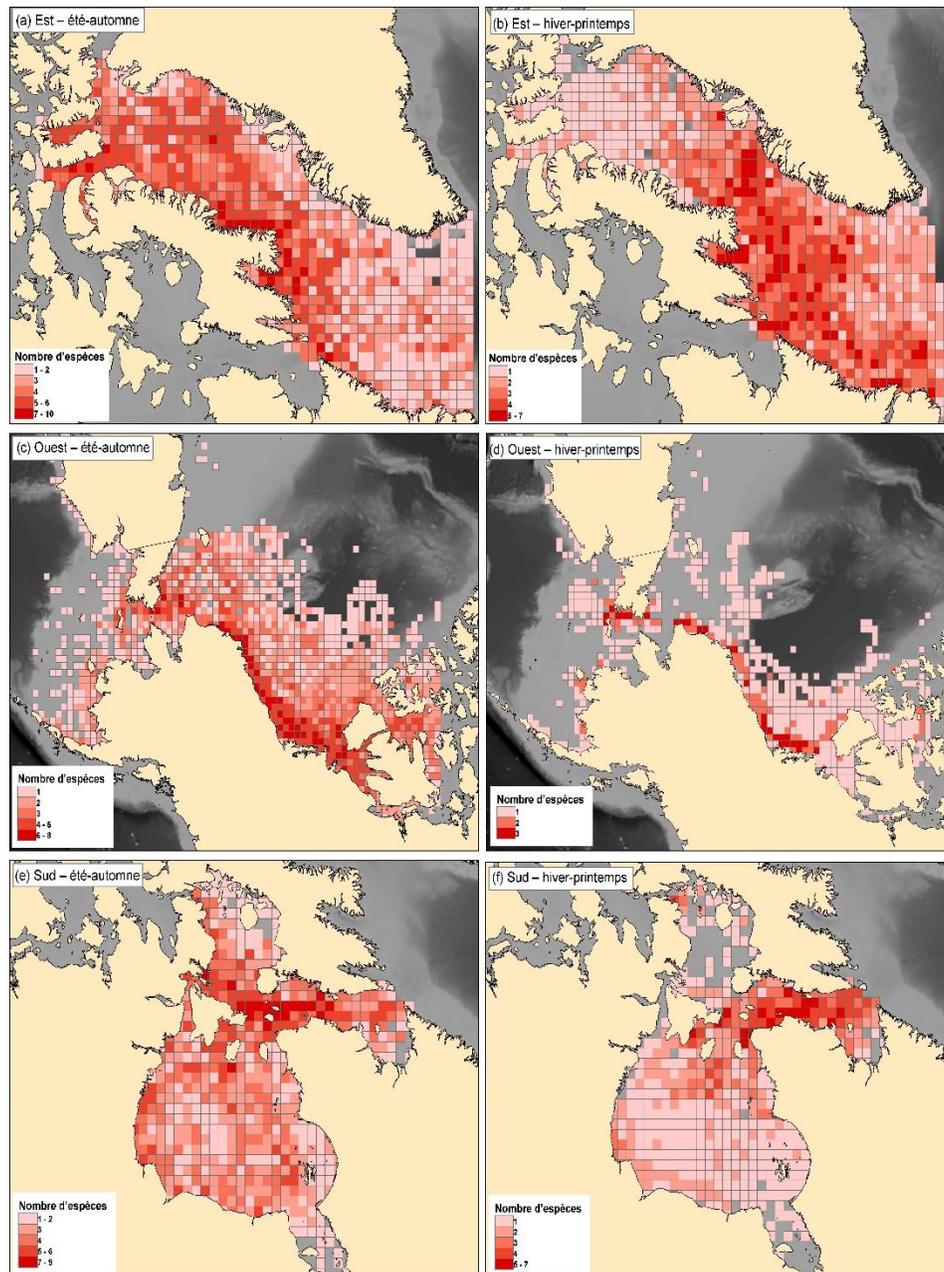


Figure 91. Répartition spatiale de la densité du nombre unique d'espèces sur 21 espèces par maille de grille de 50 km x 50 km dans chacune des trois zones géographiques pendant les périodes été-automne (a, c, e) et hiver-printemps (b, d, f). La légende de la période hiver-printemps est différente de celle de la période été-automne, et les légendes varient également entre chaque zone géographique (source : Yurkowski et coll., 2019b).

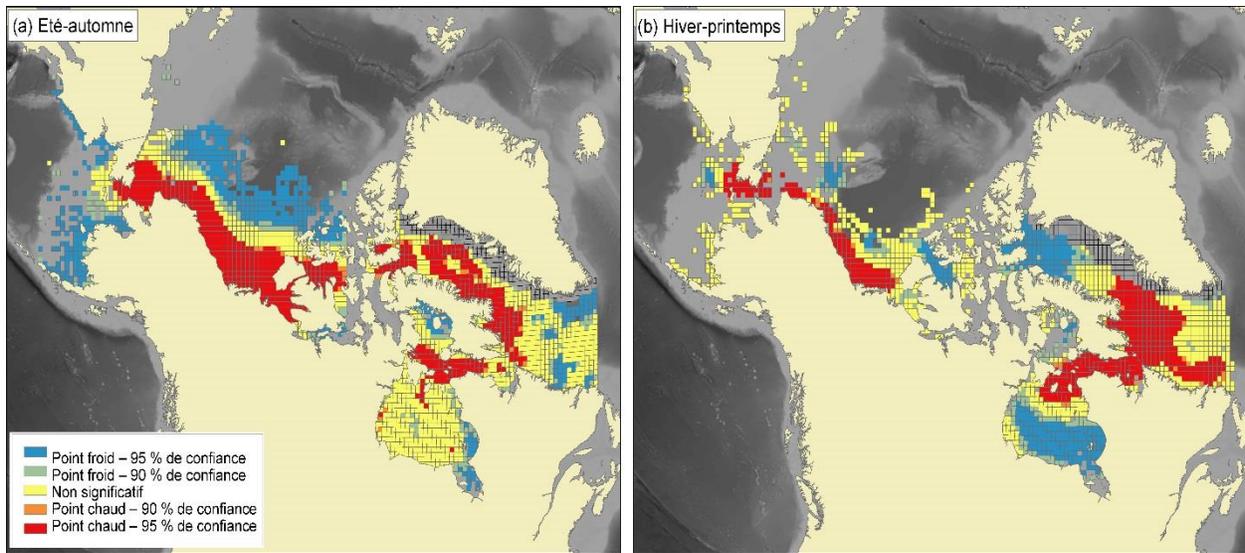


Figure 92. Points chauds (rouge) et points froids (bleu) de la diversité des espèces par période été-automne (a) et hiver-printemps (b) relativement à l'ensemble des espèces surveillées par maille de grille de 50 km x 50 km dans l'ensemble de la zone d'étude. Les mailles de la grille le long du plateau continental de l'ouest du Groenland ont été masquées en raison du nombre plus faible de lieux de marquage dans ces zones par rapport aux eaux canadiennes, ce qui réduit le niveau de confiance pour déterminer les points chauds et les points froids de la côte de l'ouest du Groenland (source : Yurkowski et coll., 2019b).

ÉTUDE DE CAS 16 : Association entre les dates de migration des bélugas et l'évolution des régimes des glaces révélée par les observations terrestres inuites

De tous les mammifères marins, le béluga (*Delphinapterus leucas*) est celui qui est le plus fréquemment chassé par les Nunavimmiuts (Inuits du Nunavik). Cette chasse de subsistance est une activité traditionnelle importante, qui se déroule principalement au printemps et en été, lorsque les populations de bélugas de l'ouest et de l'est de la baie d'Hudson migrent dans le détroit d'Hudson. L'observation de cette espèce présente donc un intérêt particulier. Depuis 1993, des détections terrestres d'observateurs inuits ont été enregistrées hebdomadairement dans plusieurs communautés, grâce auxquelles nous pouvons estimer les dates des migrations.

En même temps, d'importantes modifications du régime des glaces dans la baie d'Hudson et dans le détroit d'Hudson ont été associées aux changements climatiques, notamment une tendance à la débâcle précoce et à la prise des glaces tardive, en particulier depuis les années 1990 (Gagnon et Gough, 2005; Galbraith et Larouche, 2011; Kowal et coll., 2017; Andrews et coll., 2018).

Les relations possibles entre les dates de migration des bélugas et l'état des glaces dans le détroit d'Hudson ont été examinées en comparant leurs tendances relatives des 25 dernières années. On a défini les dates de migration comme le maximum du nombre d'animaux vus dans les communautés autochtones de Quaqtq et Kangiqsujuaq (figure 93). De meilleures données ont été obtenues à Kangiqsujuaq sur la migration du printemps et à Quaqtq sur la migration de l'automne. Les dates de débâcle et de prise de la glace dans les parties est et sud du détroit d'Hudson ont été calculées à partir des données hebdomadaires sur la couverture de glace fournies par le Service canadien des glaces.

Les régressions linéaires appliquées aux données sur la migration révèlent une tendance significative à une date de migration plus tardive en automne ($p = 0,021$) avec un décalage moyen de 10 jours par décennie. Quant à la migration printanière, elle a tendance à commencer plus tôt avec un décalage de 6 jours par décennie ($p = 0,016$). Les dates de migration du printemps suivent de près les dates de débâcle (figure 94), qui affichent un décalage semblable de 6 jours par décennie ($p = 0,006$). Par contre, les dates de prise des glaces ne montrent qu'une

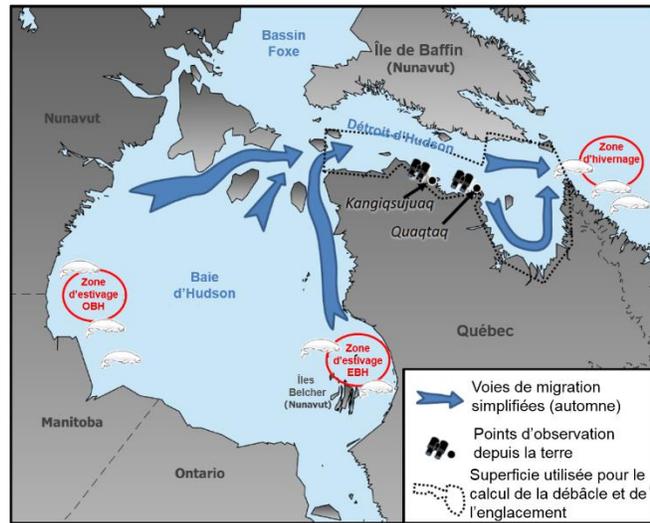


Figure 93. Lieu des sources d'observation terrestres (c.-à-d. les communautés inuites de Kangiqsujuaq et de Quaqtq) et zone prise en compte pour calculer les dates de débâcle et de prise des glaces. Les zones d'estivage et d'hivernage des bélugas sont également indiquées ainsi qu'une représentation simplifiée de leur route migratoire de l'automne (remarque : nous ne disposons pas d'information sur leur route migratoire du printemps). EBH et OBH désignent respectivement les bélugas de l'est de la baie d'Hudson et les bélugas de l'ouest de la baie d'Hudson.

légère tendance non significative à se produire plus tard dans l'année (+2 jours par décennie) avec une plus grande variabilité interannuelle au cours des dernières années. Avant 2008, la migration de l'automne avait généralement lieu plus de cinq semaines avant la date de prise des glaces. Toutefois, dans la mesure où les tendances de ces deux variables diffèrent, la migration de l'automne peut maintenant se produire plus près de la date de prise des glaces. Compte tenu des changements dans les dates de migration, les bélugas ont aujourd'hui tendance à passer moins de temps sur leurs aires d'hivernage et plus de temps sur leurs aires estivales.

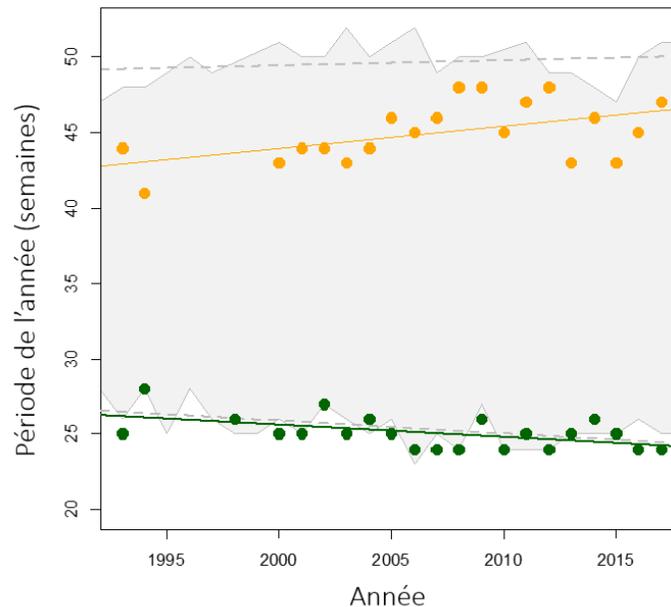


Figure 94. Tendances des dates des migrations du printemps (points verts) et de l'automne (points orange) du béluga dans le détroit d'Hudson et les dates de débâcle (ligne grise inférieure) et de prise des glaces (ligne grise supérieure). Les résultats des régressions linéaires sur cette série chronologique sont présentés sous forme de lignes pleines (données sur la migration) et de lignes pointillées (données sur la glace).

D'autres stocks de béluga dans l'Arctique, comme la population de la mer des Tchouktches, semblent également profiter d'une prise des glaces tardive pour rester plus longtemps sur leurs aires estivales. Cependant, la population de la mer de Beaufort avec laquelle cette population partage l'aire d'été ne semble pas modifier son comportement et conserve les mêmes dates de migration, peu importe l'évolution du régime des glaces (Hauser et coll., 2017a). Cette variabilité des stratégies de migration pourrait entraîner des effets importants sur la dynamique de population de ces stocks et déterminer leur devenir dans un environnement changeant.

La surveillance des tendances présentées ci-dessus joue un rôle essentiel dans l'évaluation des répercussions des changements climatiques dans l'Arctique, et la présente étude montre que les connaissances autochtones peuvent être un élément clé de la collecte de données à long terme nécessaires à la détection de ces répercussions.

7.0 Écosystèmes côtiers

Dans la présente section, nous examinons les écosystèmes côtiers situés généralement à moins de 5 km du rivage et/ou du côté côtier de l'isobathe de 20 m. Cette zone est très dynamique, car l'océan y rencontre la terre et les cours d'eau y rencontrent la mer. La glace et les vents se comportent différemment près du rivage que qu'en haute mer (glace de rive par rapport à banquise) et l'interface des eaux côtières et des eaux du large, ainsi que leur mélange, sont des processus clés qui influent sur la fonction des écosystèmes côtiers. Cette région peu profonde abrite 46 collectivités canadiennes situées le long du littoral (6 dans la région désignée des Inuvialuit, 15 au Nunavik et 25 au Nunavut) et constitue donc le domaine principal de la culture, de l'histoire et du mode de vie inuits (figure 95). Les sections qui suivent traitent des principaux processus côtiers qui mettent en lumière les changements dans cette zone côtière.



Figure 95. Inuit Nunangat, la patrie inuite, comprend quatre régions inuites : le Nunavut, le Nunavik, le Nunatsiavut et la région désignée des Inuvialuit. Environ 65 000 Inuits vivent dans des collectivités réparties dans l'ensemble de la région.

7.1 Connexion terrestre – Changements dans l'écosystème Beaufort-Mackenzie

À l'ouest de l'Arctique canadien, les changements terrestres touchent les environnements côtiers et marins. L'augmentation de la température de l'air, les changements dans les précipitations et les vents, et la fréquence accrue des précipitations extrêmes et des tempêtes côtières, influent sur le débit des rivières, l'érosion et le thermokarst (c.-à-d. affaissement du sol que provoque le dégel du pergélisol) (Ramage et coll., 2018). L'érosion et le dégel accéléré du pergélisol riche en glace modifie le paysage du delta du Mackenzie et des rives de la mer de Beaufort. Les taux

d'érosion ont plus que doublé dans de nombreuses régions côtières de la mer de Beaufort (Couture et coll., 2018) et l'ampleur et le nombre d'éboulements de fonte régressive – glissements de pente dus au dégel du pergélisol – continuent d'augmenter.

En 2012 et en 2013, l'érosion sur l'île Herschel et sur la côte du Yukon s'est avérée à peu près uniforme dans les zones de faible élévation, à un taux allant jusqu'à 20 m a^{-1} . En revanche sur les lignes de côte à élévation plus élevée, l'érosion s'est avérée très variable, les éboulements pouvant réduire l'érosion voire induire l'accroissement des rivages (c.-à-d. progradation) jusqu'à 40 m a^{-1} (Obu et coll., 2017). Sur la côte du Yukon en particulier, le nombre de glissements dus au dégel a augmenté de 73 % entre 1952 et 2011, déplaçant au moins $16,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ de matière, y compris la glace et les sols (Ramage et coll., 2018). L'érosion et les éboulements (figure 96) modifient l'environnement physique dans les zones côtières et mobilisent le carbone terrestre et d'autres nutriments. Selon les estimations récentes de Couture et coll. (2018), $0,17 \text{ Tg}$ de carbone organique en particules (POC) est généré par les processus côtiers de la mer de Beaufort canadienne (c.-à-d. érosion, éboulements, sans compter l'apport des rivières) chaque année. Cette estimation récente est presque trois fois plus élevée que les valeurs utilisées précédemment pour calculer le bilan du carbone organique (Rachold et coll., 2004).

Bien que l'apport de carbone organique issu des processus côtiers augmente dans l'ouest de l'Arctique canadien, la principale source de carbone organique terrestre pour l'écosystème marin demeure les rivières arctiques, en particulier le fleuve Mackenzie. Le flux de POC du fleuve Mackenzie, d'après les données recueillies jusqu'en 2012, est estimé à $0,758 \pm 66 \text{ Tg/a}$ (McClelland et coll., 2016). L'apport fluvial de sédiments et de carbone organique est important pour l'écosystème de la mer de Beaufort, car les effets s'étendent au-delà du littoral et atteignent le plateau et le talus. Entre 2003 et 2013, le débit d'eau douce du fleuve Mackenzie a connu d'importantes variations saisonnières ($4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ en hiver contre $25\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ en été) et interannuelles, et le débit d'eau douce a considérablement augmenté (de 22 %) (Doxaran et coll., 2015). Pendant la même période de 11 ans, le rejet de particules en suspension a également augmenté de façon considérable dans le delta du Mackenzie (50 %) et les zones de panaches fluviaux (35 %). L'exportation accrue de matières particulaires, qui comprennent la matière inorganique sous forme de particules et le carbone organique terrestre, vers l'embouchure de la rivière, est probablement due à

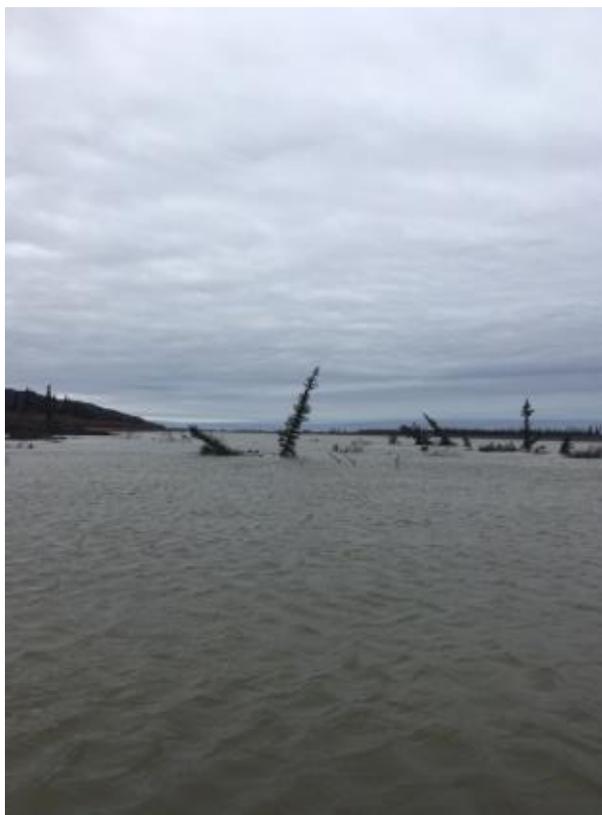


Figure 96. Éboulement dans le delta du Mackenzie. Cet éboulement et de nombreux autres de l'été 2017 ont transporté de grandes quantités de matière organique dans le fleuve Mackenzie (crédit photo : Doug Esagok).

l'intensification des processus d'érosion (figure 96) liés aux effets des températures et des précipitations dans le bassin hydrographique en expansion du fleuve Mackenzie (Doxaran et coll., 2015). Par conséquent, l'apport de carbone terrestre en provenance de multiples sources a considérablement augmenté dans l'ouest de l'Arctique sur une période relativement courte (p. ex. 10 ans) pour les paysages glaciaires. On pense que les changements climatiques pourraient accélérer les processus continus de déglaciation de l'ouest de l'Arctique, qui étaient auparavant couverts par l'Inlandsis laurentidien, et modifier de manière importante les paysages et les interactions côte-mer (Kokelj et coll., 2017).

L'apport de carbone organique terrestre peut modifier les réseaux trophiques marins, bien que le carbone terrestre ait toujours été considéré comme inutilisable pour les réseaux trophiques marins. Les études actuelles montrent que les réseaux trophiques microbiens peuvent reminéraliser le carbone terrestre (p. ex. Bell et coll., 2016; Le Fouest et coll., 2018), permettant ainsi à cette source d'énergie de pénétrer dans le réseau trophique classique (section 4.3). Le carbone organique terrestre s'est révélé être une ressource pour les communautés pélagiques et benthiques estuariennes et marines (Casper et coll., 2015; Roy et coll., 2015a), affaiblissant le couplage pélagique benthique dans les zones touchées par le carbone organique terrestre (Stasko et coll., 2018). Une étude (Harris et coll., 2018) a détecté des signes de carbone organique terrestre dans les tissus des bélugas, et d'autres études sont nécessaires pour déterminer la proportion du régime des bélugas de la mer de Beaufort qui pourrait provenir de sources de carbone terrestres. Il est maintenant évident que la matière organique terrestre (y compris les sources d'eau douce connexes) peut constituer une ressource pour de multiples niveaux trophiques des réseaux alimentaires côtiers/marins, ce qui crée des liens clés entre la matière organique transportée par les rivières/mobilisée sur les côtes et la production secondaire dans l'écosystème Mackenzie-Beaufort. D'autres études sont nécessaires pour déterminer le mode d'influence des sources d'énergie terrestres sur les réseaux trophiques marins à mesure des changements côtiers.

7.2 Poissons et habitats côtiers de l'ouest de l'Arctique (delta du Mackenzie, versant nord du Yukon et zones côtières marines)

Le littoral de la mer de Beaufort favorise des liens importants entre l'eau douce, les anadromes (qui occupent les eaux douces pendant l'hiver et les zones côtières pendant la saison des eaux libres) et les espèces côtières. Les poissons anadromes sont particulièrement importants pour les pêches de subsistance pratiquées dans l'ensemble de l'Arctique canadien. Nous manquons encore de connaissances sur les interactions entre les poissons concomitants, les caractéristiques de leur cycle biologique et les associations d'habitat tout au long de l'année. Ces lacunes sont particulièrement évidentes pour la saison des eaux libres où un grand nombre de poissons anadromes dépendent des habitats côtiers pour se nourrir et interagissent avec les poissons marins et d'autres biotes dans les habitats côtiers. Une grande partie des connaissances acquises sur les poissons côtiers dans l'ouest de l'Arctique portent sur le delta du fleuve Mackenzie et la péninsule Tuktoyaktuk où des activités de recherches et une pêche de subsistance aux poissons anadromes ont été pratiquées pendant de longues périodes. Le cycle biologique et les associations d'habitats aux espèces similaires dans les zones côtières marines de la mer de Beaufort sont peu connus, mais nous disposons de connaissances provenant de l'histoire de la pêche de subsistance des collectivités côtières de ces régions.

Les habitats côtiers de l'ouest de l'Arctique se divisent en deux grandes catégories : les habitats côtiers dessalés de l'estuaire du fleuve Mackenzie (zone de panache dessalée) et les sites marins côtiers qui sont habituellement plus froids et plus salins (p. ex., baie Franklin) (figure 97). Le fleuve Mackenzie fournit de grandes quantités d'eau douce, de sédiments et de nutriments à la mer de Beaufort, qui ont une influence considérable sur les caractéristiques côtières et le mélange d'eau douce du plateau de Beaufort. Pendant la débâcle du printemps, la glace de mer est poussée par des eaux relativement plus chaudes et moins salées, permettant ainsi aux poissons anadromes d'accéder aux zones côtières. Par ailleurs, les sites marins côtiers sont grandement influencés par les processus océanographiques de la mer de Beaufort. Ces processus comprennent la remontée d'eau froide riche en nutriments le long du plateau continental vers les zones côtières, l'affouillement et l'échouage de la glace de mer pendant l'hiver, et globalement, une influence terrestre moindre que les habitats situés près du débit sortant d'un important réseau fluvial.

Estuaire du fleuve Mackenzie et versant nord du Yukon

L'estuaire du fleuve Mackenzie est une région côtière dessalée et généralement plus chaude que les autres côtes de l'Arctique, surtout là où les eaux lourdes de sédiments du fleuve Mackenzie rencontrent la mer de Beaufort. Le panache formé par le fleuve Mackenzie s'étend au-delà de la ligne de côte de l'estuaire et de la péninsule Tuktoyaktuk et souvent au large près de la lisière du plateau. Par conséquent, les espèces de poissons sténohalines (qui tolèrent de faibles écarts de salinité) (p. ex. le cisco anadrome) peuvent s'aventurer plus loin au large que ce qui est généralement possible dans les habitats marins côtiers. Cette zone de transition entre les habitats sert de zone d'alimentation critique pour les poissons anadromes après la débâcle du printemps, et soutient également les espèces marines associées qui peuvent tolérer des variations de salinité importantes (c.-à-d. espèce euryhaline).

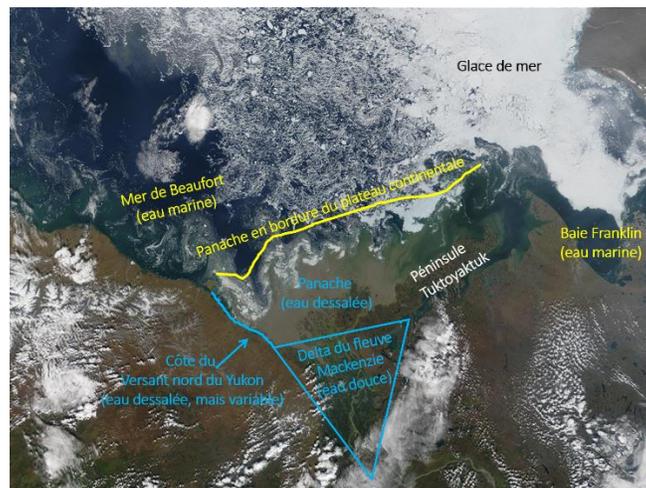


Figure 97. Image satellitaire du delta du fleuve Mackenzie MODIS (spectroradiomètre imageur à résolution moyenne) et caractéristiques de l'habitat associé accessible aux poissons côtiers. Les caractéristiques de l'habitat désigné comme le panache (eau brunâtre dans l'ensemble de l'estuaire) et les eaux côtières du versant nord du Yukon sont utilisées par des poissons qui tolèrent de faibles écarts de salinité (sténohaline), y compris des espèces anadromes, tandis que la mer de Beaufort et les zones côtières de lieux marins (p. ex. baie Franklin) soutiennent les poissons marins (euryhaline).

Les poissons qui caractérisent l'estuaire du Mackenzie comprennent les ciscos ou corégones (cisco arctique [*Coregonus autumnalis*], le corégone tschir [*C. nasus*], le cisco sardinelle [*C. sardinella*], le grand corégone [*C. clupeaformis*], le ménomini rond [*Prosopium cylindraceum*], et l'inconnu) et l'omble anadrome Dolly Varden du nord. La tolérance à la salinité et aux températures varie chez ces espèces anadromes, de sorte que leurs cycles biologiques varient dans cette région (Reist et Bond, 1988; Harris et coll., 2012). Des espèces marines associées sont également souvent observées dans la région, y compris le hareng du Pacifique (*Clupea pallasii*), le navaga jaune (*Eleginus gracilis*), les chaboisseaux et cottidés (p. ex. chaboisseau à épines courtes [*Myoxocephalus scorpius*] et chaboisseau à quatre cornes [*M. quadricornis*]) et les plies (plie arctique [*Liopsetta glacialis*] et flet étoilé [*Platichthys stellatus*]). Bien que moins fréquentes, les espèces d'eau douce associées, comme le grand brochet (*Esox lucius*) ou la lotte (*Lota lota*), peuvent également être observées dans l'estuaire, près des limites supérieures de leur tolérance à la salinité (Żarski et coll., 2010). Parmi ces espèces, les poissons pêchés à des fins de subsistance par les collectivités inuvialuit et gwich'in sont ceux dont le cycle biologique et l'abondance relative dans la région ont été le mieux documentés. Des études récentes sur le versant nord du Yukon indiquent qu'il existe des groupes d'alimentation distincts parmi les espèces d'eau douce, côtières et marines (Brewster et coll., 2016), reflétant les différences d'utilisation de l'habitat.

Bien que des études approfondies aient été menées au cours des dernières décennies sur les poissons de cette région, de nombreuses questions de recherche portent sur la situation du Dolly Varden, espèce de subsistance critique (Byers et coll., 2019) qui fait partie des espèces en péril (préoccupante). De nombreux Dolly Varden sont pêchés dans les zones d'eau douce ou sur les côtes ouest de l'estuaire. Toutefois, des études récentes indiquent que certains individus nagent au large pendant la saison estivale et ne se limitent pas à la région côtière comme on le croyait auparavant (Courtney et coll., 2018). Bien qu'on n'ait généralement pas observé directement d'autres poissons anadromes au large des côtes, il est possible que les poissons se déplacent dans le panache de l'estuaire afin d'optimiser leur alimentation pendant la saison des eaux libres. Les signatures isotopiques stables obtenues en examinant les tissus musculaires d'une de ces espèces, le cisco arctique, suggèrent que l'alimentation de cette espèce comprend des proies provenant de sources extracôtières, comme pour le Dolly Varden (Brewster et coll., 2016; D. McNicholl, données non publiées).

Milieu marin côtier de la mer du Beaufort

Les zones marines côtières de la mer de Beaufort sont très influencées par les processus océanographiques. Les poissons de ces zones doivent tolérer des niveaux de salinité élevés et des températures froides ainsi que des variations importantes de ces variables. Dans certaines échancrures abritées, par rapport aux zones exposées dans le golfe Amundsen, les deux espèces de poissons anadromes côtière et marine occupent le même habitat. Les températures de l'eau dans ces zones sont généralement plus chaudes et sujettes à moins de variations que dans les habitats exposés à la remontée d'eau froide sur la lisière du plateau continental. Les espèces plus sensibles au froid et à l'eau saline (c.-à-d. moins tolérantes) sont plus susceptibles d'être observées sur la rive et dans le panache du Mackenzie dessalé.

Les poissons qui caractérisent les habitats marins côtiers comprennent les corégones (cisco arctique, corégone tschir) et les poissons anadromes suivants : omble chevalier, hareng du Pacifique, navaga jaune, ogac (*Gadus ogac*), chaboisseaux ou cottidés (chaboisseau à épines courtes, tricorne arctique [*Gymnocanthus tricuspis*] et chaboisseau à quatre cornes), plies (plie arctique et flet étoilé) ainsi que les poissons fourrages comme le capelan ou le lançon gourdeau (*Ammodytes hexapterus*) qui sont souvent observés dans les estomacs des espèces de subsistance (D. McNicholl, données non publiées).

La pêche de subsistance pendant l'été occupe une partie importante de la vie des Inuvialuit dans les collectivités Sachs Harbour, Paulatuk et Ulukhaktok, et des peuples inuvialuit et gwich'in sur le versant nord du Yukon (Bell et Harwood, 2012; Byers et coll., 2019). Les pêches côtières ciblent à peu près les mêmes espèces de poissons anadromes que les pêches dans l'estuaire du fleuve Mackenzie et les zones intérieures, à l'exception du Dolly Varden, qui est généralement pêché à l'ouest de l'estuaire et de l'omble chevalier qui est récolté à l'est. Le cisco arctique (connu localement sous le nom de hareng, tableau 5) et le corégone tschir sont également couramment récoltés dans les communautés côtières du continent et, comme l'omble, représentent une source alimentaire culturellement importante.

Une grande partie de l'information connue sur ces poissons, leur cycle biologique, leurs associations d'habitat et leurs liens dans le réseau trophique est recueillie durant les mois d'été lorsque les anadromes côtiers et les poissons marins se croisent dans les zones côtières (de 0 à 20 m). Des études récentes menées dans la Zone de protection marine (ZPM) d'Anguniqvia niqiyuam nouvellement établie dans la baie Darnley (McNicholl et coll., 2017) ont révélé la présence de groupes distincts de proies pélagiques et benthiques associées qui sont consommées par les poissons côtiers, et que certaines espèces reçoivent également des contributions importantes à leur alimentation de sources terrestres (c.-à-d. suggère l'importance de l'influence de l'eau douce des petites rivières de la région). Les espèces qui occupent un créneau alimentaire semblable, comme les alevins de capelan et de morue polaire, présentent un niveau de chevauchement considérable et pourraient se faire concurrence si la disponibilité des proies change (McNicholl et coll., 2016).

Des études sur les poissons côtiers et de la zone semi-hauturière et sur leur utilisation de l'habitat pendant la saison hivernale des glaces sont nécessaires dans de nombreuses régions. Pendant les mois d'hiver, les espèces marines et anadromes devraient présenter un chevauchement minimal, dans la mesure où les espèces anadromes sont retournées dans leurs zones d'hivernage en eau douce et où les espèces marines restent dans l'environnement océanique, probablement plus loin au large pour éviter la dynamique côtière mer-glace. Les habitats littoraux dans cette zone sont également réduits pour les poissons marins en raison de la glace de mer échouée dans les zones peu profondes ou des zones stamukhi constituées d'une accumulation de glace de mer échouée qui emprisonne les flux d'eau douce tout au long de l'hiver. Les rivières qui continuent de couler en hiver peuvent créer de vastes zones d'eau douce dessalée sous la glace de mer, en particulier au large de l'estuaire du fleuve Mackenzie (Carmack et Macdonald, 2002). Ces zones sont restreintes par la glace de mer et empêchent le déplacement des poissons marins à cause d'obstacles physiques et du faible niveau de salinité; toutefois, on ne sait pas si ces zones sont également utilisées en hiver par des espèces anadromes.

Importance des poissons côtiers

Les habitats qui soutiennent les poissons côtiers dans la mer de Beaufort sont très importants pour les pêcheurs inuvialuit et gwich'in, qui comptent sur la prise de ces poissons pour se nourrir pendant l'été et au début de l'hiver. Il n'y a pas de pêche commerciale dans la région et, compte tenu du coût croissant du transport vers les collectivités éloignées, l'accès à des aliments frais et de qualité représente un enjeu important. La pêche du cisco (corégones) et de l'omble est également une pratique culturellement importante dans l'ouest de l'Arctique où l'alimentation des membres des collectivités dépend étroitement de ces ressources (Bell et Harwood, 2012). La compréhension de l'utilisation de l'habitat et des liens entre ces poissons et l'environnement côtier variable est essentielle pour une gestion efficace des stocks et une pêche durable dans le futur. La recherche axée sur les poissons en tant que sources d'énergie de base (sources terrestres contre sources marines), l'importance des habitats hivernaux, les interactions entre l'eau douce, les espèces anadromes et les espèces marines et les limites des zones côtières sensibles prend de l'importance à mesure que les changements climatiques influent sur les habitats et les écosystèmes. De plus, il est nécessaire de comprendre les déplacements de ces espèces dans les zones marines et de déterminer les habitats critiques associés au cycle biologique pour gérer ces espèces dans le contexte des revendications territoriales et des frontières internationales.

Tableau 5. Noms en siglit des poissons que l'on trouve dans l'estuaire du fleuve Mackenzie associés à leurs noms courants et scientifiques.

Nom en siglit	Nom courant [nom local]	Nom scientifique
Iqalukpik	Ombles chevalier	<i>Salvelinus alpinus</i> (Linnaeus 1758)
Qaaqtaq	Cisco arctique [hareng]	<i>Coregonus autumnalis</i> (Pallas 1776)
Iqalugaq	Capelan	<i>Mallotus villosus</i> (Müller 1776)
Uugavik	Ogac [morue de roche]	<i>Gadus ogac</i> (Richardson 1836)
Pikuktuuq	Grand corégone [Crooked Back]	<i>Coregonus clupeaformis</i> (Mitchill 1818)
Piquaqtitaq	Hareng du Pacifique [Blue Herring]	<i>Clupea pallasii</i> (Valenciennes 1847)
Iqaluaqat	Lançon gourdeau	<i>Ammodytes hexapterus</i> (Pallas 1814)
Iqaluaqat	Éperlan arc-en-ciel [Stink Fish]	<i>Osmerus mordax</i> (Mitchill 1814)
Uugaq	Navaga jaune [Tom Cod]	<i>Eleginus gracilis</i> (Tilesius 1810)
Nataarnaq	Plie	<i>Pleuronectidae</i>
Kanayuuq	Chabot	<i>Cottidae</i> sp
Anaaktiq	Grand corégone	<i>Coregonus</i> sp

Au cours des dernières années, l'augmentation des températures océaniques semble avoir facilité un changement de répartition vers le nord des espèces subarctiques dans l'Arctique canadien. Les espèces qui étaient généralement rares à l'extrémité nord de leur zone géographique sont maintenant de plus en plus présentes dans les écosystèmes de l'Arctique et peuvent entrer en concurrence avec les espèces endémiques de l'Arctique pour ce qui est des proies et de l'habitat (p. ex. Dunmall et coll., 2013). Le saumon du Pacifique est un groupe d'espèces qui a augmenté en abondance de manière considérable dans l'ouest de l'Arctique, comme en témoignent les

filets des pêcheurs de subsistance (Dunmall et coll., 2018). Des recherches sont en cours pour mieux comprendre la coexistence du saumon et des espèces d'omble locales (p. ex. Dolly Varden, truite grise [*Salvelinus namaycush*], omble chevalier) au moyen d'une approche communautaire visant à documenter les changements d'abondance (Dunmall et Reist, 2018; Byers et coll., 2019).

7.3 Habitat dans les eaux estuariennes et saumâtres

Les estuaires sont connus pour le rôle important qu'ils jouent dans la production biologique de nombreuses espèces d'invertébrés dans les écosystèmes de l'Arctique. L'environnement estuarien façonne les collectivités par l'entremise de la capacité physiologique d'osmorégulation des organismes et des effets de l'érosion terrestre et de l'apport de nutriments (Brown TM et coll., 2011; Carmack et coll., 2016). Ce dernier mécanisme produit souvent des eaux troubles menant à de faibles niveaux de production primaire et par conséquent à une diversité du zooplancton limitée, mais offrant aux organismes benthiques de nombreuses possibilités de prospérer en raison de l'abondance des ressources (Wassman, 2015). Parsons et coll. (1989) ont décrit les amphipodes de la famille des gammaridés, les mysidacés et les petits copépodes comme des espèces représentatives de certains environnements estuariens près des côtes. Selon les observations, cet assemblage benthique soutient les consommateurs des niveaux trophiques supérieurs, comme certains poissons (p. ex. le cisco sardinelle et l'ombre arctique d'eau douce [*Thymallus arcticus*]) et oiseaux et mammifères marins (p. ex. Loseto et coll., 2009).

Les milieux estuariens, comme le delta du fleuve Mackenzie, ont été décrits comme possédant de longues structures trophiques en raison de l'apport de la matière organique terrestre (Bell et coll., 2016), et on a démontré que ces milieux soutiennent de vastes communautés de mysidacés et d'amphipodes épibenthiques, qui prédominent pendant l'été (Dunton et coll., 2006). On a également démontré que de nombreuses espèces de polychètes favorisent les conditions estuariennes autour du fleuve Mackenzie (Conlan et coll., 2008). On s'inquiète de la possibilité qu'une augmentation de l'apport d'eau douce rende les habitats estuariens plus vulnérables à l'acidification des océans en raison d'une capacité tampon plus faible ainsi que de concentrations d'ions calcium moins élevées à la surface (Carmack et coll., 2016). Il est nécessaire de comprendre la fonction écologique de ces écosystèmes dynamiques, en particulier durant les mois d'hiver qui sont rarement étudiés (McClelland et coll., 2012), pour agir sur les effets cumulatifs des changements climatiques dans les habitats côtiers.

7.4 Utilisation des estuaires par les bélugas

La répartition des bélugas est circumpolaire et on rencontre le béluga de manière discontinue dans les eaux arctiques et subarctiques. Les bélugas évoluent principalement au large des côtes de l'Alaska, du nord du Canada, de l'ouest du Groenland et du nord de la Russie, bien qu'on trouve des populations isolées plus au sud dans le fleuve Saint-Laurent dans le Canada atlantique et dans la mer d'Okhotsk en Russie orientale (Rice, 1998). De nombreuses populations de bélugas migrent des sites d'hivernage en eau profonde vers des zones côtières peu profondes et des estuaires en été (Heide-Jørgensen et coll., 2001).

Les raisons de l'utilisation des estuaires l'été sont mal comprises, bien que plusieurs hypothèses aient été proposées, notamment l'alimentation, la mise bas, la mue, la protection contre les prédateurs ou la socialisation. L'hypothèse de l'alimentation a été étayée par des observations de bélugas s'alimentant dans les eaux côtières de l'est de la mer de Béring (Huntington, 1999) et près de l'embouchure de la rivière Churchill (Watts et Draper, 1986). Toutefois, historiquement, la plupart des bélugas capturés dans les estuaires du fleuve Mackenzie et de la rivière Churchill avaient l'estomac vide, tandis que ceux capturés en mer l'avaient plein (Sergeant, 1973; Harwood et coll., 1996). Le nombre de mères et de nouveau-nés observés dans les estuaires appuie l'hypothèse selon laquelle les estuaires offriraient de la chaleur et un abri pour la mise bas (Sergeant, 1973), bien qu'on y observe rarement des naissances et que l'on pense que la mise bas a lieu avant l'arrivée des baleines dans certains endroits (Cobb et coll., 2008). Il existe des évidences selon lesquelles la faible salinité et les températures élevées dans les estuaires contribuent à accélérer la mue (St. Aubin et coll., 1990). En effet, des baleines ont été observées à tous les stades de la mue au cours de l'été dans les estuaires de la baie d'Hudson (St. Aubin et coll., 1990) ainsi que des baleines se roulant contre le substrat dans l'estuaire de la rivière Churchill (Watts et coll., 1991; Smith et coll., 1992). On pense aussi que les eaux côtières peu profondes et les estuaires offrent un abri contre les prédateurs (principalement contre les épaulards), même si les bélugas font face à la chasse des humains dans plusieurs des estuaires où ils se rassemblent. Enfin, la grande taille des regroupements de bélugas l'été et les observations de comportements sociaux ont conduit à supposer que les bélugas se rassemblent pour socialiser. Malheureusement, comme il est difficile d'observer le comportement social des bélugas à l'extérieur des eaux côtières et des estuaires, l'hypothèse est difficilement vérifiable. En définitive, les raisons de l'utilisation des estuaires peuvent varier d'une population à l'autre et ne pas s'exclure mutuellement.

Récemment, les tendances de l'utilisation de l'habitat estuarien ont été examinées de près dans la population béluga de l'est de la mer de Beaufort, qui forme de grands groupes dans l'estuaire du fleuve Mackenzie de la fin juin à août. Individuellement, les baleines semblent passer de 3 à 5 jours seulement dans l'estuaire avant de partir au large, de sorte que le groupe est probablement composé de baleines différentes qui entrent dans le groupe et en sortent au fil de la saison (Richard et coll., 2001). À l'intérieur de l'estuaire, un patron de répartition aggloméré a été défini, dans lequel les bélugas sont plus susceptibles de se réunir dans certains « points chauds » année après année (Harwood et coll., 2014). Cette tendance contraste avec l'utilisation dispersée de l'habitat en mer qui consiste en un seul béluga ou en de petits groupes de deux ou trois bélugas (Norton et Harwood, 1985). L'utilisation de ces points chauds semble indépendante ou faiblement associée au substrat du fond de l'eau (D. Whalen, données non publiées), ce qui laisse penser que les points chauds et, par extension, l'utilisation de l'estuaire, ne sont pas liés à l'activité de frottement de la mue. Par ailleurs, des analyses spatio-temporelles récentes ont révélé que la présence de bélugas dépendait de la température et de la salinité, c'est-à-dire que les bélugas s'éloignent dans l'estuaire lorsque l'afflux océanique inonde les points chauds avec de l'eau froide et salée (K. Scharffenberg, données non publiées). Ces constatations appuient les hypothèses selon lesquelles les bélugas utiliseraient l'estuaire à des fins thermiques ou pour faciliter la mue.

Les vents très forts semblent également influencer sur les modèles d'utilisation de l'habitat des bélugas dans les estuaires. Par exemple, dans l'estuaire de Nastapoka (Nunavik), on a observé

que les bélugas remontaient dans l'estuaire lorsque des vents forts soufflaient (Caron et Smith, 1990), ce qui laisse penser que les bélugas recherchent des eaux calmes près des rives dans la mer de Béring lorsque la vitesse du vent augmente (Mymrin et Huntington, 1999). Dans l'estuaire du fleuve Mackenzie, on a observé que les sons produits par les bélugas dans les lieux de regroupement typiques diminuaient considérablement lorsque des vents forts soufflaient (K. Scharffenberg, données non publiées). Ces hypothèses ont pu être vérifiées dans le contexte d'une tempête de 4 jours en 2016, au cours de laquelle les hydrophones n'ont détecté aucun son de béluga dans les endroits à forte utilisation pendant 5 jours (K. Scharffenberg, données non publiées). À cet endroit, on pense qu'il devient difficile pour les baleines de nager dans les eaux peu profondes (environ 2 m de profondeur) lorsque les eaux de surface sont agitées (hauteur de vague maximale >1 m, soit la moitié de la profondeur de la colonne d'eau) et que les baleines courent des risques d'échouage, de piégeage et/ou d'épuisement, en particulier les jeunes bélugas qui évoluent dans la zone. Ces observations indiquent qu'il est nécessaire de poursuivre la surveillance, puisque les tempêtes devraient augmenter dans l'Arctique (Manson et Solomon, 2007; Sepp et Jaagus, 2011; Vermaire et coll., 2013).

8.0 Cogestion pour l'océan Arctique canadien

Dans l'Arctique canadien, les stocks de poissons et de mammifères marins et des habitats dont ils dépendent font l'objet d'une gestion très différente par rapport aux autres régions du Canada. Outre les différences culturelles et traditionnelles, les processus de gestion et de protection ont été définis dans le cadre d'ententes globales sur les revendications territoriales, ou traités, entre les peuples autochtones de la côte arctique, les Inuits et les gouvernements du Canada, des provinces et des territoires. Les quatre régions inuites du Canada, appelées collectivement Inuit Nunangat (ITK, 2019), comprennent le littoral de l'Arctique et les îles et océans adjacents de la frontière du Yukon et de l'Alaska jusqu'à la région désignée des Inuvialuit au Yukon et les Territoires du Nord-Ouest, le Nunavut, le Nunavik dans le nord du Québec et le Nunatsiavut dans le nord de Terre-Neuve-et-Labrador. Les ententes, bien qu'elles diffèrent dans leurs détails, ont toutes établi des conseils de cogestion des pêches et de la faune, ainsi que de protection et de planification de l'environnement. Par conséquent, les Inuits dans l'Arctique canadien participent aujourd'hui directement à la prise de décisions en matière de gestion des ressources dans l'océan Arctique, en collaboration avec le gouvernement fédéral. Il convient également de noter que ces ententes sont protégées par la Constitution canadienne et qu'en cas de conflit entre les législations fédérale, provinciale ou territoriale et les ententes de règlement, l'entente de règlement prévaut.

Cette exigence de partenariat a récemment été soulignée avec l'annonce par le MPO (en octobre 2018) de la création d'une région arctique dont le directeur général régional (DGR) est situé à Rankin Inlet et le directeur régional de la Garde côtière à Yellowknife. La réorganisation vise à améliorer la prestation des programmes et des services dans l'Arctique et à mieux répondre aux besoins des collectivités du Nord. La nouvelle structure organisationnelle devrait permettre aux habitants du Nord d'influer davantage sur les décisions et les activités du MPO.

Pour terminer le présent rapport, des études de cas sont présentées décrivant les activités de cogestion et l'intégration des connaissances scientifiques et inuites qui accompagnent nos efforts pour mieux comprendre l'état de l'océan Arctique canadien.

ÉTUDE DE CAS 17: Lier le savoir écologique traditionnel, la science occidentale, la gestion de l'environnement et la gestion des pêches dans l'ouest de l'Arctique canadien

Les ententes sur les revendications territoriales globales conclues dans l'Arctique canadien reconnaissent le droit des Inuits d'utiliser les ressources renouvelables de la région et de participer à la gestion de ces ressources. Ils reconnaissent également les cultures traditionnelles des Inuits et la nécessité que les connaissances et les pratiques des Inuits se reflètent dans la gestion de la faune. Les gouvernements ont réagi à ces ententes et à de nombreuses affaires judiciaires en modifiant les lois, les politiques et les pratiques pour faire en sorte que le savoir autochtone et la science occidentale contribuent à appuyer la prise de décisions en matière de gestion des ressources. Toutefois, la voie à suivre pour appliquer les nombreux textes législatifs à la réalité quotidienne de la gestion et de la protection des pêches, de la faune et des habitats connexes est loin d'être claire (p. ex. Laidlaw 2015).

Au cours des dernières années, des efforts continus ont été déployés pour documenter et cataloguer les connaissances écologiques traditionnelles de l'écosystème¹ (connaissances écologiques traditionnelles [CET]; p. ex. le Catalogue des connaissances traditionnelles et locales de la RDI, la plateforme de cartographie SIKU de la baie d'Hudson, l'inventaire des ressources côtières du Nunavut, Byers et coll. 2019). Nous décrivons ici un modèle de gestion de l'environnement et des pêches (Dorcey et Hall 1981) qui a été élargi pour inclure les CET. Il est ici appliqué à la région désignée des Inuvialuit (RDI) (Canada 1984), mais pourrait être utilisé ailleurs.

Le modèle (figure 98) est une schématisation du lien qui existe entre la production de connaissances (CET et science occidentale) et la prise de décisions liées à l'environnement et à la gestion des pêches en vertu du cadre de cogestion établi par les revendications territoriales. L'objectif est de fournir une approche pour intégrer les CET en tant qu'outil utile de gestion des pêches et de l'environnement en reconnaissant l'importance de l'ensemble des connaissances qu'ont les Inuits à l'égard de l'environnement.

Les décisions en matière d'environnement et de gestion des pêches peuvent être perçues comme étant réparties selon un spectre ou un continuum composé de décisions à but unique, de décisions complexes à buts multiples ou de décisions intégrées. La flèche horizontale tracée au bas de la figure 98 illustre ce continuum et fournit des exemples de processus décisionnels de la RDI qui sont régulièrement invoqués dans l'Arctique canadien. Les plans de conservation communautaires (PCC) (Comité d'étude des répercussions environnementales 2018), qui sont établis par les comités de chasseurs et de trappeurs (CCT), sont des processus clés pour la prise

¹ Le concept de CET n'est pas facile à définir ou à catégoriser. Voici la définition de Berkes et coll. (2000) : « Un ensemble de connaissances, de pratiques et de croyances liées aux relations qu'ont les plantes et les animaux (y compris les humains) entre eux et avec leur milieu, qui évolue selon des processus adaptatifs et qui est transmis de génération en génération par le véhicule de la culture. » [Traduction libre] D'autres définitions et nomenclatures, comme celles des termes « Connaissances locales ou connaissances des pêcheurs », « Connaissances inuvialuites », qui est utilisé dans la région désignée des Inuvialuit, ou « Inuit Qaujimajautuqangit », qui est utilisé au Nunavut, seraient tout aussi appropriées aux fins de la présente étude de cas.

de décisions environnementales. Les PCC reflètent les valeurs et les objectifs de la collectivité et catégorisent l'utilisation des terres et des ressources dans la région. L'information scientifique est incluse pour compléter les CET, mais les PCC naissent dans les collectivités et sont ensuite directement liés à la planification du développement industriel proposé. Les divers processus de gestion liés au continuum décisionnel sont appuyés par des activités de recherche qui couvrent tout le spectre, allant de la description (p. ex. quelles espèces et à quel endroit) aux connaissances fonctionnelles (p. ex. les relations systémiques comme la façon dont la survie des blanchons varie en fonction de la formation de glace ou de la réponse des populations d'ombles à la pêche).

Dans le modèle, les flèches verticales noires montrent le lien qui existe entre le spectre des connaissances scientifiques et le spectre des décisions de gestion. La position relative des cinq activités de recherche et des décisions de gestion est importante. Les connaissances descriptives contribuent principalement à l'objectif et à la finalité uniques du spectre des décisions de gestion, tandis que les nouvelles connaissances fonctionnelles sont essentielles aux décisions intégrées, mais contribuent également à l'autre extrémité du spectre. Dorsey et Hall (1981) soutiennent que si l'on veut améliorer la gestion, le processus décisionnel doit être déplacé vers la droite du spectre et mettre davantage l'accent sur le soutien à l'amélioration des connaissances fonctionnelles, et donc sur la vérification d'hypothèses précises.

Les CET peuvent aussi être considérées comme s'inscrivant dans un spectre de complexité allant de simples observations individuelles à des visions et à des valeurs universelles, en passant par la gouvernance et les connaissances locales. Le long de la flèche horizontale supérieure, certaines activités relatives aux CET qui sont appuyées par la cogestion sont présentées comme un continuum de complexité. Les flèches bleues (verticale) indiquent les liens et les parallèles entre les CET et les spectres de la science, puis les liens indirects avec le spectre de gestion. Il existe également des liens directs (flèches bleues, verticale) entre le spectre des CET et le spectre de gestion. Cinq exemples sont fournis pour illustrer le flux des CET dans le modèle de gestion. La flèche bleue située à l'extrême droite indique que les récits, les croyances et les pratiques culturelles inuites peuvent influencer directement sur les décisions de gestion. Dans l'ouest de l'Arctique, des aînés influents, dont Alex Aviugana et Billy Day, ont aidé à négocier la Convention définitive des Inuvialuit (Canada 1984) et ont servi avec efficacité et distinction de nombreux Inuvialuit et organismes de cogestion en apportant leurs connaissances traditionnelles aux négociations encadrées principalement par une administration publique bureaucratique occidentale (Beck 1994; Bell 2009). Plus récemment, les Inuits s'adressent directement à un public plus large sur Facebook et Twitter et dans des documentaires vidéo pour raconter leur vie et leur culture. Dans « Angry Inuk », la réalisatrice inuite Alethea Arnaquq-Baril (Arnaquq-Baril 2016) conteste l'interdiction décrétée par l'Union européenne (UE) à l'égard de l'importation du phoque. Ce faisant, elle a contribué à sensibiliser les Européens et les autres Nord-Américains au désir des Inuits d'avoir une économie durable et une source de nourriture fondées sur les ressources traditionnelles que sont le poisson et les mammifères marins plutôt que sur l'aide sociale et les produits importés du Sud. Bien que la campagne n'ait finalement pas porté ses fruits, des approches comme celle-ci peuvent tirer parti de la vision du monde que nourrissent quelque 132 000 Inuits pour aider à influencer le comportement de plus d'un milliard de personnes en Europe et en Amérique du Nord afin d'améliorer la durabilité et la protection environnementales de l'ensemble de l'Arctique.

On reproche souvent au modèle d'être fondé sur une approche bureaucratique occidentale typique de l'intégration des CET dans la gestion qui ne reflète pas adéquatement les différences réelles entre les cultures autochtones et l'idéologie dominante. Comme le soutient Stevenson (2004), cette approche peut être perçue comme une simple réappropriation des CET dans la pensée et la pratique scientifiques occidentales. C'est peut-être vrai, mais la réalité est que le système de cogestion utilisé dans l'Arctique est principalement un système étatique occidental qui exige le recours au spectre complet des CET et de la science occidentale. Le modèle proposé met en évidence les relations potentielles entre les spectres de connaissances et la façon dont ils peuvent ensemble contribuer à l'éventail des pratiques requises pour la gestion de l'environnement et des pêches dans l'Arctique. Un tel modèle devrait faciliter la communication entre les participants (p. ex. les chasseurs et pêcheurs, les scientifiques, les politiciens) et aider à concentrer les efforts des CET et de la science occidentale sur des activités précises qui sont nécessaires pour améliorer le processus décisionnel.

Le modèle présenté ici, qui est mis en œuvre dans un cadre de cogestion, promet d'améliorer l'interface entre les CET, la science occidentale et la gestion de l'environnement et des pêches. On peut affirmer, en paraphrasant White (2006), que les conseils de cogestion de l'Arctique jouent un rôle très important dans l'évaluation de l'influence des CET et qu'ils représentent la meilleure occasion d'inculquer les CET aux institutions gouvernementales publiques non autochtones. En d'autres termes, si les conseils de cogestion ne parviennent pas à intégrer les CET dans leurs processus et leurs décisions, il est peu probable qu'une autre institution publique obtienne de meilleurs résultats.

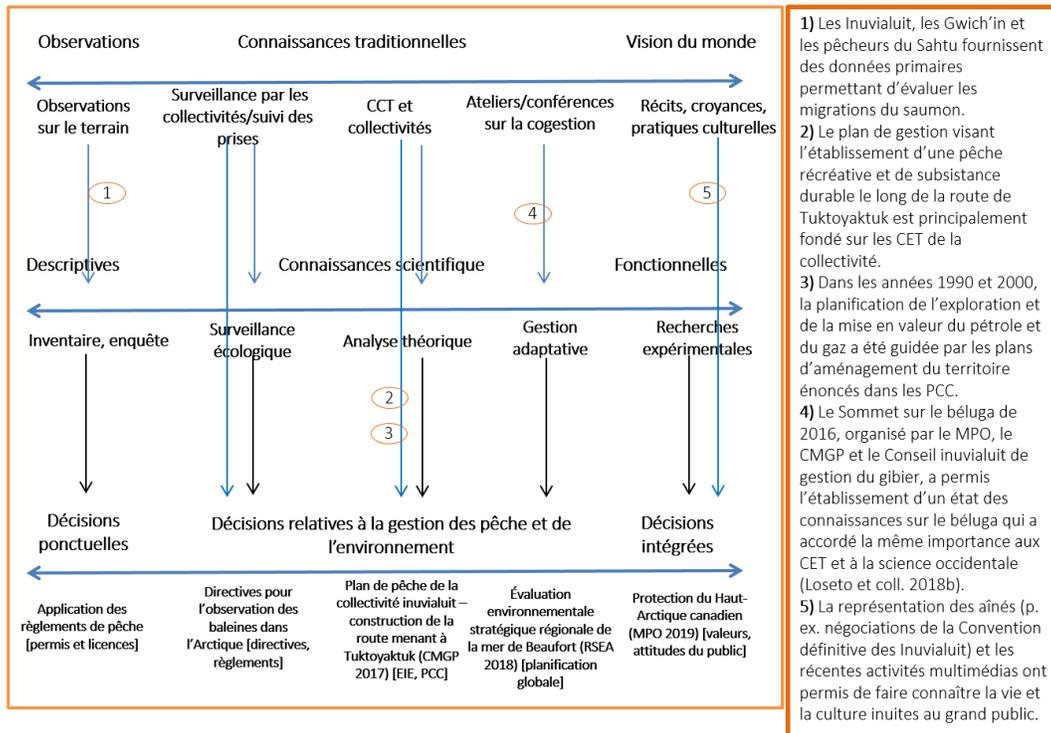


Figure 98. Modèle visuel de la relation entre les CET, les connaissances scientifiques occidentales et la prise de décisions en matière de gestion de l'environnement et des pêches. PCC : Plans de Conservation Communautaires, EIE : Évaluation de l'impact sur l'écosystème, CMGP : Comité mixte de gestion de la pêche.

ÉTUDE DE CAS 18: Science participative à la mode de l'Arctique

L'évolution rapide de l'Arctique comporte des défis tant pour les scientifiques qui évaluent les répercussions et les possibilités que pour les peuples autochtones qui entretiennent de très étroites relations avec l'environnement et ses ressources. La biodiversité de l'Arctique est irrévocablement liée à la culture des peuples autochtones du Nord, et leur perception du changement est enracinée dans leur dépendance à l'égard de l'environnement et dans leur incarnation des valeurs sociales axées sur la protection des moyens de subsistance (CAFF 2013). En fait, le manque d'information scientifique sur les espèces et leurs habitats dans



Figure 99. Brandon Green et Steve Illasiak en train de traiter des échantillons de poissons et d'enregistrer des données biologiques dans la zone de protection marine d'Anguniaqvia niqiqyuam, Territoires du Nord-Ouest, 2018 (crédit photo : Darcy McNicholl).

l'Arctique (Reist et coll. 2006a) contraste avec l'étendue des connaissances des Inuits sur l'environnement. Par conséquent, le fait d'offrir la possibilité novatrice d'évaluer le changement à ceux qui observent directement les effets immédiats sur l'environnement constitue une approche puissante pour renforcer l'influence humaine sur le rythme de la science et le rythme du changement. Dans l'Arctique canadien, la science participative peut être un important outil de surveillance écologique par les collectivités permettant de faire le pont entre le savoir autochtone et la recherche scientifique en vue d'aboutir ultimement à la coproduction du savoir (Dunmall et Reist 2018).

L'utilisation commune d'indicateurs précis et faciles à documenter pour évaluer les changements environnementaux dans les systèmes de connaissances autochtones et scientifiques constitue le fondement de la science participative dans l'Arctique canadien (Dunmall et Reist 2018). Les connaissances contemporaines acquises grâce à la surveillance de l'environnement au moyen d'indicateurs peuvent se traduire par l'établissement de données de référence et la surveillance quantitative des changements écologiques, à petite comme à grande échelle spatiale. Bien que la vaste série d'indicateurs habituellement recueillis par le savoir autochtone soit souvent différente des indicateurs précis qui sont utilisés dans la recherche scientifique, ces deux méthodes de surveillance sont liées et peuvent mettre en évidence des changements similaires au niveau des écosystèmes (Riedlinger et Berkes 2001; Berkes et coll. 2007; Tremblay et coll. 2008). La communication et la sensibilisation sont essentielles au succès de la science participative dans l'Arctique et sont facilitées en partie par l'utilisation des médias sociaux (p. ex. Facebook) pour diffuser l'information et interagir avec les participants et les observateurs (Dunmall et Reist 2018).

La prévalence de la surveillance écologique par les collectivités augmente dans l'Arctique canadien. Le programme sur le saumon arctique (www.facebook.com/arcticsalmon) utilise une approche axée sur la surveillance par les collectivités pour faire la pistage de l'augmentation de l'abondance et de l'élargissement de la répartition du saumon du Pacifique (espèces *Oncorhynchus*) et des changements liés à la répartition des poissons dans l'Arctique canadien (Dunmall et coll. 2013, 2017, 2018). La surveillance écologique des bélugas (*Delphinapterus leucas*) basée sur la chasse fournit des données importantes sur la santé et l'état corporel des bélugas grâce au prélèvement d'échantillons et à la mesure d'indicateurs particuliers (Loseto et coll. 2018c). La surveillance de l'environnement physique par les collectivités, y compris l'acquisition de connaissances inuites, se fait également dans la baie d'Hudson (p. ex. <https://arcticeider.com/siku>). La surveillance de l'écosystème côtier par les collectivités, y compris la collecte de données sur les paramètres environnementaux, la production primaire, les habitats benthiques et la biodiversité des poissons, se poursuit dans la baie Darnley (Territoires du Nord-Ouest) depuis 2012 (McNicholl et coll. 2017) et a récemment été transformée en un cadre de surveillance écologique par les collectivités dont la transférabilité aux environnements côtiers situés près de Kugluktuk (Nunavut) de Sachs Harbour (Territoires du Nord-Ouest) a été mise à l'essai en 2017 et 2018, respectivement (McNicholl et Dunmall 2018a). Dans les collectivités où l'activité maritime est relativement élevée et où le risque d'espèces envahissantes est donc plus important, des techniques d'enquête portuaire communautaire et d'échantillonnage de l'ADN environnemental (ADNe) ont été introduites (2015-2018 : Churchill [Manitoba], Salluit [Nunavik], Iqaluit et Pond Inlet [Nunavut] (Polar Knowledge Canada 2017). Ces efforts ont été combinés à des ateliers éducatifs axés sur les jeunes pour les sensibiliser et leur fournir des guides d'identification et une formation pratique sur la façon de signaler de nouvelles observations et de distinguer les espèces envahissantes qui présentent un risque élevé des espèces indigènes similaires.

La surveillance par les collectivités est en train d'émerger dans l'Arctique canadien. Il s'agit là d'un changement subtil, mais très important, lié au rôle de leadership qu'exercent les peuples autochtones dans tous les aspects des efforts de surveillance déployés sur le terrain en vertu d'un cadre de collaboration fondé sur la science. La transition vers cet effort entrepris par les collectivités est un processus qui exige du temps et une communication efficace, de la motivation et l'établissement d'un commun accord en ce qui a trait aux indicateurs et aux objectifs, ainsi que le renforcement des capacités grâce à la mise en place de protocoles, d'équipement et de formation. Les efforts de surveillance menés par la collectivité dans la zone de protection marine d'Anguniaqvia niqiqyuam, près de Paulatuk (Territoires du Nord-Ouest), ont permis en 2018 de recueillir des données sur des indicateurs couvrant plusieurs niveaux trophiques, ainsi que des données environnementales concernant l'écosystème côtier (McNicholl et Dunmall 2018b) (figure 99). Le leadership en matière de surveillance écologique des bélugas a été constant chez les Inuvialuit, et la récente acquisition de CET (Ostertag et coll. 2018; Waugh et coll. 2018) complète ces efforts en fournissant un contexte écosystémique à des indicateurs précis (Loseto et coll. 2018c).

La science participative est un outil très attrayant pour évaluer les changements environnementaux dans l'Arctique. Lorsqu'elle est appliquée avec soin dans le cadre d'un modèle qui met l'accent sur la communication continue et efficace et qui assure la production concertée de connaissances (figure 100), la science participative peut fournir l'information

essentielle nécessaire pour prévoir les répercussions et les possibilités associées aux changements de la biodiversité et à l'évolution rapide des écosystèmes dans l'Arctique. De plus, si elle est appliquée de façon cohérente à l'aide d'un cadre commun, la science participative pratiquée par les peuples autochtones offre une vaste couverture géographique et une surveillance écologique à long terme, ce qui permet de mieux comprendre la nature, les tendances et les conséquences des changements qui ont cours dans l'Arctique. Il en résultera une gestion des ressources et une gérance environnementale plus efficaces.

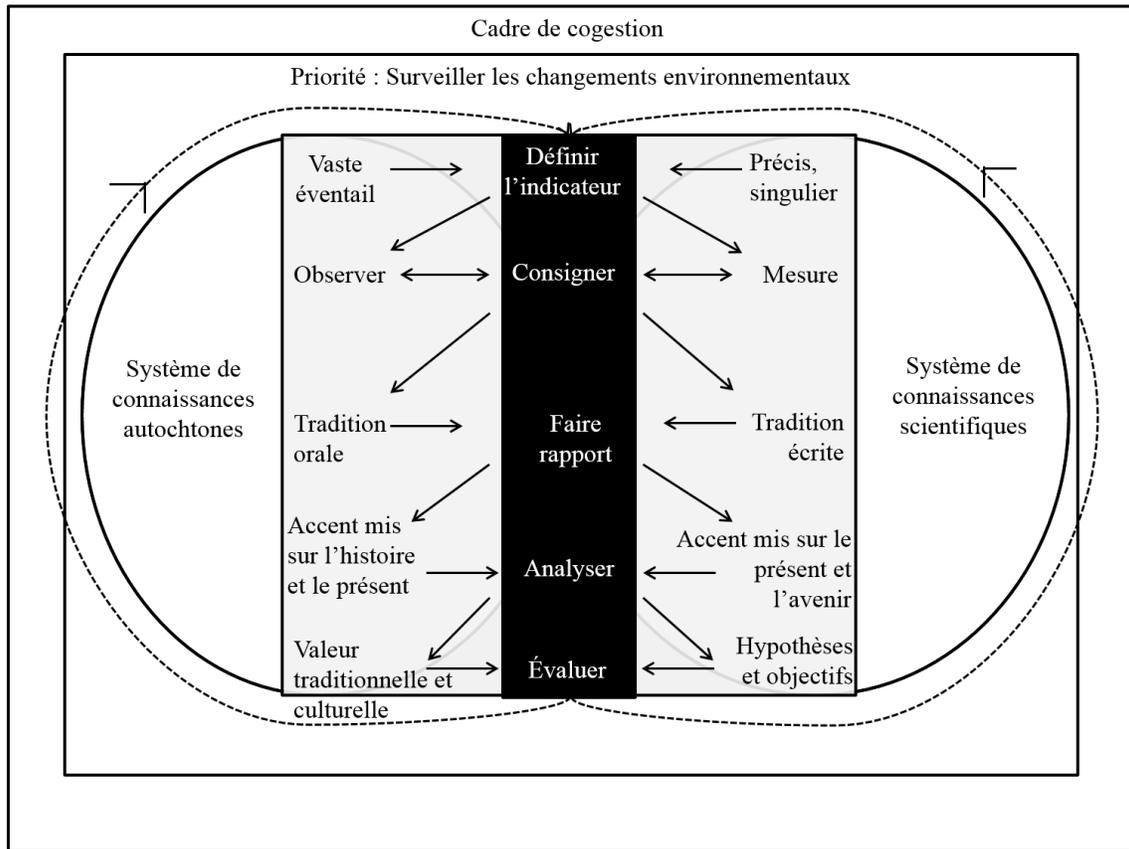


Figure 100. Modèle établi pour la science participative afin de surveiller l'évolution de l'Arctique canadien. Dans le cadre d'une priorité commune de surveillance des changements environnementaux, la science participative (carré gris) peut faire le pont entre les systèmes de connaissances autochtones et scientifiques (cercles blancs). Les flèches représentent le flux contributif d'information provenant du cadre général de la science participative (rectangle noir) qui est dirigé vers chaque système de connaissances et de nouveau vers le cadre à chaque étape du processus, ce qui égalise la valeur de l'information tirée des connaissances scientifiques et des connaissances autochtones et contribue à la coproduction du savoir. Un élément clé du modèle est le processus interactif d'établissement de rapports et les communications continues entre les participants (source : Dunmall et Reist 2018).

ÉTUDE DE CAS 19: Surveillance écologique et gestion du béluga, et relations humaines

Chaque été, des milliers de bélugas de l'est de la mer de Beaufort, les qilalukkaqs (*Delphinapterus leucas*), se regroupent dans l'estuaire du Mackenzie, dans les eaux canadiennes de la mer de Beaufort. Cette population est reconnue comme étant l'une des plus importantes au Canada, avec environ 40 000 individus (Harwood 1996; Hill et Demaster 1999). La chasse de subsistance de ces bélugas par les Inuvialuit, les Inuits de l'ouest de l'Arctique canadien, a eu et continue d'avoir une grande importance économique, alimentaire et culturelle. Les bélugas de l'est de la mer de Beaufort sont cogérés par Pêches et Océans Canada (MPO) et le Comité mixte de gestion de la pêche (CMGP) sous la direction du Conseil inuvialuit de gestion du gibier, conformément à la Convention définitive des Inuvialuit (Canada 1984). La Convention définitive des Inuvialuit, le Plan de gestion du béluga de la mer de Beaufort et les efforts antérieurs de gestion de la conservation ont appuyé la collecte de données sur les prises de bélugas grâce à l'établissement de partenariats entre les organismes de cogestion et à la collaboration avec les comités locaux de chasseurs et de trappeurs (CCT)

Par conséquent, des données sur le béluga de l'est de la mer de Beaufort ont été recueillies pendant plus de 40 ans dans le cadre du programme de surveillance écologique des prises, un programme de surveillance écologique par les collectivités (Harwood et coll. 2002). Le programme a évolué pour devenir un point central réunissant des scientifiques, des membres de la collectivité et des conseils de cogestion qui travaillent en équipe pour répondre aux préoccupations de la collectivité et définir l'orientation de la recherche. En 2010, les zones de gestion du béluga désignées 1a sont devenues la première zone de protection marine de l'Arctique, la zone de protection marine (ZPM) de Tarium Niruitait (Loseto et coll. 2010). Une partie du cadre de surveillance et de gestion de la ZPM comprend le recours à des indicateurs qui sont utilisés pour mesurer et communiquer la santé de la ZPM. Au cours des 10 dernières années, le programme de surveillance écologique par les collectivités existant a pris de l'ampleur et de la profondeur pour inclure des indicateurs sur l'état du béluga, son régime alimentaire et sa santé, ce qui comprend la surveillance écologique des contaminants et des maladies et d'autres indicateurs physiologiques qui peuvent également être extrapolés à la santé des écosystèmes (Loseto et coll. 2018b). Même si la surveillance s'est élargie pour inclure de multiples indicateurs de santé et indicateurs écologiques, on a noté que le programme de surveillance écologique par les collectivités ne disposait d'aucun mécanisme pour inclure les vastes connaissances inuites, appelées connaissances écologiques locales et traditionnelles (CEL, CET), détenues par les Inuvialuit dans la RDI.

Les Inuvialuit et leurs ancêtres gèrent la population de façon durable depuis des centaines d'années (McGhee 1988; FJMC 2013). Ils ont acquis une connaissance approfondie du comportement et des caractéristiques liées à la santé des bélugas de la RDI. Grâce à

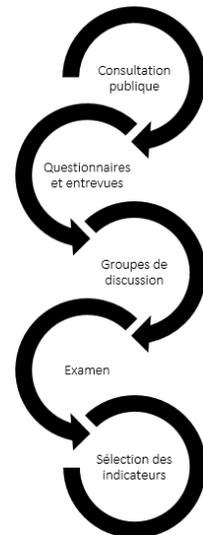


Figure 101. Processus suivi pour sélectionner les indicateurs de santé des bélugas avec les localités d'Inuvik, de Tuktoyaktuk et de Paulatuk.

l'établissement de relations de travail à long terme lors des activités de collaboration menées dans le cadre de divers projets liés au béluga, un projet a été lancé pour combler les lacunes relatives à l'intégration des CEL et des CET au programme de surveillance écologique par les collectivités axé sur le béluga (S. Ostertag, données non publiées). Dans le cadre d'un vaste processus de consultation (2012-2017), des indicateurs de l'état de santé et de la présence de maladies chez les bélugas ont été établis par les détenteurs de connaissances sur les bélugas dans les trois collectivités les plus actives dans la RDI : les localités d'Inuvik, de Tuktoyaktuk et de Paulatuk (S. Ostertag, données non publiées). Ce processus a mis l'accent sur le partage des connaissances des Inuvialuit, la communication fréquente et la rétroaction collaborative à diverses étapes de la recherche (S. Ostertag, données non publiées) (figure 101). Voici des exemples d'indicateurs établis par les trois collectivités : la couleur et la texture de la graisse ou *uqsuq*, la forme du corps (dos large ou rond, rouleaux de graisse décrits comme des « poignées d'amour ») et les signes d'infection. Ces indicateurs ont maintenant été intégrés au programme de surveillance écologique par les communautés des poissons et des mammifères marins du CMGP afin de garantir que les observations des Inuits sur la santé et l'état corporel des bélugas sont consignées pour les bélugas prélevés (figure 102).

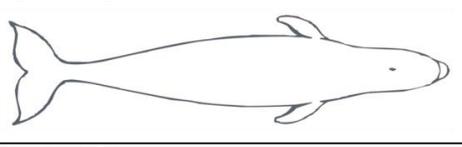
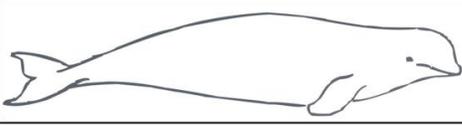
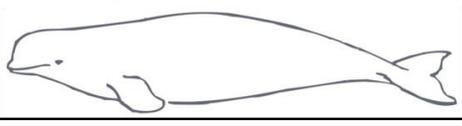
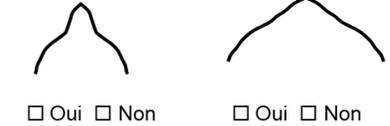
Renseignements sur les baleines		Numéro de la baleine prise : AREW - DL - 18 - _____	
Couleur: <input type="checkbox"/> Brun <input type="checkbox"/> Gris foncé <input type="checkbox"/> Gris <input type="checkbox"/> Blanc <input type="checkbox"/> Jaune Cette baleine a-t-elle des « poignées d'amour »? <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Sa colonne vertébrale est-elle saillante? <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non <input type="checkbox"/> Je ne sais pas. Veuillez indiquer sur le diagramme ci-dessous la forme qui correspond au dos de la baleine.			
Signes d'infection, blessures ou anomalies			
Avez-vous vu un signe d'infection (c.-à-d. blessure infectée, maktak en désintégration, masse dans le maktak)? <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non → Si oui, prenez une photo et prélevez un échantillon de la zone infectée et de la zone saine située à côté de la plaie. → Échantillon prélevé? <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Prise de photos? <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Zone d'infection indiquée sur le diagramme ci-dessous? <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non			
Des taches ont-elles été observées sur le foie de l'animal? <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Une odeur « différente » ou inhabituelle s'est-elle dégagée quand la baleine a été ouverte? <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Le chasseur a-t-il dit que la baleine semblait fatiguée? <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non → Si oui, veuillez essayer de prélever des échantillons des organes suivants. Mettre les échantillons dans des sacs refermables, inscrire le numéro d'identification des baleines sur les sacs et les congeler. → Échantillon prélevé : foie (zones avec et sans taches) <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Rein <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Rate <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Poumon <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Cœur <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non → Photos d'organes qui semblaient anormaux <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non			
Dessiner les anomalies sur les diagrammes ci-dessous		Lequel de ces dessins ressemble le plus à l'arrière de la baleine quand on la regarde de face et de dos?	
Vue de dessus : 	Description et commentaires	Vue de face : 	
Vue du côté droit : 	Description et commentaires	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Je ne sais pas <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Je ne sais pas	
Vue du côté gauche : 	Description et commentaires	Vue de l'arrière : 	
		<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Je ne sais pas <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Je ne sais pas	

Figure 102. Fiche de surveillance des bélugas du CMGP/MPO (feuille 1 de 2) qui comprend des indicateurs fondés sur les CET.

Le succès des indicateurs de santé des bélugas établis par les collectivités est en grande partie attribuable aux observations annuelles répétées des pêcheurs actifs sur le terrain et à leurs interactions avec les bélugas. Les connaissances des Inuvialuit sur la chasse au béluga sont dynamiques et bien ancrées dans la tradition transmise par l’histoire orale, mais aussi dans les observations locales en constante évolution. Cependant, malgré ces activités intergénérationnelles de chasse au béluga, des changements récents – tant environnementaux que sociaux – ont eu des répercussions sur les relations entre l’homme et le béluga dans la région. Par exemple, la communauté d’Aklavik, qui a une longue tradition de chasse au béluga active, a connu un déclin marqué de ses prises annuelles de baleines (Worden 2018) (figure 103).

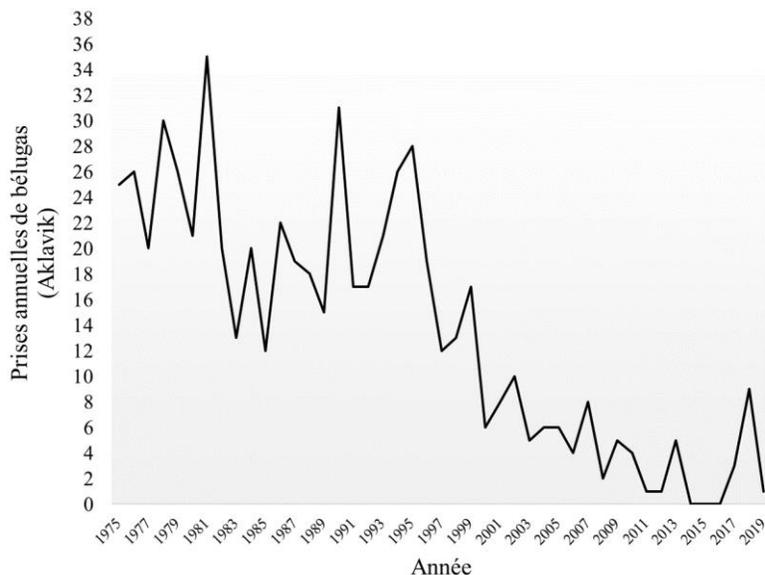


Figure 103. Récolte annuelle de bélugas par la bande Aklavik de 1975 à 2019 (source : CMGP).

Une autre étude sur les CET a été menée pour tenter de comprendre les causes du déclin de la chasse au béluga. La collecte de CET a démontré que les aînés et les adultes expérimentés d’Aklavik continuent de savoir comment chasser avec succès. Cependant, les changements environnementaux et sociaux se conjuguent pour créer une nouvelle réalité où la chasse au béluga est impossible pour de nombreux membres de la collectivité. L’évolution de l’environnement (augmentation des tempêtes et érosion ou effondrement des deltas) nuit à l’accès à la côte et à la sécurité sur l’océan et influe sur l’érosion des terres où sont situés les camps de chasse côtiers de prédilection. Parmi les autres facteurs clés, mentionnons le coût de la chasse et du carburant, ainsi que le faible nombre d’emplois stables disponibles à Aklavik pour couvrir le coût de la chasse au béluga. Enfin, les valeurs changent à Aklavik avec le décès des aînés et l’influence de la culture du Sud. Parce que la chasse au béluga est basée sur le partage, le travail d’équipe et la patience et que ces valeurs changent, la façon de chasser les baleines et le choix de le faire ou non changent aussi. Shingle Point est maintenant le principal campement utilisé en été pour la pêche côtière, mais il ne s’agit pas d’un lieu idéal pour la chasse à la baleine. La vie est trop bruyante au campement et les baleines restent loin en eau profonde, ce qui rend la chasse dangereuse, difficile et coûteuse (Worden 2018). Avec les changements climatiques et la modernisation qui prévalent dans l’Arctique, les changements observés à l’égard de l’utilisation des ressources marines par la communauté d’Aklavik peuvent être observés ou se manifester de différentes façons dans les collectivités arctiques.

ANNEXE A : Dépendance entre la glace de mer et les mammifères marins dans l'Arctique canadien.

Dépendance espèces-glace	Préférences sur l'état de la glace de mer
Espèce dépendante de la glace	
Ours polaire	Forte association avec la glace de rive et la banquise annuelle dense. Dépend de la glace de mer pour atteindre les zones de mise bas et comme plateforme de chasse.
Morse	Utilisation de sites spécifiques selon le sexe pour s'échouer; souvent pendant l'hiver dans les polynies; fortement associé à la banquise annuelle dense et à l'eau peu profonde.
Phoque barbu	Généralement associé à l'eau peu profonde sur le plateau continental, à la banquise annuelle dense ou lâche en mouvement, aux chenaux côtiers et aux polynies.
Phoque annelé	Large éventail, très diversifié. Fortement associé à la glace de rivage, modérément associé à la banquise annuelle dense ou lâche. Glace à la dérive et glace de rivage utilisées pour la reproduction.
Espèce associée à la glace	
Baleine boréale	Polynies en hiver/au printemps, eaux libres ou couverture de glace de mer légère en été, associée au plateau continental et à aux remontées d'eau pour l'alimentation.
Béluga	Divers : associé à la banquise annuelle et pluriannuelle lâche, aux polynies, aux eaux peu profondes du plateau continental et aux eaux profondes libres de glace.
Narval	Forte association avec la banquise annuelle dense, les chenaux/les zones de dislocation et la rupture de pente continentale/les zones d'hivernage profondes.
Migrateur saisonnier	
Phoque du Groenland	Utilise la glace de mer pour la reproduction et peut évoluer dans la glace de mer et s'échouer sur les glaciers et la glace en marche pour se reposer.
Baleine grise	Population du Pacifique Nord à capacité de charge ou presque; taux de mise bas positivement corrélé aux conditions sans glace dans les eaux arctiques
Baleine à bec commune	Densités relativement faibles dans les eaux subarctiques froides profondes (> 500 m) du détroit de Davis, de la mer du Labrador et de la mer du Groenland. Peut tolérer les zones à faible concentration de glace.
Petit rorqual	Peut s'adapter à de faibles concentrations de glace.
Cachalot macrocéphale	Les mâles utilisent les régions à latitude élevée pour s'alimenter pendant la période estivale de glace de mer minimum.

Rorqual à bosse	Habituellement près des côtes, et peut effectuer de longues migrations saisonnières qui comprennent l'utilisation des eaux arctiques en été; mais quitte habituellement la région avant la formation de la glace.
Phoque commun	Longue association avec les régions subarctiques. Espèce des zones tempérées habituellement, mais peut s'adapter aux conditions saisonnières de glace de mer.

ANNEXE B. Situation de résidence, répartition saisonnière, disponibilité des estimations de l'abondance et tendances de l'abondance des mammifères marins dans l'Arctique canadien.

Nom commun	Situation de résidence	Populations/stocks	Répartition estivale/hivernale	Estimations de l'abondance	Tendance de l'abondance	Référence
Résidents						
Pinnipèdes						
Morse	Résident à longueur d'année	Bassin Foxe	Nord et centre du bassin Foxe	Oui	Incertaine	Stewart et Hamilton, 2013; MPO, 2016c
		Détroit d'Hudson/détroit de Davis	Détroit d'Hudson/détroit de Davis	Oui	Incertaine	MPO, 2016d
		Sud et est de la baie d'Hudson	Sud et est de la baie d'Hudson	Oui	Inconnue	MPO, 2016d
		Baie de Baffin	Baie de Baffin	Oui	Inconnue	MPO, 2013d
		Détroit de Penny et détroit de Lancaster	Détroit de Penny et détroit de Lancaster	Oui	Inconnue	MPO, 2013d
		Ouest du détroit de Jones	Ouest du détroit de Jones	Oui	Inconnue	MPO, 2013d
Phoque annelé	Résident à longueur d'année		Circumpolaire à longueur d'année	Oui	Inconnue	Reeves, 1998
Phoque barbu	Résident à longueur d'année		Circumpolaire à longueur d'année	Oui	Inconnue	Cleator, 1996; Cameron et coll., 2010
Cétacés						

Nom commun	Situation de résidence	Populations/stocks	Répartition estivale/hivernale	Estimations de l'abondance	Tendance de l'abondance	Référence
Narval	Résident à longueur d'année	Île Somerset	Île Somerset en été/baie de Baffin en hiver	Oui	Inconnue	Heide-Jørgensen et coll., 2003; Doniol-Valcroze et coll., 2015a
		Détroit d'Éclipse	Détroit d'Éclipse en été/baie de Baffin en hiver	Oui	Inconnue	Watt et coll., 2012; Doniol-Valcroze et coll., 2015a
		Bras Admiralty	Bras Admiralty en été/baie de Baffin en hiver	Oui	Inconnue	Watt et coll., 2012; Doniol-Valcroze et coll., 2015a
		Détroit de Jones	Détroit de Jones en été/baie de Baffin Bay et polynie des eaux du Nord en hiver	Oui	Inconnue	Doniol-Valcroze et coll., 2015a
Narval	Résident à longueur d'année	Est de l'île de Baffin	Est de l'île de Baffin en été/baie de Baffin en hiver	Oui	Inconnue	Doniol-Valcroze et coll., 2015a
		Détroit de Smith	Détroit de Smith en été/baie de Baffin et eaux du Nord en hiver	Oui	Inconnue	Doniol-Valcroze et coll., 2015a
		Nord de la baie d'Hudson	Nord de la baie d'Hudson en été/mer du Labrador en hiver	Oui	Inconnue	Asselin et coll., 2012; Watt et coll., 2017
Béluga	Résident à longueur d'année	Est de la mer de Beaufort	Est de la mer de Beaufort en été/ouest de la mer des Tchouktches et détroit de Béring en hiver	Oui	Inconnue	Harwood et coll., 1996; Stafford et coll., 2018
		Baie Cumberland	Baie Cumberland à longueur d'année	Oui	Inconnue	Marcoux et coll., 2016; Watt et coll., 2016
		Est de l'Extrême-	Zone de l'île Somerset en été/polynie des	Oui	Inconnue	Koski et coll., 2002

Nom commun	Situation de résidence	Populations/stocks	Répartition estivale/hivernale	Estimations de l'abondance	Tendance de l'abondance	Référence
		Arctique/baie de Baffin	eaux du Nord en hiver			
		Ouest de la baie d'Hudson	Ouest de la baie d'Hudson en été/détroit d'Hudson en hiver	Oui	Inconnue	MPO, 2018b
		Baie James	Baie James en été/détroit d'Hudson en hiver	Oui	Inconnue	MPO, 2018b
		Est de la baie d'Hudson	Est de la baie d'Hudson en été/mer du Labrador en hiver	Oui	Inconnue	Lewis, 2009; MPO, 2018b
Baleine boréale	Résident à longueur d'année	Est du Canada-Ouest du Groenland	Autour de l'île de Baffin l'été/banquise non consolidée dans les mêmes régions l'hiver	Oui	En cours de rétablissement	Doniol-Valcroze et coll., 2015b
Baleine boréale	Résident à longueur d'année	Béring–Tchouktche–Beaufort	Mer de Beaufort en été/mer de Bering et migration dans la mer des Tchouktches en hiver	Oui	En cours de rétablissement	COSEPAC, 2009; Schweder et coll., 2010
Ours polaire						
	Résident à longueur d'année	Baie de Baffin	Zones couvertes de glace de mer	Oui	Inconnue	Durner et coll., 2018
	Résident à longueur d'année	Détroit de Davis	Zones couvertes de glace de mer	Oui	Stable	Durner et coll., 2018
	Résident à longueur d'année	Bassin Foxe	Zones couvertes de glace de mer	Oui	Stable	Durner et coll., 2018
	Résident à longueur d'année	Golfe de Boothia	Zones couvertes de glace de mer	Oui	Inconnue	Durner et coll., 2018
	Résident à longueur d'année	Bassin Kane	Zones couvertes de glace de mer	Oui	En augmentation	Durner et coll., 2018

Nom commun	Situation de résidence	Populations/stocks	Répartition estivale/hivernale	Estimations de l'abondance	Tendance de l'abondance	Référence
	Résident à longueur d'année	Détroit de Lancaster	Zones couvertes de glace de mer	Oui	Inconnue	Durner et coll., 2018
	Résident à longueur d'année	Détroit de M'Clintock	Zones couvertes de glace de mer	Oui	Inconnue	Durner et coll., 2018
	Résident à longueur d'année	Nord de la mer de Beaufort	Zones couvertes de glace de mer	Oui	Stable	Durner et coll., 2018
	Résident à longueur d'année	Baie Norwegian	Zones couvertes de glace de mer	Oui	Inconnue	Durner et coll., 2018
	Résident à longueur d'année	Sud de la mer de Beaufort	Zones couvertes de glace de mer	Oui	Probablement en déclin	Durner et coll., 2018
	Résident à longueur d'année	Sud de la baie d'Hudson	Zones couvertes de glace de mer	Oui	Probablement en déclin	Durner et coll., 2018
	Résident à longueur d'année	Détroit du Vicomte de Melville	Zones couvertes de glace de mer	Oui	Inconnue	Durner et coll., 2018
	Résident à longueur d'année	Ouest de la baie d'Hudson	Zones couvertes de glace de mer	Oui	Probablement en déclin	Durner et coll., 2018
Migrateurs						
Pinnipèdes						
Phoque du Groenland	Migrateur saisonnier		Terre-Neuve	Inconnue	En augmentation	
Phoque à capuchon	Migrateur saisonnier		Terre-Neuve	Inconnue	Inconnue	
Phoque à bandes	Migrateur saisonnier		Mer de Béring	Inconnue	Inconnue	
Phoque tacheté	Migrateur saisonnier		Mer de Béring	Inconnue	Inconnue	
Phoque commun	Migrateur saisonnier		Subarctique côtier	Inconnue	Inconnue	
Cétacés						
Épaulard	Migrateur saisonnier			Estimation minimale	Inconnue	Young et coll., 2011
Dauphin commun	Migrateur saisonnier			Inconnue	Inconnue	

Nom commun	Situation de résidence	Populations/stocks	Répartition estivale/hivernale	Estimations de l'abondance	Tendance de l'abondance	Référence
Rorqual bleu	Migrateur saisonnier			Inconnue	Inconnue	
Rorqual boréal	Migrateur saisonnier			Inconnue	Inconnue	
Petit rorqual	Migrateur saisonnier			Inconnue	Inconnue	
Cachalot macrocéphale	Migrateur saisonnier			Inconnue	Inconnue	
Baleine à bec commune	Migrateur saisonnier			Inconnue	Inconnue	
Dauphin à nez blanc	Migrateur saisonnier			Inconnue	Inconnue	Reinhart et coll., 2014
Dauphin à flancs blancs	Migrateur saisonnier			Inconnue	Inconnue	
Rorqual commun	Migrateur saisonnier			Oui	Inconnue	Heide-Jørgensen et coll., 2010
Rorqual à bosse	Migrateur saisonnier			Inconnue	Inconnue	

9.0 RÉFÉRENCES

- Abadi, S.H., Thode, A.M., Blackwell, S.B., et Dowling, D.R. 2014. Ranging bowhead whale calls in a shallow-water dispersive waveguide. *J. Acoust. Soc. Am.* 136: 130–144. doi : 10.1121/1.4881924.
- AMAP. 2017. Chemicals of emerging Arctic concern. Summary for policy-makers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. 16 p. Disponible du <https://www.amap.no/documents/doc/chemicals-of-emerging-arctic-concern.-summary-for-policy-makers/1533> [date d'accès 14 February 2019].
- AMAP. 2018a. AMAP Assessment 2018: Biological effects of contaminants on Arctic wildlife and fish. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. vii + 84 p. Disponible du <https://www.amap.no/documents/doc/amap-assessment-2018-biological-effects-of-contaminants-on-arctic-wildlife-and-fish/1663> [date d'accès 14 February 2019].
- AMAP. 2018b. AMAP Assessment 2018: Arctic ocean acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway. vi + 187 p. Disponible du <https://www.amap.no/documents/doc/amap-assessment-2018-arctic-ocean-acidification/1659> [date d'accès 14 February 2019].
- Anderson, C.M. 2017. Annual spatial ecology of herring gulls (*Larus argentatus*) in Eastern North America. Thesis (M.Sc.) Acadia University, Wolfville, NS. xi + 125 p. Disponible du <https://scholar.acadiau.ca/islandora/object/theses:2159> [date d'accès 14 February 2019].
- Anderson, L.G., Andersson, P.S., Björk, B., Jones, E.P. Jutterström, S., et Wåhlström, I. 2013. Source and formation of the upper halocline of the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res. Oceans* 118 : 410–421. doi : 10.1029/2012JC008291.
- Andrews, J., Babb, D., et Barber, D.G. 2018. Climate change and sea ice : Shipping in Hudson Bay , Hudson Strait, and Foxe Basin (1980–2016). *Elem. Sci. Anth.* 6 : 19. doi : 10.1525/elementa.281.
- Archer, L., Ford, J.D., Pearce, T., Kowal, S., Gough, W.A., et Allurut, M. 2017. Longitudinal assessment of climate vulnerability: A case study from the Canadian Arctic. *Sustain. Sci.* 12 : 15–29. doi : 10.1007/s11625-016-0401-5.
- Ardyna, M., Gosselin, M., Michel, C., Poulin, M., et Tremblay, J.-É. 2011. Environmental forcing of phytoplankton community structure and function in the Canadian High Arctic: Contrasting oligotrophic and eutrophic regions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 442 : 37–57. doi : 10.3354/meps09378.

- Ardyna, M., Babin, M., Gosselin, M., Devred, E., Rainville, L., et Tremblay, J.-É. 2014. Recent Arctic Ocean sea ice loss triggers novel fall phytoplankton blooms. *Geophys. Res. Lett.* 41 : 6207–6212. doi : 10.1002/2014GL061047.
- Ardyna, M., Babin, M., Devred, E., Forest, A., Gosselin, M., Raimbault, P., et Tremblay, J.-É. 2017. Shelf-basin gradients shape ecological phytoplankton niches and community composition in the coastal Arctic Ocean (Beaufort Sea). *Limnol. Oceanogr.* 62 : 2113–2132. doi : 10.1002/lno.10554.
- Arnaquq-Baril, A. 2016. Angry Inuk https://www.nfb.ca/film/angry_inuk/ [Video].
- Arrigo, K.R., et van Dijken, G. L. 2015. Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Progr. Oceanogr.* 136 : 60–70. doi : 10.1016/j.pocean.2015.05.002.
- Arrigo, K.R., Perovich, D.K., Pickart, R.S., Brown, Z.W., van Dijken, G.L., Lowry, K.E., Mills, M.M., Palmer, M.A., Balch, W.M., Bahr, F., Bates, N.R., Benitez-Nelson, C., Bowler, B., Brownlee, E., Ehn, J.K., Frey, K.E., Garley, R., Laney, S.R., Lubelczyk, L., Mathis, J., Matsuoka, A., Mitchell, B.G., Moore, G.W.K., Ortega-Retuerta, E., Pal, S., Polashenski, C.M., Reynolds, R.A., Scheiber, B., Sosik, H.M., Stephens, M., et Swift, J.H. 2012. Massive phytoplankton blooms under Arctic sea ice. *Science* 336 : 1408. doi : 10.1126/science.1215065.
- Arrigo, K.R., Perovich, D.K., Pickart, R.S., Brown, Z.W., van Dijken, G.L., Lowry, K.E., Mills, M.M., Palmer, M.A., Balch, W.M., Bates, N.R., Benitez-Nelson, C.R., Brownlee, E., Frey, K.E., Laney, S.R., Mathis, J., Matsuoka, A., Mitchell, B.G., Moore, G.W.K., Reynolds, R.A., Sosik, H.M., et Swift, J.H. 2014. Phytoplankton blooms beneath the sea ice in the Chukchi sea. *Deep Sea Res. II* 105 : 1–16. doi : 10.1016/j.dsr2.2014.03.018.
- Aslam, S., Michel, C., Niemi, A., et Underwood, G. 2016. Patterns and drivers of carbohydrate budgets in ice algal assemblages from first-year Arctic sea ice. *Limnol. Oceanogr.* 61 : 919–937. doi : 10.1002/lno.10260.
- Asselin, N.C., Ferguson, S.H., Richard, P.R., et Barber, D.G. 2012. Results of narwhal (*Monodon monoceros*) aerial surveys in northern Hudson Bay, August 2011. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2012/037. iii + 23 p. Disponible du <http://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/347183.pdf> [date d'accès 07 February 2019].
- Assmy P., Fernández-Méndez, M., Duarte, P., Meyer, A., Randelhoff, A., Mundy, C.J., Olsen, L.M., Kauko, H.M., Bailey, A., Chierici, M., Cohen, L., Doulgeris, A.P., Ehn, J.K., Fransson, A., Gerland, S., Hop, H., Hudson, S.R., Hughes, N., Itkin, P., Johnsen, G., King, J.A., Koch, B.P., Koenig, Z., Kwasniewski, S., Laney, S.R., Nicolaus, M., Pavlov, A.K., Polashenski, C.M., Provost, C., Rösel, A., Sandbu, M., Spreen, G., Smedsrud, L.H., Sundfjord, A., Taskjelle, T., Tatarek, A., Wiktor, J., Wagner, P.M., Wold, A., Steen, H., et Granskog, M.A. 2017. Leads in Arctic pack ice enable early phytoplankton blooms below snow-covered sea ice. *Sci. Rep.* 7 : 40850. doi : 10.1038/srep40850.

- Aulanier, F., Simard, Y., Roy, N., Gervaise, C., et Bandet, M. 2017. Effects of shipping on marine acoustic habitats in Canadian Arctic estimated via probabilistic modeling and mapping. *Mar. Pollut. Bull.* 125 : 115–131. doi : 10.1016/j.marpolbul.2017.08.002.
- Azetsu-Scott, K., Clarke, A., Falkner, K., Hamilton, J., Jones, E.P., Lee, C., Petrie, B., Prinsenberg, S., Starr, M., et Yeats, P. 2010. Calcium carbonate saturation states in the waters of the Canadian Arctic Archipelago and the Labrador Sea. *J. Geophys. Res.* 115: 1–18. doi : 10.1029/2009JC005917.
- Azetsu-Scott, K., Starr, M., Mei, Z.-P., et Granskog, M. 2014. Low calcium carbonate saturation state in an Arctic inland sea having large and varying fluvial inputs: The Hudson Bay system. *J. Geophys. Res. : Oceans* 119 : 6210–6220. doi : 10.1002/2014JC009948.
- Baffinland. 2018. Popular summary: Mary River Project phase 2 proposal. 17 p. Disponible du www.baffinland.com/wp-content/uploads/2018/10/EIS-Popular-Summary-English.pdf [date d'accès 08 August 2019].
- Barber, D.G., Hop, H., Mundy, C.J., Else, B., Dmitrenko, I.A., Tremblay, J.-É., Ehn, J.K., Assmy, P., Daase, M., Candlish, L.M., et Rysgaard, S. 2015. Selected physical, biological and biogeochemical implications of a rapidly changing Arctic marginal ice zone. *Prog. Oceanogr.* 139 : 122–150. doi : 10.1016/j.pocean.2015.09.003.
- Barkley, A.N., Fisk, A.T., Hedges, K.J., Treble, M.A., et Hussey, N.E. 2018. Transient movements of a deep-water flatfish in coastal waters: Implications of inshore-offshore connectivity for fisheries management. *J. Appl. Ecol.* 55 : 1071–1081. doi : 10.1111/1365-2664.13079.
- Barrows, A.P.W., Cathey, S.E., et Petersen, C.W. 2018. Marine environment microfiber contamination: Global patterns and the diversity of microparticle origins. *Environ. Pollut.* 237 : 275–284. doi : 10.1016/j.envpol.2018.02.062.
- Beck, G.G., Hammill, M.O., et Smith, T.G. 1993. Seasonal variation in the diet of harp seals (*Phoca groenlandica*) from the Gulf of St. Lawrence and Western Hudson Strait. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 50 : 1363–1371.
- Beck, T. 1994. Alexander Charles Aviugana (1945–1994). *Arctic* 47 : 319. doi : 10.14430/arctic1302.
- Bélanger, S., Çizmeli, S.A., Ehn, J., Matsuoka, A., Doxaran, D., Hooker, S., et Babin, M. 2013. Light absorption and partitioning in Arctic Ocean surface waters: Impact of multiyear ice melting. *Biogeosciences* 10 : 6433–6452. doi : 10.5194/bg-10-6433-2013.
- Bell, L.E., Bluhm, B.A., et Iken, K. 2016. Influence of terrestrial organic matter in marine food webs of the Beaufort Sea shelf and slope. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 550 : 1–24. doi : 10.3354/meps11725.

- Bell, R. 2009. Billy Joseph Day, whale hunter, trapper, environmentalist, September 15, 1930–July 16, 2008. *Globe and Mail, Lives Lived*. 2009, 21 January.
- Bell, R.K., et Harwood, L.A. 2012. Harvest-based monitoring in the Inuvialuit Settlement Region: Steps for success. *Arctic* 65 : 421–432. doi : 10.14430/arctic4240.
- Belt, S.T., Massé, G., Rowland, S.J., Poulin, M., Michel, C., et LeBlanc, B. 2007. A novel chemical fossil of paleo sea ice: IP₂₅. *Org. Geochem.* 38 : 16–27. doi : 10.1016/j.orggeochem.2006.09.013.
- Berge, J., Cottier, F.R., Last, K.S., Varpe, Ø., Leu, E., Søreide, J.E., Eiane, K., Falk-Petersen, S., Willis, K.J., Nygård, H., Vogedes, D., Griffiths, C., Johnsen, G., Lorentzen, D.A., et Brierley, A.S. 2009. Diel vertical migration of Arctic zooplankton during the polar night. *Biol. Lett.* 5 : 69–72. doi : 10.1098/rsbl.2008.0484.
- Bergeron, M., et Tremblay, J.-É. 2014. Shifts in biological productivity inferred from nutrient drawdown in the southern Beaufort Sea (2003–2011) and northern Baffin Bay (1997–2011), *Canadian Arctic. Geophys. Res. Lett.* 41 : 3979–3987. doi : 10.1002/2014GL059649.
- Berkes, F., Colding, J., et Folke, C. 2000. Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management. *Ecol. Appl.* 10 : 1251–1262. doi : 10.2307/2641280.
- Berkes, F., Berkes, M.K., et Fast, H. 2007. Collaborative integrated management in Canada's North: The role of local and traditional knowledge and community-based monitoring. *Coast. Manage.* 35 : 143–162. doi : 10.1080/08920750600970487.
- Blackwell, S.B., Nations, C.S., McDonald, T.L., Greene, C.R., Thode, A.M., Guerra, M., et Michael Macrander, A. 2013. Effects of airgun sounds on bowhead whale calling rates in the Alaskan Beaufort Sea. *Mar. Mammal Sci.* 29 : E342–E365. doi : 10.1111/mms.12001.
- Blais, M., Tremblay, J.-É., Jungblut, A. D., Gagnon, J., Martin, J., Thaler, M., et Lovejoy, C. 2012. Nitrogen fixation and identification of potential diazotrophs in the Canadian Arctic. *Global Biogeochem. Cycles*, 26, GB3022, doi : 10.1029/2011GB004096.
- Blais, M., Ardyna, M., Gosselin, M., Dumont, D., Bélanger, S., Tremblay, J.-É., Gratton, Y., Marchese, C., et Poulin, M. 2017. Contrasting interannual changes in phytoplankton productivity and community structure in the coastal Canadian Arctic Ocean. *Limnol. Oceanogr.* 62 : 2480–2497. doi : 10.1002/lno.10581.
- Bluhm, B.A., Gebruk, A.V., Gradinger, R., Hopcroft, R.R., Huettmann, F., Kosobokova, K.N., Sirenko, B.I., et Weslawski, J.M. 2011. Arctic marine biodiversity: An update of species richness and examples of biodiversity change. *Oceanography* 24 : 232–248. doi : 10.5670/oceanog.2011.75.

- Bluhm, B.A., Hop, H., Melnikov, I.A., Poulin, M., Vihtakari, M., Collins, R.E., Gradinger, R., Juul-Pedersen, T., et von Quillfeldt, C. 2017. Sea ice biota. *In* State of the Arctic Marine Biodiversity Report. Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat, Akureyri, Iceland. pp. 33–60. Disponible du <https://oaarchive.arctic-council.org/handle/11374/1945> [date d'accès 07 February 2019].
- Boetius, A., Albrecht, S., Bakker, K., Bienhold, C., Felden, J., Fernández-Méndez, M., Hendricks, S., Katlein, C., Lalande, C., Krumpfen, T., Nicolaus, M., Peeken, I., Rabe, B., Togacheva, A., Rybakova, E., Somavilla, R., Wenzhöfer, F., et RV Polarstern ARK27-3-Shipboard Science Party. 2013. Export of algal biomass from the melting Arctic sea ice. *Science* 339 : 1430–1432. doi : 10.1126/science.1231346.
- Bonnell, J., Thode, A.M., Blackwell, S.B., Kim, K., et Macrander, A.M. 2014. Range estimation of bowhead whale (*Balaena mysticetus*) calls in the Arctic using a single hydrophone. *J. Acoust. Soc. Am.* 136 : 145–155. doi : 10.1121/1.4883358.
- Bouchard, C., Geoffroy, M., LeBlanc, M., Majewski, A., Gauthier, S., Walkusz, W., Reist, J.D., et Fortier, L. 2017. Climate warming enhances polar cod recruitment, at least transiently. *Prog. Oceanogr.* 156 : 121–129. doi : 10.1016/j.pcean.2017.06.008
- Bouchard, C., Geoffroy, M., LeBlanc, M., et Fortier, L. 2018. Larval and adult fish assemblages along the Northwest Passage: The shallow Kitikmeot and the ice-covered Parry Channel as potential barriers to dispersal. *Arctic Science* 4 : 781–793. doi : 10.1139/as-2018-0003.
- Bourke, R.H., et Garrett, R.P. 1987. Sea ice thickness distribution in the Arctic Ocean. *Cold Reg. Sci. Technol.* 13 : 259–280. doi : 10.1016/0165-232X(87)90007-3.
- Bowering, W.R., et Lilly, G.R. 1982. Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) off southern Labrador and northeastern Newfoundland (Northwest Atlantic) feed primarily on capelin (*Mallotus villosus*). *Neth. J. Sea Res.* 29 : 211–222. doi : 10.1016/0077-7579(92)90021-6.
- Bowman, J.S., Rasmussen, S., Blom, N., Deming, J.W., Rysgaard, S., et Sichert-Ponten, T. 2012. Microbial community structure of Arctic multiyear sea ice and surface seawater by 454 sequencing of the 16S RNA gene. *ISME J.* 6 : 11–20. doi : 10.1038/ismej.2011.76.
- Boyce, D.G., Frank, K.T., Worm, B., et Leggett, W.C. 2015. Spatial patterns and predictors of trophic control in marine ecosystems. *Ecol. Lett.* 18 : 1001–1011. doi : 10.1111/ele.12481.
- Boyer, T.P., Antonov, J.I., Baranova, O.K., Coleman, C., Garcia, H.E., Grodsky, A., Johnson, D.R., Locarnini, R.A., Mishonov, A.V., O'Brien, T.D., Paver, C.R., Reagan, J.R., Seidov, D., Smolyar, I.V. and Zweng, M.M. 2013. World ocean database 2013. Silver Spring, MD, NOAA Printing Office, 208pp. (NOAA Atlas NESDIS, 72). <http://hdl.handle.net/11329/357>.

- Breed, G.A., Matthews, C.J.D., Marcoux, M., Higdon, J.W., LeBlanc, B., Petersen, S.D., Orr, J., Reinhart, N.R., et Ferguson, S.H. 2017. Sustained disruption of narwhal habitat use and behaviour in the presence of Arctic killer whales. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 114 : 2628–2633. doi : 10.1073/pnas.1611707114.
- Brewster, J.D., Giraldo, C., Swanson, H., Walkusz, W., Loewen, T.N., Reist, J.D., Stern, G.A., et Loseto, L.L. 2016. Ecological niche of coastal Beaufort Sea fishes defined by stable isotopes and fatty acids. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 559 : 159–173. doi : 10.3354/meps11887.
- Brown, L., et H. Fast. 2012. An overview of important ecological and biological marine features in Nunavut based on local knowledge. *Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2976 : vi + 54pp. Disponible du <http://publications.gc.ca/site/eng/9.575128/publication.html> [date d'accès 07 February 2019].
- Brown, R.D., et Cote, P. 1992. Interannual variability of landfast ice thickness in the Canadian High Arctic, 1950-89. *Arctic* 45 : 273–284. doi : 10.14430/arctic1402.
- Brown, T.A., Alexander, C., Yurkowski, D.J., Ferguson, S.H., et Belt, S.T. 2014a. Identifying variable sea ice carbon contributions to the Arctic ecosystem: A case study using highly branched isoprenoid lipid biomarkers in Cumberland Sound ringed seals. *Limnol. Oceanogr.* 59 : 1581–1589. doi : 10.4319/lo.2014.59.5.1581.
- Brown, T.A., Belt, S.T., Tatarek, A., et Mundy, C.J. 2014b. Source identification of the Arctic sea ice proxy IP₂₅. *Nat. Comm.* 5 : 4197. doi : 10.1038/ncomms5197.
- Brown, T.A., Chrystal, E., Ferguson, S.H., Yurkowski, D.J., Watt, C., Hussey, N.E., Kelley, T.C., et Belt, S.T. 2017a. Coupled changes between the H-Print biomarker and $\delta^{15}\text{N}$ indicates a variable sea ice carbon contribution to the diet of Cumberland Sound beluga whales. *Limnol. Oceanogr.* 62 : 1606–1619. doi : 10.1002/lno.10520.
- Brown, T.A., Assmy, P., Hop, H., Wold, A. and Belt, S.T. 2017b. Transfer of ice algae carbon to ice-associated amphipods in the high-Arctic pack ice environment. *J. Plankton Res.* 39 : 664–674. doi : 10.1093/plankt/fbx030.
- Brown, T.A., Galicia, M.P., Thiemann, G.W., Belt, S.T., Yurkowski, D.J., et Dyck, M.G. 2018. High contributions of sea ice derived carbon in polar bear (*Ursus maritimus*) tissue. *PLoS ONE* 13 : e0191631. doi : 10.1371/journal.pone.0191631.
- Brown, T.M., Edinger, E.N., Hooper, R.G., et Belliveau, K. 2011. Benthic marine fauna and flora of two nearshore coastal locations in the western and central Canadian Arctic. *Arctic* 64 : 281–301. doi : 10.14430/arctic4119.
- Brown, T.M., Macdonald, R.W., Muir, D.C.G., et Letcher, R.J. 2018. The distribution and trends of persistent organic pollutants and mercury in marine mammals from Canada's Eastern Arctic. *Sci. Total Environ.* 618 : 500–517. doi : 10.1016/j.scitotenv.2017.11.052.

- Burnham, K.K., Johnson, J.A., Konkel, B., et Burnham, J.L. 2012. Nesting common eider (*Somateria mollissima*) population quintuples in Northwest Greenland. *Arctic* 65 : 456–464. doi : 10.14430/arctic4243.
- Burt, W.J., Thomas, H., Miller, L.A., Granskog, M.A., Papakyriakou, T.N., et Pengelly, L. 2016. Inorganic carbon cycling and biogeochemical processes in an Arctic inland sea (Hudson Bay). *Biogeosciences* 13 : 4659–4671. doi : 10.5194/bg-13-4659-2016.
- Byers, T., Reist, J.D., et Sawatzky, C.D. 2019. Compilation and synopsis of literature on the traditional knowledge of Indigenous peoples in the Northwest Territories concerning Dolly Varden. *Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 3177 : vi + 63 p. Disponible du <http://publications.gc.ca/site/eng/9.873211/publication.html> [date d'accès 3 October 2019].
- CAFF. 2013. Arctic biodiversity assessment: Status and trends in Arctic biodiversity. Conservation of Arctic Flora and Fauna, Akureyri, Iceland. 674 p. Disponible du <https://oaarchive.arctic-council.org/handle/11374/223> [date d'accès 20 February 2019].
- CAFF. 2017. State of the Arctic marine biodiversity report. Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat, Akureyri, Iceland. 197 p. Disponible du <https://oaarchive.arctic-council.org/handle/11374/1945> [date d'accès 07 February 2019].
- CAFF and PAME. 2017. Arctic invasive alien species: Strategy and action plan. Conservation of Arctic Flora and Fauna and Protection of the Arctic Marine Environment Akureyri, Iceland. 19 p. Disponible du <https://www.caff.is/strategies-series/415-arctic-invasive-alien-species-strategy-and-action-plan> [date d'accès 11 February 2019].
- Cameron, M.F., Bengtson, J.L., Boveng, P.L., Jansen, J.K., Kelly B.P., Dahle, S.P., Logerwell, E.A., Overland, J.E., Sabine, C.L., Waring, G.T., et Wilder, J.M. 2010. Status review of the bearded seal (*Erignathus barbatus*). U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Memo. NMFS-AFSC-211 : 246 p. Disponible du <https://www.afsc.noaa.gov/publications/afsc-tm/noaa-tm-afsc-211.pdf> [date d'accès 07 February 2019].
- Campbell, K., Mundy, C.J., Landy, J.C., Delaforge, A., Michel, C., et Rysgaard, S. 2016. Community dynamics of bottom-ice algae in Dease Strait of the Canadian Arctic. *Prog. Oceanogr.* 149 : 27–39. doi : 10.1016/j.pocean.2016.10.005.
- Campbell, K., Mundy, C.J., Gosselin, M., Landy, J.C., Delaforge, A., et Rysgaard, S. 2017. Net community production in the bottom of first-year sea ice over the Arctic spring bloom. *Geophys. Res. Lett.* 44 : 8971–8978. doi : 10.1002/2017GL074602
- Canada. 1984. The Western Arctic claim: The Inuvialuit Final Agreement. Indian and Northern Affairs Canada, Ottawa. 259p. Disponible du http://webarchive.bac-lac.gc.ca:8080/wayback/20060205004956/http://www.ainc-inac.gc.ca/pr/agr/inu/wesar_e.pdf [date d'accès 08 February 2019].

- Carmack, E.C., et Macdonald, R.W. 2002. Oceanography of the Canadian Shelf of the Beaufort Sea: A setting for marine life. *Arctic* 55 : 29–45. doi : 10.14430/arctic733.
- Carmack, E.C., et Chapman, D.C. 2003. Wind-driven shelf/basin exchange on an Arctic shelf: The joint roles of ice cover extent and shelf-break bathymetry. *Geophys. Res. Lett.* 30 : 1778. doi : 10.1029/2003GL017526.
- Carmack, E.C., et Wassmann, P. 2006. Food webs and physical–biological couplings on pan-Arctic shelves: unifying concepts and comprehensive perspectives. *Prog. Oceanogr.* 71 : 446–477. doi : 10.1016/j.pocean.2006.10.004.
- Carmack, E.C., Yamamoto-Kawai, M., Haine, T.W.N., Bacon, S., Bluhm, B.A., Lique, C., Melling, H., Polyakov, I.V., Straneo, F., Timmermans, M.-L., et Williams, W.J. 2016. Freshwater and its role in the Arctic marine system: Sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 121 : 675–717. doi : 10.1002/2015JG003140.
- Caron, L.M.J., et Smith, T.G. 1990. Philopatry and site tenacity of belugas, *Delphinapterus leucas*, hunted by the Inuit at the Nastapoka Estuary, Eastern Hudson Bay. *Can. Bull. Fish. Aquat. Sci* 224 : 69–79.
- Casper, A.F., Rautio, M., Martineau, C., et Vincent, W.F. 2015. Variation and assimilation of Arctic riverine seston in the pelagic food web of the Mackenzie River Delta and Beaufort Sea transition zone. *Estuaries Coasts* 38 : 1656–1663. doi : [10.1007/s12237-014-9917-z](https://doi.org/10.1007/s12237-014-9917-z).
- CESCC [Canadian Endangered Species Conservation Council]. 2016. Wild species 2015: The general status of species in Canada. National General Status Working Group. 128 p. Available from <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/species-risk-public-registry/publications/wild-species-2015.html> [accessed 07 February 2019].
- Chambault, P., Albertsen, C.M., Patterson, T.A., Hanse, R.G., Tervo, O., Laidre, K.L., et Heide-Jørgensen, M.P. 2018. Sea surface temperature predicts the movements of an Arctic cetacean: The bowhead whale. *Sci. Rep.* 8 : 9658. doi : 10.1038/s41598-018-27966-1.
- Chan, F.T., Bronnenhuber, J.E., Bradie, J.N., Howland, K.L., Simard, N., et Bailey, S.A. 2012. Risk Assessment for ship-mediated introductions of aquatic nonindigenous species to the Canadian Arctic. *DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc.* 2011/105. vi + 93 p. Disponible du <http://publications.gc.ca/site/eng/457830/publication.html> [date d'accès 11 February 2019].
- Cheng, L., Abraham, J., Hausfather, Z., et Trenberth, K.E. 2019. How fast are the oceans warming? *Science*. 363 : 128–129. doi : 10.1126/science.aav7619.
- Chernova, N.V. 2011. Distribution patterns and chorological analysis of fish fauna of the Arctic region. *J. Ichthyol.* 51 : 825–924. doi : 10.1134/S0032945211100043.

- Cheung, W.L., Lam, V.W.Y., Sarmiento, J.L., Kearney, K., Watson, R., Zeller, D., et Pauly, D. 2010. Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. *Global Change Biol.* 16 : 24–35. doi : 10.1111/j.1365-2486.2009.01995.x
- Chierici, M., et Fransson, A. 2009. Calcium carbonate saturation in the surface water of the Arctic Ocean: Undersaturation in freshwater influenced shelves. *Biogeosciences* 6 : 2421–2432. doi : 10.5194/bg-6-2421-2009.
- Choy, E.S., Rosenberg, B., Roth, J.D., et Loseto, L.L. 2017. Inter-annual variation in environmental factors affect the prey and body condition of beluga whales in the eastern Beaufort Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 579 : 213–225. doi : 10.3354/meps12256.
- Christiansen, J.S., et Reist, J.D. (auteurs principaux). 2013. Fishes. *In Arctic Biodiversity Assessment: Status and trends in Arctic biodiversity. Edited by H. Meltofte. Conservation of Arctic Flora and Fauna, Akureyri, Iceland.* pp. 193–245. Disponible du <http://arcticlcc.org/assets/resources/ABA2013Science.pdf> [date d'accès 07 February 2019].
- Cleator, H.J. 1996. The status of the bearded seal, *Erignathus barbatus*, in Canada. *Can. Field-Nat.* 110 : 501–510.
- Coad, B.W., et Reist, J.D. (eds.). 2018. Marine fishes of Arctic Canada. Canadian Museum of Nature and University of Toronto Press, Toronto, ON. xiii + 618 p.
- Cobb, D., Fast, H., Papst, M.H., Rosenberg, D., Rutherford, R., et Sareault, J.E. 2008. Beaufort Sea large ocean management area: Ecosystem overview and assessment report. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2780 : ii-ix + 188 p. Disponible du http://publications.gc.ca/collections/collection_2012/mpo-dfo/Fs97-6-2780-eng.pdf [date d'accès 07 February 2019].
- Codispoti, L.A., Kelly, V., Thessen, A., Matrai, P., Suttles, S., Hill, V., Steele, M., et Light, B. 2013. Synthesis of primary production in the Arctic Ocean: III. Nitrate and phosphate based estimates of net community production. *Prog. Oceanogr.* 110 : 126–150. doi : 10.1016/j.pocean.2012.11.006.
- Conlan, K., Aitken, A., Hendrycks, E., McClelland, C., et Melling, H. 2008. Distribution patterns of Canadian Beaufort Shelf macrobenthos. *J. Mar. Syst.* 74 : 864–886. doi : 10.1016/j.marsys.2007.10.002.
- COSEPAC. 2009. Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur la baleine boréale *Balaena mysticetus* population des mers de Béring, des Tchoukches et de Beaufort et population de l'est du Canada et de l'ouest du Groenland au Canada – Mise à jour. Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. Ottawa. vii + 29 p. Disponible du <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/registre-public->

[especes-peril/evaluations-rapports-situations-cosepac/baleine-boreale.html](https://www.canada.ca/fr/especes-peril/evaluations-rapports-situations-cosepac/baleine-boreale.html) [date d'accès 07 February 2019].

- COSEPAC. 2017. Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur le morse de l'Atlantique (*Odobenus rosmarus rosmarus*) population du Haut-Arctique, population du centre de l'Arctique et du Bas-Arctique et population de la Nouvelle-Écosse, de Terre-Neuve et du golfe du Saint-Laurent, au Canada. Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. Ottawa. Ottawa. xxii + 103 pp. Disponible du <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/registre-public-especes-peril/evaluations-rapports-situations-cosepac/morse-atlantique-2017.html> [date d'accès 08 February 2019].
- Coupe, P., Matsuoka, A., Diana, R.P., Gosselin, M., Marie, D., Tremblay, J.-É., et Babin, M. 2015. Pigment signatures of phytoplankton communities in the Beaufort Sea. *Biogeosciences* 12 : 991–1006. doi : 10.5194/bg-12-991-2015.
- Courtney, M.B., Scanlon, B., Brown, R.J., Rikardsen, A., Gallagher, C.P., et Seitz, A.C. 2018. Offshore ocean dispersal of adult Dolly Varden *Salvelinus malma* in the Beaufort Sea. *Polar Biol.* 41 : 817–825. doi : 10.1007/s00300-017-2246-5.
- Couture, N.J., Irrgang, A., Pollard, W., Lantuit, H., et Fritz, M. 2018. Coastal erosion of permafrost soils along the Yukon coastal plain and fluxes of organic carbon to the Canadian Beaufort Sea. *J. Geophys. Res. : Biogeosci.* 123 : 406–422. doi : 10.1002/2017JG004166.
- Cozar, A., Marti, E., Duarte, C.M., Garcia-de-Lomas, J., van Sebille, E., Ballatore, T.J., Eguíluz, V.M., González-Gordillo, J.I., Pedrotti, M.L., Echevarria, F., Troublè, R., et Irigoien, X. 2017. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation. *Sci. Adv.* 3 : e1600582. doi : 10.1126/sciadv.1600582.
- Cross, J.N., Mathis, J.T., Pickart, R.S., et Bates, N.R. 2018. Formation and transport of corrosive water in the Pacific Arctic region. *Deep Sea Res. II* 152 : 67–81. doi : 10.1016/j.dsr2.2018.05.020.
- Curry, B., Lee, C.M., Petrie, B., Moritz, R.E., et Kwok, R. 2014. Multiyear volume, liquid freshwater, and sea ice transports through Davis Strait, 2004–10. *J. Phys. Oceanogr.* 44 : 1244–1266. doi : 10.1175/JPO-D-13.0177.1.

- Darnis, G., et Fortier, L. 2012. Zooplankton respiration and the export of carbon at depth in the Amundsen Gulf (Arctic Ocean). *J. Geophys. Res. Oceans* 117 : C04013. doi : 10.1029/2011JC007374.
- Darnis, G., et Fortier, L. 2014. Temperature, food and the seasonal vertical migration of key arctic copepods in the thermally stratified Amundsen Gulf (Beaufort Sea, Arctic Ocean). *J. Plankton Res.* 36 : 1092–1108. doi : 10.1093/plankt/fbu035.
- Darnis, G., Barber, D.G., et Fortier, L. 2008. Sea ice and the onshore-offshore gradient in pre-winter zooplankton assemblages in southeastern Beaufort Sea. *J. Mar. Syst.* 74 : 994–1011. doi : 10.1016/j.jmarsys.2007.09.003.
- Darnis, G., Hobbs, L., Geoffroy, M., Grenvald, J.C., Renaud, P.E., Berge, J., Cottier, F., Kristiansen, S., Daase, M., Søreide, J.E., Wold, A., Morata, N., et Gabrielsen, T. 2017. From polar night to midnight sun: Diel vertical migration, metabolism and biogeochemical role of zooplankton in a high Arctic fjord (Kongsfjorden, Svalbard). *Limnol. Oceanogr.* 62 : 1586–1605. doi : 10.1002/lno.10519.
- Daugaard-Petersen, T., Langebæk, R., Rigét, F.F., Dyck, M., Letcher, R.J., Hyldstrup, L., Jensen, J.B., Dietz, R., et Sonne, C. 2018. Persistent organic pollutants and penile bone mineral density in East Greenland and Canadian polar bears (*Ursus maritimus*) during 1996–2015. *Environ. Int.* 114 : 212–218. doi : 10.1016/j.envint.2018.02.022.
- Daugbjerg, N., Norlin, A., et Lovejoy, C. 2018. *Baffinella frigidus* gen. et sp. nov. (Baffinellaceae fam. nov., Cryptophyceae) from Baffin Bay: Morphology, pigment profile, phylogeny, and growth rate response to three abiotic factors. *J. Phycol.* 54 : 665–680. doi : 10.1111/jpy.12766.
- Davidson, T.A., Wetterich, S., Johansen, K.L., Grønnow, B., Windirsch, T., Jeppesen, E., Syväranta, J., Olsen, J., González-Bergonzoni, I., Strunk, A., Larsen, N.K., Meyer, H., Søndergaard, J., Dietz, R., Eulears, I., et Mosbech, A. 2018. The history of seabird colonies and the North Water ecosystem: Contributions from palaeoecological and archaeological evidence. *Ambio* 47 : 175–192. doi : 10.1007/s13280-018-1031-1.
- Davis, P.E.D., Lique, C., Johnson, H.L., et Guthrie, J.D. 2016. Competing effects of elevated vertical mixing and increased freshwater input on the stratification and sea ice cover in a changing Arctic Ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 46 : 1531–1553. doi : 10.1175/KPO-D-15-0174.1.
- Dawson, J., Pizzolato, L., Howell, S.E.L., Copland, L., et Johnston, M.E. 2018. Temporal and spatial patterns of ship traffic in the Canadian Arctic from 1990 to 2015. *Arctic*. 71 : 15–26. doi : 10.14430/arctic4698.

- Day, A.C., et Harris, L.N. 2013. Information to support an updated stock status of commercially harvested Arctic Char (*Salvelinus alpinus*) in the Cambridge Bay region of Nunavut, 1960–2009. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2013/068. v + 30 p. Disponible du http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/Publications/ResDocs-DocRech/2013/2013_068-eng.html [date d'accès 12 February 2019].
- Delaforge, A., Suárez-Morales, E., Walkusz, W., Campbell, K., et Mundy, C.J. 2017. A new species of *Monstrillopsis* (Crustacea, Copepoda, Monstrilloida) from the lower Northwest Passage of the Canadian Arctic. *ZooKeys*. 709 : 1–16. doi : 10.3897/zookeys.709.20181.
- Delarue, J., Laurinolli, M., et Martin, B. 2009. Bowhead whale (*Balaena mysticetus*) songs in the Chukchi Sea between October 2007 and May 2008. *J. Acoust. Soc. Am.* 126 : 3319–3328. doi : 10.1121/1.3257201.
- Deming, J.W. 2007. Life in ice formations at very cold temperatures. *In* *Physiology and Biochemistry of Extremophiles*. Edited by C. Gerday, et N. Glansdorf. ASM Press, Washington, DC. pp. 133–145.
- Deming, J.W., Fortier, L., et Fukuchi, M. 2002. The International North Water Polynya Study (NOW): A brief overview. *Deep-Sea Res. II* 49 : 4887–4892. doi : 10.1016/S0967-0645(02)00168-6.
- Dempson, J.B., Shears, M., et Bloom, M. 2002. Spatial and temporal variability in the diet of anadromous Arctic char, *Salvelinus alpinus*, in northern Labrador. *In* *Ecology, Behaviour and Conservation of the Chars, Genus Salvelinus*. Edited by P. Magnan, C. Audet, H. Glémet, M. Legault, M.A. Rodríguez, et E.B. Taylor. Springer Science+Business Media, Dordrecht. pp. 49–62. doi : 10.1007/978-94-017-1352-8.
- Descamps, S., Gilchrist, H.G., Love, O.P., et Bêty, J. 2011. Individual optimization of reproduction in a long-lived migratory bird: A test of the condition-dependent individual optimization model of laying date and clutch size. *Funct. Ecol.* 25 : 671–681. doi : 10.1111/j.1365-2435.2010.01824.x.
- Dey, C.J., Richardson, E., McGeachy, D., Iverson, S.A., Gilchrist, H.G., et Semeniuk, C.A.D. 2017. Increasing nest predation will be insufficient to maintain polar bear body condition in the face of sea-ice loss. *Global Change Biol.* 23 : 1821–1831. doi : 10.1111/gcb.13499.
- Dey, C.J., Semeniuk, C.A.D., Iverson, S.A., Richardson, E., McGeachy, D., et Gilchrist, H.G. 2018. Forecasting the outcome of multiple effects of climate change on northern common eiders. *Biol. Conserv.* 220 : 94–103. doi : 10.1016/j.biocon.2018.02.007.
- Di Lorenzo, E., Fiechter, J., Schneider, N., Bracco, A., Miller, A.J., Franks, P.J.S., Bograd, S.J., Moore, A.M., Thomas, A.C., Crawford, W., Peña, A., et Hermann, A.J. 2009. Nutrient and salinity decadal variations in the central and eastern North Pacific. *Geophys. Res. Lett.* 36 : L14601. doi : 10.1029/2009GL038261.

- Doniol-Valcroze, T., Gosselin, J.-F., Pike, D., Lawson, J., Asselin, N., Hedges, K., et Ferguson, S. 2015a. Abundance estimates of narwhal stocks in the Canadian High Arctic in 2013. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2015/060 : v + 36 p. Disponible du http://publications.gc.ca/collections/collection_2016/mpo-dfo/Fs70-5-2015-060-eng.pdf [date d'accès 08 February 2019].
- Doniol-Valcroze, T., Gosselin, J.-F., Pike, D., Lawson, J., Asselin, N., Hedges, K., et Ferguson, S. 2015b. Abundance estimate of the Eastern Canada – West Greenland bowhead whale population based on the 2013 High Arctic Cetacean Survey. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2015/058 : v + 27 p. Disponible du http://publications.gc.ca/collections/collection_2016/mpo-dfo/Fs70-5-2015-058-eng.pdf [date d'accès 08 February 2019].
- Dorcey, A.H.J., et Hall, K.J. 1981. Setting ecological research priorities for management: The art of the impossible in the Fraser estuary. Westwater Research Centre, The University of British Columbia. Vancouver, B.C. 78p.
- Doxaran, D., Devred, E., et Babin, M. 2015. A 50% increase in the mass of terrestrial particles delivered by the Mackenzie River into the Beaufort Sea (Canadian Arctic Ocean) over the last 10 years. *Biogeosciences* 12 : 3551–3565. doi : 10.5194/bg-12-3551-2015.
- Drost, H.E., Lo, M., Carmack, E.C., et Farrell, A.P. 2016. Acclimation potential of Arctic cod (*Boreogadus saida*) from the rapidly warming Arctic Ocean. *J. Exp. Biol.* 219 : 3114–3125. doi : 10.1242/jeb.140194.
- Dumas, J., Carmack, E., et Melling, H. 2005. Climate change impacts on the Beaufort shelf landfast ice. *Cold Reg. Sci. Technol.* 42 : 41–51. doi : 10.1016/j.coldregions.2004.12.001.
- Dunmall, K.M., et Reist J.D. 2018. Developing a citizen science framework for the Arctic using the ‘Arctic Salmon’ initiative. *In Impacts of a Changing Environment on the Dynamics of High-latitude Fish and Fisheries. Edited by F.J. Mueter, M.R. Baker, S.C. Dressel, et A.B. Hollowed.* Alaska Sea Grant, University of Alaska Fairbanks. pp. 31–47. doi : 10.4027/icedhlff.2018.02.
- Dunmall, K.M., Reist, J.D., Carmack, E.C., Babaluk, J.A., Heide-Jørgensen, M.P., et Docker, M.F. 2013. Pacific salmon in the Arctic: Harbingers of change. *In Responses of Arctic Marine Ecosystems to Climate Change. Edited by F.J. Mueter, D.M.S. Dickson, H.P. Huntington, J.R. Irvine, E.A. Logerwell, S.A. MacLean, L.T. Quakenbush, et C. Rosa.* Alaska Sea Grant, University of Alaska Fairbanks. pp. 141–163. doi : 10.4027/ramecc.2013.07.
- Dunmall, K.M., Gruben, M., McNicholl, D., et Reist, J. 2017. Arctic Salmon: Linking subsistence and science to track and predict changing biodiversity of fishes in the Canadian Arctic. Integrated Regional Impact Study of the western and central Canadian Arctic (IRIS 1), December 2017 newsletter. ArcticNet. Disponible du http://www.arcticnet.ulaval.ca/media/iris_reports.php [date d'accès 08 February 2019].

- Dunmall, K.M., McNicholl, D.G., et Reist, J.D. 2018. Community-based monitoring demonstrates increasing occurrences and abundances of Pacific salmon in the Canadian Arctic from 2000 to 2017. *North Pacific Anadromous Fish Commission Technical Report 11* : 87–90. Disponible du <https://npafc.org/technical-report/> [date d'accès 08 February 2019].
- Dunphy, M., Dupont, F., Hannah, C.G., et Greenberg, D. 2005. Validation of a modelling system for tides in the Canadian Arctic Archipelago. *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci.* 243 : vi + 70 pp.
- Dunton, K.H., Weingartner, T., et Carmack, E.C. 2006. The nearshore western Beaufort Sea ecosystem: Circulation and importance of terrestrial carbon in arctic coastal food webs. *Prog. Ocean.* 71 : 362–378. doi : 10.1016/j.pocean.2006.09.011.
- Durner, G.M., Laidre, K.L., et York, G.S. (eds.) 2018. Polar bears: Proceedings of the 18th working meeting of the IUCN/SSC polar bear specialist group, 7–11 June 2016, Anchorage, Alaska. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. xxx + 207 p.
- Dyck, M., Campbell, M., Lee, D.S., Boulanger, J., et Hedman, D. 2017. 2016 Aerial survey of the western Hudson Bay polar bear sub-population. Final Report. Government of Nunavut, Department of Environment, Wildlife Research Section, Status Report 2017-xx, Igloolik, NU. 82 pp + 2 Supplements. Disponible du https://www.gov.nu.ca/sites/default/files/pb_wh_2016_population_assessment_gn_report_27_june_2017.pdf [date d'accès 08 February 2019].
- Egevang, C., Boertmann, D., Mosbech, A., et Tamstorf, M.P. 2003. Estimating colony area and population size of little auks *Alle alle* at Northumberland Island using aerial images. *Polar Biol.* 26 : 8–13. doi : 10.1007/s00300-002-0448-x.
- EISC. 2018. Inuvialuit Environmental Impact Screening Committee. Community Conservation Plans. Disponible du <http://www.screeningcommittee.ca/resources/inuvialuit.html> [date d'accès 13 September 2018].
- Environnement et Changement climatique Canada. 2016. Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Glace de mer au Canada. 28 p. Disponible du <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/glace-mer.html> [date d'accès 20 February 2019].
- Erbe, C., et Farmer, D.M. 2000. Zones of impact around icebreakers affecting beluga whales in the Beaufort Sea. *J. Acoust. Soc. Am.* 108 : 1332. doi : 10.1121/1.1288938.
- Fawcett, D., Pearce, T., Notaina, R., Ford, J.D., et Collings, P. 2018. Inuit adaptability to changing environmental conditions over an 11-year period in Ulukhaktok, Northwest Territories. *Polar Rec.* 54 : 119–132. doi : 10.1017/S003224741800027X.

- Ferguson, S.H., Kingsley, M.C.S., et Higdon, J.W. 2012. Killer whale (*Orcinus orca*) predation in a multi-prey system. *Popul. Ecol.* 54 : 31–41. doi : 10.1007/s10144-011-0284-3.
- Ferguson, S.H., Young, B.G., Yurkowski, D.J., Anderson, R., Willing, C., et Nielsen, O. 2017. Demographic, ecological, and physiological responses of ringed seals to an abrupt decline in sea ice availability. *PeerJ* 5 : e2957. doi : 10.7717/peerj.2957. PMID : 28168119.
- FJMC [Fisheries Joint Management Committee]. 2013. Beaufort Sea beluga management plan. 4th amended printing. Disponible du <https://www.beaufortseapartnership.ca/wp-content/uploads/2015/04/Beaufort-Sea-Beluga-Management-Plan-2013.pdf> [date d'accès 15 September 2018].
- FJMC [Fisheries Joint Management Committee]. 2017. One people one plan: Inuvialuit plan for fishing on the Inuvik to Tuktoyaktuk highway. 5 p. Disponible du <https://fjmc.ca/wp-content/uploads/2017/11/ITH-Community-Fishing-Plan-2017-02.pdf> [date d'accès 15 September 2018].
- Flato, G.M., et Brown, R.D. 1996. Variability and climate sensitivity of landfast Arctic sea ice. *J. Geophys. Res.* 101 : 25767–25777. doi : 10.1029/96JC02431.
- Ford, J.D., Couture, N., Bell, T., et Clark, D.G. 2017. Climate change and Canada's north coast: Research trends, progress, and future directions. *Environ. Rev.* 26 : 82–92. doi : 10.1139/er-2017-0027.
- Fortier, M., Fortier, L., Michel, C., et Legendre, L. 2002. Climatic and biological forcing of the vertical flux of biogenic particles under seasonal arctic sea ice. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 225 : 1–16. doi : 10.3354/meps225001.
- Fossheim, M., Primicerio, R., Johannessen, 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. *Nat. Clim. Change* 5 : 673–678. doi : 10.1038/NCLIMATE2647.
- Franks, S.J., et Hoffmann, A.A. 2012. Genetics of climate change adaptation. *Annu. Rev. Genet.* 46 : 185–208. doi : 10.1146/annurev-genet-110711-155511.
- Gagnon, A.S., et Gough, W.A. 2005. Trends in the dates of ice freeze-up and breakup over Hudson Bay, Canada. *Arctic* 58 : 370–382. doi : 10.14430/arctic451.
- Galbraith, P.S., et Larouche, P. 2011. Sea-surface temperature in Hudson Bay and Hudson Strait in relation to air temperature and ice cover breakup, 1985–2009. *J. Marine Syst.* 87 : 66–78. doi : 10.1016/j.marsys.2011.03.002.
- Galindo, V., Levasseur, M., Scarratt, M., Mundy, C.J., Gosselin, M., Kiene, R.P., Gourdal, M., and Lizotte, M. 2015. Under-ice microbial dimethylsulfoniopropionate metabolism

- during the melt period in the Canadian Arctic Archipelago. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 524 : 39–53. doi : 10.3354/meps11144.
- Galindo, V., Gosselin, M., Lavaud, J., Mundy, C.J., Else, B., Ehn, J., Babin, M., et Rysgaard, S. 2017. Pigment composition and photoprotection of Arctic sea ice algae during spring. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 585 : 49–69. doi : 10.3354/meps12398.
- Gallagher, C.P., Roux, M.-J., Howland, K.L., et Tallman, R.F. 2011. Synthesis of biological and harvest information used to assess populations of northern form Dolly Varden (*Salvelinus malma malma*) in Canada. Part II: Big Fish River. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2010/115. v + 45 p. Disponible du <http://publications.gc.ca/site/eng/404080/publication.html> [date d'accès 12 February 2019].
- Gallagher, C.P., Howland, K.L., Harris, L.N., Bajno, R., Sandstrom, S., Loewen, T., et Reist, J. 2013. Dolly Varden (*Salvelinus malma malma*) from the Big Fish River: Abundance estimates, effective population size, biological characteristics, and contribution to the coastal mixed-stock fishery. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2013/059. vi + 46 p. Disponible du http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/Publications/ResDocs-DocRech/2013/2013_059-eng.html [date d'accès 12 February 2019].
- Gallagher, C.P., Howland, K.L., et Harwood, L. 2017. Harvest, catch-effort, and biological information of Arctic Char (*Salvelinus alpinus*) collected from subsistence harvest monitoring programs at Hornaday River, Lasard Creek, and Tippitiuyak, Darnley Bay, Northwest Territories. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2016/108. v + 81 p. Disponible du <http://publications.gc.ca/site/eng/9.831302/publication.html> [date d'accès 12 February 2019].
- Gallagher, C.P., Howland, K.L., Sandstrom, S.J., et Halden, N.J. 2018a. Migration tactics affect spawning frequency in an iteroparous salmonid (*Salvelinus malma*) from the Arctic. *PLoS ONE* 13 : e0210202. doi : 10.1371/journal.pone.0210202.
- Gallagher, C.P., Howland, K.L., Bajno, R., Sandstrom, S.J., et Reist, J.D. 2018b. Abondance de la population, caractéristiques biologiques et contribution aux pêches côtières de stocks mélangés du Dolly Varden (*Salvelinus malma malma*) de la rivière Babbage : 2010 à 2014. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Doc. de rech. 2018/029. iv + 116 p. Disponible du http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/Publications/ResDocs-DocRech/2018/2018_029-fra.html [date d'accès 12 February 2019].

- Gallagher, C.P., Bajno, R., Reist, J.D., et Howland, K.L. 2019. Genetic mixed-stock analyses, catch-effort, and biological characteristics of Dolly Varden (*Salvelinus malma malma*) from the Rat River collected from subsistence harvest monitoring programs: 2009-2014. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2020/001. vi + 86 p.
- Gaston, A.J., Woo, K., et Hipfner, J.M. 2003. Trends in forage fish populations in northern Hudson Bay since 1981, as determined from the diet of nestling thick-billed murre *Uria lomvia*. *Arctic* 56 : 227–233. doi : 10.14430/arctic618.
- GIEC. 2014. Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p. Disponible du https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf [date d'accès 08 February 2019].
- Giraldo, C., Stasko, A., Walkusz, W., Majewski, A., Rosenburg, B., Power, M., Swanson, H., et Reist, J.D. 2018. Feeding of Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) in the Canadian Beaufort Sea. *J. Mar. Sys.* 183 : 32–41. doi : 10.1016/j.jmarsys.2018.03.009.
- Goldsmith, J., Howland, K.L., et Archambault, P. 2014. Establishing a baseline for early detection of non-indigenous species in ports of the Canadian Arctic. *Aquat. Invasions* 9 : 327–342. doi : 10.3391/ai.2014.9.3.08.
- Goldsmith, J., Archambault, P., Chust, G., Villarino, E., Liu, G., Lukovich, J.V., Barber, D.G., et Howland, K.L. 2018. Projecting present and future habitat suitability of ship-mediated aquatic invasive species in the Canadian Arctic. *Biol. Invasions* 20 : 501–517. doi : 10.1007/s10530-017-1553-7.
- Goldsmith, J., Nudds, S.H., Stewart, D.B., Higdon, J.W., Hannah, C.G. and Howland, K.L. 2019a. Where else? Assessing zones of alternate ballast water exchange in the Canadian eastern Arctic. *Mar. Pollut. Bull.* 139 : 74–90. doi : 10.1016/j.marpolbul.2018.11.062.
- Goldsmith, J., McKindsey, C., Archambault, P., et Howland, K.L. 2019b. Ecological risk assessment of predicted marine invasions in the Canadian Arctic. *PLoS ONE* 14 : e0211815. doi : 10.1371/journal.pone.0211815.
- Granger, J., Sigman, D.M., Gagnon, J., Tremblay, J.-É., et Mucci, A. 2018. On the properties of the Arctic halocline and deep water masses of the Canada Basin from nitrate isotope ratios. *J. Geophys. Res. : Oceans* 123 : 5443–5458. doi : 10.1029/2018JC014110.
- Grebmeier, J.M., Cooper, L.W., Feder, H.M., et Sirenko, B.I. 2006. Ecosystem dynamics of the Pacific-influenced Northern Bering and Chukchi Seas in the Amerasian Arctic. *Prog. Oceanogr.* 71 : 331–361. doi : 10.1016/j.pocean.2006.10.001.

- Halliday, W.D., Insley, S.J., Hilliard, R.C., de Jong, T., et Pine, M.K. 2017. Potential impacts of shipping noise on marine mammals in the western Canadian Arctic. *Mar. Pollut. Bull.* 123 : 73–82. doi : 10.1016/j.marpolbul.2017.09.027.
- Halliday, W.D., Insley, S.J., de Jong, T., et Mouy, X. 2018. Seasonal patterns in acoustic detections of marine mammals near Sachs Harbour, Northwest Territories. *Arctic Science* 4 : 259–278. doi : 10.1139/as-2017-0021.
- Hammill, M.O., Lesage, V., et Carter, P. 2005. What do harp seals eat? Comparing diet composition from different compartments of the digestive tract with diets estimated from stable isotope ratios. *Can. J. Zool.* 83 : 1365–1372. doi : 10.1139/Z05-123.
- Harris, C.M., McTigue, N.D., McClelland, J.W., et Dunton, K.H. 2018. Do high Arctic coastal food webs rely on a terrestrial carbon subsidy? *Food Webs* 15 : e00081. doi : 10.1016/j.fooweb.2018.e00081.
- Harris, L.N., Loewen, T.N., Reist, J.D., Halden, N.M., Babaluk, J.A., et Tallman, R.F. 2012. Migratory variation in Mackenzie River system Broad Whitefish: Insights from otolith strontium distributions. *Trans. Am. Fish. Soc.* 141 : 1574–1585. doi : 10.1080/00028487.2012.713885.
- Harris, L.N., Palstra, F.P., Bajno, R., Gallagher, C.P., Howland, K.L., Taylor, E.B., et Reist, J.D. 2017. Assessing conservation risks to populations of an anadromous Arctic salmonid, the northern Dolly Varden (*Salvelinus malma malma*), via estimates of effective and census population sizes and approximate Bayesian computation. *Conserv. Genet.* 18 : 393–410. doi : 10.1007/s10592-016-0915-5.
- Harvey, M., Starr, M., Therriault, J.C., Saucier, F., et Gosselin, M. 2006. MERICA-Nord Program: Monitoring and research in the Hudson Bay complex. *AZMP Bulletin* 5 : 27–32. Available at <http://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/365692.pdf> [date d'accès 08 February 2019].
- Harwood, L.A., Innes, S., Norton, P., et Kingsley, M.C.S. 1996. Distribution and abundance of beluga whales in the Mackenzie estuary, southeast Beaufort Sea, and west Amundsen Gulf during late July 1992. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53 : 2262–2273. doi : 10.1139/f96-180.
- Harwood, L.A., Norton, P., Day, B., et Hall, P.A. 2002. The harvest of beluga whales in Canada's western Arctic: Hunter-based monitoring of the size and composition of the catch. *Arctic* 55 : 10–20. doi : 10.14430/arctic687.
- Harwood, L.A., Sandstrom, S., et Linn, E. 2009. Status of anadromous Dolly Varden (*Salvelinus malma*) of the Rat River, Northwest Territories, as assessed through sampling of the subsistence fishery (1995-2007). *Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2891 : vii + 52 p. Disponible du <http://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/338722.pdf> [date d'accès 12 February 2019].

- Harwood, L.A., Sandstrom, S.J., Papst, M.H., et Melling, H. 2013. Kuujuua River Arctic char: Monitoring stock trends using catches from an under-ice subsistence fishery, Victoria Island, Northwest Territories, Canada, 1991–2009. *Arctic* 66 : 291–300. doi : 10.14430/arctic4308.
- Harwood, L.A., Iacozza, J., Auld, J.C., Norton, P., et Loseto, L. 2014. Belugas in the Mackenzie River Estuary, NT, Canada: Habitat use and hot spots in the Tarium Nirvyutait Marine Protected Area. *Ocean Coast. Manag.* 100 : 128–138. doi : 10.1016/j.ocecoaman.2014.08.004.
- Harwood, L.A., Smith, T.G., Georges, C., Sandstrom, S., Walkusz, W., et Divoky, G.J. 2015a. Change in the Beaufort Sea ecosystem: Diverging trends in body condition and/or production in five marine vertebrate species. *Progr. Oceanogr.* 136 : 263–273. doi : 10.1016/j.pocean.2015.05.003.
- Harwood, L., Kingsley, M.C.S., et Pokiak, F. 2015b. Monitoring beluga harvests in the Mackenzie Delta and near Paulatuk, NT, Canada: Harvest efficiency and trend, size and sex of landed whales, and reproduction, 1970–2009. *Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 3059 : vi + 32 p. Disponible du http://publications.gc.ca/collections/collection_2015/mpo-dfo/Fs97-4-3059-eng.pdf [date d'accès 08 February 2019].
- Hatam, I., Charchuk, R., Lange, B.A., Beckers, J., Haas, C., et Lanoil, B. 2014. Distinct bacterial assemblages reside at different depths in Arctic multiyear sea ice. *FEMS Microbiol. Ecol.* 90 : 115–125. doi : 10.1111/1574-6941.12377.
- Hátún, H., Azetsu-Scott, K., Somavilla, R. et al. 2017. The subpolar gyre regulates silicate concentrations in the North Atlantic. *Sci Rep* 7 : 14576. doi : 10.1038/s41598-017-14837-4.
- Hátún, H., Azetsu-Scott, K., Somavilla, R., Rey, F., Johnson, C., Mathis, M., Mikolajewicz, U., Coupel, P., Tremblay, J.-É., Hartman, S.E., Pacariz, S.V., Salter, I., et Olafsson, J. 2018. The subpolar gyre regulates silicate concentrations in the North Atlantic. *Sci. Rep.* 7 : 14576. doi : 10.1038/s41598-017-14837-4.
- Hauser, D.D.W., Laidre, K.L., Stafford, K.M., Stern, H.L., Suydam, R.S., et Richard, P.R. 2017a. Decadal shifts in autumn migration timing by Pacific Arctic beluga whales are related to delayed annual sea ice formation. *Global Change Biol.* 23 : 2206–2217. doi : 10.1111/gcb.13564.
- Hauser, D.D.W., Laidre, K.L., Stern, H.L., Moore, S.E., Suydam, R.S., et Richard, P.R. 2017b. Habitat selection by two beluga whale populations in the Chukchi and Beaufort seas. *PLoS ONE* 12 : e0172755. doi : 10.1371/journal.pone.0172755.

- Hauser, D.D.W., Laidre, K.L., et Stern, H.L. 2018. Vulnerability of Arctic marine mammals to vessel traffic in the increasingly ice-free Northwest Passage and Northern Sea Route. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115 : 7617–7622. doi : 10.1073/pnas.1803543115.
- Heide-Jørgensen, M.P., Hammeken, N., Dietz, R., Orr, J., et Richard, P.R. 2001. Surfacing times and dive rates for narwhals (*Monodon monoceros*) and belugas (*Delphinapterus leucas*). *Arctic* 54 : 284–298. doi : 10.14430/arctic788.
- Heide-Jørgensen, M.P., Dietz, R., Laidre, K.L., Richard, P., Orr, J., et Schmidt, H.C. 2003. The migratory behaviour of narwhals (*Monodon monoceros*). *Can. J. Zool.* 81 : 1298–1305. doi : 10.1139/z03-117.
- Heide-Jørgensen, M.P., Laidre, K.L., Simon, M., Burt, M.I., Borchers, D.L., et Rasmussen, M. 2010. Abundance of fin whales in West Greenland in 2007. *J. Cetacean Res. Manage.* 11 : 83–88.
- Heide-Jørgensen, M.P., Hansen, R.G., Westdal, K., Reeves, R.R., et Mosbech, A. 2013a. Narwhals and seismic exploration: Is seismic noise increasing the risk of ice entrapments? *Biol. Conserv.* 158 : 50–54. doi : 10.1016/j.biocon.2012.08.005.
- Heide-Jørgensen, M.P., Strander Sinding, M.-H., Nielsen, N.H., Rosing-Asvid, A., et Hansen, R.G. 2013b. The significance of the North Water polynya to arctic top predators. *Ambio* 42 : 596–610. doi : 10.1007/s13280-012-0357-3.
- Heide-Jørgensen, M.P., Sinding, M.H.S., Nielsen, N.H., Rosing-Asvid, A., et Hansen, R. G. 2016. Large numbers of marine mammals winter in the North Water polynya. *Polar Biol.* 39 : 1605–1614. doi : 10.1007/s00300-015-1885-7.
- Higdon, J.W., et Ferguson, S.H. 2009. Loss of Arctic sea ice causing punctuated change in sightings of killer whales (*Orcinus orca*) over the past century. *Ecol. Appl.* 19 : 1365–1375. doi : 10.1890/07-1941.1.
- Higdon, J.W., et Ferguson, S.H. 2014. Inuit recollections of a 1950s killer whale (*Orcinus orca*) ice entrapment in Foxe Basin, Nunavut, Canada. *Aquat. Mamm* 40 : 9–19. doi : 10.1578/AM.40.1.2014.9.
- Higdon, J.W., Westdal, K.H., et Ferguson, S.H. 2013. Distribution and abundance of killer whales (*Orcinus orca*) in Nunavut, Canada – an Inuit knowledge survey. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* 94 : 1293–1304. doi : 10.1017/S0025315413000921.
- Hill, P.S., et DeMaster, D.P. 1999. Alaska marine mammal stock assessments, 1999. NOAA Technical Memorandum NMFS-AFSC-110 : iii + 174 p. Disponible du ftp://ftp.library.noaa.gov/noaa_documents.lib/NMFS/AFSC/TM_AFSC/TM_NMFS_AFSC_110.pdf [date d'accès 08 February 2019].

- Hornby, C.A., Hoover, C., Iacozza, J., Barber, D.G., et Loseto, L.L. 2016. Spring conditions and habitat use of beluga whales (*Delphinapterus leucas*) during arrival to the Mackenzie River Estuary. *Polar Biol.* 39 : 2319–2334. doi : 10.1007/s00300-016-1899-9.
- Hornby, C.A., Iacozza, J., Hoover, C., Barber, D.G., et Loseto, L.L. 2017. Beluga whale *Delphinapterus leucas* late summer habitat use and support for foraging areas in the Canadian Beaufort Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 574 : 243–257. doi : 10.3354/meps12178.
- Horvat, C., Jones, D.R., Iams, S., Schroeder, D., Flocco, D., et Feltham, D. 2017. The frequency and extent of sub-ice phytoplankton blooms in the Arctic Ocean. *Sci. Adv.* 3 : e1601191. doi : 10.1126/sciadv.1601191.
- Howell, S.E.L., Tivy, A., Yackel, J.J., et McCourt, S. 2008. Multi-year sea-ice conditions in the western Canadian Arctic Archipelago region of the Northwest Passage: 1968–2006. *Atmos. Ocean.* 46 : 220–242. doi : 10.3137/ao.460203.
- Howell, S.E.L., Derksen, C., Pizzolato, L., et Brady, M. 2015. Multiyear ice replenishment in the Canadian Arctic Archipelago: 1997–2013. *J. Geophys. Res.* 120 : 1623–1637. doi : 10.1002/2015JC010696.
- Howell, S.E.L., Laliberté, F., Kwok, R., Derksen, C., et King, J. 2016. Landfast ice thickness in the Canadian Arctic Archipelago from observations and models. *The Cryosphere* 10 : 1463–1475. doi : 10.5194/tc-10-1463-2016.
- Howland, K., Mochnacz, N., Gallagher, C., Tallman, R., Ghamry, H., Roux, M.-J., Sandstrom, S., et Reist, J. 2012. Developing strategies for improved assessment and ecosystem-based management of Canadian Northern Dolly Varden. *In* *Global Progress in Ecosystem-Based Fisheries Management*. Edited by G.H. Kruse, H.I. Browman, K.L. Cochrane, D. Evans, G.S. Jamieson, P.A. Livingston, D. Woodby, et C.I. Zhang. Alaska Sea Grant, University of Alaska Fairbanks. pp. 169–188. doi : 10.4027/gpebfm.2012.09.
- Huntington, H.P. 1999. Traditional knowledge of the ecology of beluga whales (*Delphinapterus leucas*) in the eastern Chukchi and northern Bering Seas, Alaska. *Arctic* 52 : 49–61. doi : 10.14430/arctic909.
- Hussey, N.E., Kessel, S.T., Aarestrup, K., Cooke, S.J., Cowley, P.D., Fisk, A.T., Harcourt, R.G., Holland, K.N., Iverson, S.J., Kocik, J.F., Mills Flemming, J.E., et Whoriskey, F.G. 2015. Aquatic animal telemetry: A panoramic window into the underwater world. *Science* 348 : 1221. doi : 10.1126/science.1255642.
- Hussey, N.E., Hedges, K.J., Barkley, A.N., Treble, M.A., Peklova, I., Webber, D.M., Ferguson, S.H., Yurkowski, D.J., Kessel, S.T., Bedard, J.M., et Fisk, A.T. 2017. Movements of a deep-water fish: Establishing marine fisheries management boundaries in coastal Arctic waters. *Ecol. Appl.* 27 : 687–704. doi : 10.1002/eap.1485.

- Hussey, N.E., Orr, J., Fisk, A.T., Hedges, K.J., Ferguson, S., et Barkley, A.N. 2018. Mark report satellite tags (mrPATs) to detail large-scale horizontal movements of deep water species: First results for the Greenland shark (*Somniosus microcephalus*). *Deep Sea Res. I* 134 : 32–40. doi : 10.1016/j.dsr.2018.03.002.
- Insley, S.J., Halliday, W.D., et de Jong, T. 2017. Seasonal patterns in ocean ambient noise near Sachs Harbour, Northwest Territories. *Arctic* 70 : 239–248. doi : 10.14430/arctic4662.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p. Disponible du <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> [date d'accès 08 February 2019].
- Irvine, J.R., et Riddell, B.E. 2007. Salmon as status indicators for North Pacific ecosystems. *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull.* 4 : 285–287. Disponible du <https://npafc.org/wp-content/uploads/2017/09/bulletin4.pdf> [date d'accès 08 February 2019].
- ITK (Inuit Tapiriit Kanatami). 2019. ITK website, <https://www.itk.ca/> [date d'accès 03 January 2019].
- Ivanova, S.V. 2016. Effects of acoustic disturbance caused by ship traffic on common fish species in the high Arctic. Thesis [M.Sc.]. University of Windsor, Windsor, ON. xiii + 118 p. Disponible du <https://scholar.uwindsor.ca/etd/5829> [date d'accès May 2018].
- Ivanova, S.V., Kessel, S.T., Landry, J., O'Neill, C., McLean, M.F., Espinoza, M., Vagle, S., Hussey, N.E., et Fisk, A.T. 2018. Impact of vessel traffic on the home ranges and movement of shorthorn sculpin (*Myoxocephalus scorpius*) in the nearshore environment of the high Arctic. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 75 : 2390–2400. doi : 10.1139/cjfas-2017-0418.
- Iverson, S.A., Gilchrist, H.G., Smith, P.A., Gaston, A.J., et Forbes, M.R. 2014. Longer ice-free seasons increase the risk of nest depredation by polar bears for colonial breeding birds in the Canadian Arctic. *Proc. R. Soc. London, Ser. B* 281 : 1–9. doi : 10.1098/rspb.2013.3128.
- Jean-Gagnon, F., Legagneux, P., Gilchrist, H.G., Bélanger, S., Love, O. P., et Bêty, J. 2018. The impact of sea ice conditions on breeding decisions is modulated by individual state in an arctic partial capital breeder. *Oecologia* 186 : 1–10. doi : 10.1007/s00442-017-4002-5.
- Jeppesen, E., Appelt, M., Hastrup, K., Grønnow, B., Mosbech, A., Smol, J.P., et Davidson, T.A. 2018. Living in an oasis: Rapid transformations, resilience, and resistance in the North Water Area societies and ecosystems. *Ambio* 47 : 296–309. doi : 10.1007/s13280-018-1034-y.

- Johnsen, G., Norli, M., Moline, M., Robbins, I., von Quillfeldt, C., Sørensen, K., Cottier, F., et Berge, J. 2018. The advective origin of an under-ice spring bloom in the Arctic Ocean using multiple observational platforms. *Polar Biol.* 41 : 1197–1216. doi : 10.1007/s00300-018-2278-5.
- Jørgensen, L.L., Archambault, P., Blicher, M., Denisenko, N., Guðmundsson, G., Iken, K., Roy, V., Sørensen, J., Anisimova, N., Behe, C., Bluhm, B.A., Denisenko, S., Metcalf, V., Olafsdóttir, S., Schiøtte, T., Tendal, O., Ravelo, A.M., Kędra, M., et Piepenburg, D. 2017. Benthos. *In* State of the Arctic Marine Biodiversity Report. Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat, Akureyri, Iceland. pp. 85–106. Disponible du <https://oarchive.arctic-council.org/handle/11374/1945> [date d'accès 07 February 2019].
- Jørgensen, O.A., Hvingel, C., et Treble, M.A. 2011. Identification and mapping of bottom fish assemblages in northern Baffin Bay. *J. Northw. Atl. Fish. Sci.* 43 : 65–79. doi : 10.2960/J.v43.m666.
- Kay, J.E., L'Ecuyer, T., Gettelman, A., Stephens, G., et O'Dell, C. 2008. The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum. *Geophys. Res. Lett.* 35 : L08503. doi : 10.1029/2008GL033451.
- Kenchington, E., Link, H., Roy, V., Archambault, P., Siferd, T., Treble, M., et Wareham, V. 2011. Identification of mega- and macrobenthic Ecologically and Biologically Significant Areas (EBSAs) in the Hudson Bay Complex, the Western and Eastern Canadian Arctic. *DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc.* 2011/071. vi + 52 p. Disponible du http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/mpo-dfo/Fs70-5-2011-071-eng.pdf [date d'accès 08 February 2019].
- Kinda, G.B., Simard, Y., Gervaise, C., Mars, J.I., et Fortier, L. 2015. Arctic underwater noise transients from sea ice deformation: Characteristics, annual time series, and forcing in Beaufort Sea. *J. Acoust. Soc. Am.* 138 : 2034–2045. doi : 10.1121/1.4929491.
- Kirillov, S., Dmitrenko, I., Tremblay, B., Gratton, Y., Barber, D., et Rysgaard, S. 2016. Upwelling of Atlantic water along the Canadian Beaufort Sea continental slope: Favorable atmospheric conditions and seasonal and interannual variations. *J. Clim.* 29 : 4509–4523. doi : 10.1175/JCLI-D-15-0804.1.
- Kjellerup, S., Dünweber, M., Møller, E.F., Schiedek, D., Oskarsson, G.J., Rigét, F., Lambert Johansen, K., et Mosbech, A. 2015. Vertical and horizontal distribution of zooplankton and polar cod in southern Baffin Bay (66–71°N) in September 2009. *Polar Biol.* 38 : 699–718. doi : 10.1007/s00300-014-1633-4.
- Kohlbach, D., Graeve, M., Lange, B.A., David, C., Peeken, I., Flores, H. 2016. The importance of ice algae-produced carbon in the central Arctic Ocean ecosystem: Food web relationships revealed by lipid and stable isotope analyses. *Limnol. Oceanogr.* 61 : 2027–2044. doi : 10.1002/lno.10351.

- Kohlbach, D., Schaafsma, F.L., Graeve, M., Lebreton, B., Lange, B.A., David, C., Vortkamp, M., et Flores, H. 2017. Strong linkage of polar cod (*Boreogadus saida*) to sea ice algae-produced carbon: Evidence from stomach content, fatty acid and stable isotope analyses. *Prog. Oceanogr.* 152 : 62–74. doi : 10.1016/j.pocean.2017.02.003.
- Kokelj, S.V., Lantz, T.C., Tunnicliffe, J., Segal, R., et Lacelle, D. 2017. Climate-driven thaw of permafrost preserved glacial landscapes, northwestern Canada. *Geology* 45 : 371–374. doi : 10.1130/G38626.1.
- Koski, W.R., Davis, R.A., et Finley, K.J. 2002. Distribution and abundance of Canadian High Arctic belugas, 1974-1979. *NAMMCO Sci. Pub.* 4 : 87–126. doi : 10.7557/3.2839.
- Kovacs, K., et Michel, C. 2011. Biological impacts of changes to sea ice in the Arctic. *In* Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. pp. 9-32–9-51. Disponible du <https://www.amap.no/documents/doc/snow-water-ice-and-permafrost-in-the-arctic-swipa-climate-change-and-the-cryosphere/743> [date d'accès 08 February 2019].
- Kowal, S., Gough, W.A., et Butler, K. 2017. Temporal evolution of Hudson Bay sea ice (1971–2011). *Theor. Appl. Climatol.* 127 : 753–760. doi : 10.1007/s00704-015-1666-9.
- Krishfield, R.A., Proshutinsky, A., Tateyama, K., Williams, W.J., Carmack, E.C., McLaughlin, F.A., et Timmermans, M.-L. 2014. Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle. *J. Geophys. Res.* 119 : 1271–1305. doi : 10.1002/2013JC008999.
- Lacoursière-Roussel, A., Howland, K., Normandeau, E., Grey, E.K., Archambault, P., Deiner, K., Lodge, D.M., Hernandez, C., Leduc, N., et Bernatchez, L. 2018. eDNA metabarcoding as a new surveillance approach for coastal Arctic biodiversity. *Ecol. Evol.* 8 : 7763–7777. doi : 10.1002/ece3.4213.
- Laidlaw, D. 2015. Challenges in using Aboriginal traditional knowledge in the courts. *In* A Symposium on Environment in the Courtroom: Evidentiary Issues in Environmental Prosecutions and Hearings, March 6-7, 2015. University of Calgary.
- Lange, B.A., Flores, H., Michel, C., Beckers, J.F., Bublitz, A., Casey, J.A., Castellani, G., Hatam, I., Reppchen, A., Rudolph, S.A., et Haas, C. 2017. Pan-Arctic sea ice-algal chl *a* biomass and suitable habitat are largely underestimated for multi-year ice. *Glob. Change Biol.* 2017 : 1–17. doi : 10.1111/gcb.13742.
- Lange, B. A., Haas, C., Charette, J., Katlein, C., Campbell, K., Duerksen, S., et al. 2019. Contrasting ice algae and snow-dependent irradiance relationships between first-year and multiyear sea ice. *Geophys. Res. Lett.* 46 : 10834–10843. doi : 10.1029/2019GL082873.

- Le Fouest, V., Matsuoka, A., Manizza, M., Shernetsky, M., Tremblay, B., et Babin, M. 2018. Towards an assessment of riverine dissolved organic carbon in surface waters of the western Arctic Ocean based on remote sensing and biogeochemical modeling. *Biogeosciences* 15 : 1335–1346. doi : 10.5194/bg-15-1335-2018.
- Letcher, R.J., Morris, A.D., Dyck, M., Sverko, E., Reiner, E.J., Blair, D.A.D., Chu, S.G., et Shen, L. 2018. Legacy and new halogenated persistent organic pollutants in polar bears from a contamination hotspot in the Arctic, Hudson Bay Canada. *Sci. Total Environ.* 610–611 : 121–136. doi : 10.1016/j.scitotenv.2017.08.035.
- Lewis, A.E., Hammill, M.O., Power, M., Doidge, D.W., et Lesage, V. 2009. Movement and aggregation of eastern Hudson Bay beluga whales (*Delphinapterus leucas*): A comparison of patterns found through satellite telemetry and Nunavik traditional ecological knowledge. *Arctic* 62 : 13–24. doi : 10.14430/arctic109.
- Li, W.K., McLaughlin, F.A., Lovejoy, C., et Carmack, E.C. 2009. Smallest algae thrive as the Arctic Ocean freshens. *Science* 326 : 539. doi : 10.1126/science.1179798.
- Link, H., Piepenburg, D., et Archambault, P. 2013. Are hotspots always hotspots? The relationship between diversity, resource and ecosystem functions in the Arctic. *PLoS ONE* 8 : e74077. doi : 10.1371/journal.pone.0074077.
- Linkin, M.E., et Nigam, S. 2008. The North Pacific Oscillation–West Pacific teleconnection pattern: Mature-phase structure and winter impacts. *J. Climate*. 21 : 1979–1997. doi : 10.1175/2007JCLI2048.1.
- Loewen, T.N., Gillis, D., et Tallman, R.F. 2010. Maturation, growth and fecundity of Arctic charr, *Salvelinus alpinus* (L.), life-history variants co-existing in lake systems of Southern Baffin Island, Nunavut, Canada. *Hydrobiol.* 650 : 193–202. doi : 10.1007/s10750-010-0242-7.
- López, E., Olivier, F., Grant, C., et Archambault, P. 2017. A new species and four new records of sedentary polychaetes from the Canadian High Arctic. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* 97 : 1685–1694. doi : 10.1017/S0025315416000953.
- Loseto, L.L., Stern, G.A., Connelly, T.L., Deibel, D., Gemmill, B., Prokopowicz, A., Fortier, L., et Ferguson, S.H. 2009. Summer diet of beluga whales inferred by fatty acid analysis of the eastern Beaufort Sea food web. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 374 : 12–18. doi : 10.1016/j.jembe.2009.03.015.
- Loseto, L., Wazny, T., Cleator, H., Ayles, B., Cobb, D., Harwood, L., Michel, C., Nielsen, O., Paulic, J., Postma, L., Ramlal, P., Richard, P., Ross, P.S., Solomon, S., Walkusz, W., Weilgart, L., et Williams, B. 2010. Information in Support of Indicator Selection for Monitoring the Tarniutait Marine Protected Area (TN MPA). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2010/094. iv + 42 p. Disponible du www.dfo-mpo.gc.ca/csas

sccs/Publications/ResDocs-DocRech/2010/2010_094-eng.html [date d'accès 08 February 2019].

- Loseto, L.L., Stern, G.A., et Macdonald, R.W. 2015. Distant drivers or local signals: Where do mercury trends in western Arctic belugas originate? *Sci. Total Environ.* 509-510 : 226–236. doi : 10.1016/j.scitotenv.2014.10.110.
- Loseto, L.L., Brewster, J.D., Ostertag, S.K., Snow, K., MacPhee, S.A., McNicholl, D.G., Choy, E.S., Giraldo, C., et Hornby, C.A. 2018a. Diet and feeding observations from an unusual beluga harvest in 2014 near Ulukhaktok, Northwest Territories, Canada. *Arctic Science* 4 : 421–431. doi : 10.1139/as-2017-0046.
- Loseto, L.L., Lam, J., et Iacozza, J. (eds.). 2018b. Beluga Summit: knowledge sharing of the eastern Beaufort Sea beluga whale. *Arctic Science* 4 : i–iv. doi : 10.1139/as-2018-0011.
- Loseto, L.L., Hoover, C., Ostertag, S., Whalen, D., Pearce, T., Paulic, J., Iacozza, J., et MacPhee, S. 2018c. Beluga whales (*Delphinapterus leucas*), environmental change and marine protected areas in the Western Canadian Arctic. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 212 : 128–137. doi : 10.1016/j.ecss.2018.05.026.
- Love, O.P., Gilchrist, H.G., Descamps, S., Semeiuk, C.A.D., et Bêty, J. 2010. Pre-laying climatic cues can time reproduction to optimally match offspring hatching and ice conditions in an Arctic marine bird. *Oecologia* 164 : 277–286. doi : 10.1007/s00442-010-1678-1.
- Lowry, L.F., Frost, K.J., et Burns, J.J. 1980. Variability in the diet of ringed seals, *Phoca hispida*, in Alaska. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37 : 2254–2261. doi : 10.1139/f80-270.
- Lunn, N. J., Servanty, S., Regehr, E.V., Converse, S.J., Richardson, E., et Stirling, I. 2016. Demography of an apex predator at the edge of its range: Impacts of changing sea ice on polar bears in Hudson Bay. *Ecol. Appl.* 26 : 1302–1320. doi : 10.1890/15-1256.
- MacLaren Marex. 1978. Report on marine benthic invertebrates of the southern Davis Strait and Ungava Bay for Imperial Oil Limited. Aquitaine Company of Canada, Ltd. and Canada Cities Service Ltd. MacLaren Marex, Dartmouth, Canada.
- Majewski, A.R., Lynn, B.R., Lowdon, M.K., Williams, W.J., et Reist, J.D. 2013. Community composition of demersal marine fishes on the Canadian Beaufort Shelf and at Herschel Island, Yukon Territory. *J. Mar. Syst.* 127 : 55–64. doi : 10.1016/j.jmarsys.2013.05.012.
- Majewski, A.R., Walkusz, W., Lynn, B.R., Atchison, S., Eert, J., et Reist, J.D. 2015. Distribution and diet of demersal Arctic Cod, *Boreogadus saida*, in relation to habitat characteristics in the Canadian Beaufort Sea. *Polar Biol.* 39 : 1087–1098. doi : 10.1007/s00300-015-1857-y.
- Majewski, A.R., Atchison, S.P., Suchy, K.D., Henry, J., MacPhee, S.A., Walkusz, W., Eert, J., Dempsey, M., Niemi, A., de Montety, L., Geoffroy, M., Giraldo, C., Michel, C.,

- Archambault, P., Williams, W.J., Fortier, L., et Reist, J.D. 2016. Beaufort Sea marine fishes project - update for stakeholders. Fisheries and Oceans Canada, Ottawa. viii + 57 p.
- Majewski, A.R., Atchison, S., MacPhee, S., Eert, J., Niemi, A., Michel, C., et Reist, J.D. 2017. Marine fish community structure and habitat associations on the Canadian Beaufort shelf and slope. *Deep Sea Res. I* 121 : 169–182. doi : 10.1016/j.dsr.2017.01.009.
- Manson, G.K., et Solomon, S.M. 2007. Past and future forcing of Beaufort Sea coastal change. *Atmos. Ocean.* 45 : 107–122. doi : 10.3137/ao.450204.
- Marchese, C., Albouy, C., Tremblay, J.-É., Dumont, D., D’Ortenzio, F., Vissault, S., et Bélanger, S. 2017. Changes in phytoplankton bloom phenology over the North Water (NOW) polynya: A response to changing environmental conditions. *Polar Biol.* 40 : 1721–1737. doi : 10.1007/s00300-017-2095-2.
- Marcoux, M., McMeans, B.C., Fisk, A.T., et Ferguson, S.H. 2012. Composition and temporal variation in the diet of beluga whales, derived from stable isotopes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 471 : 283–291. doi : 10.3354/meps10029.
- Marcoux, M., Young, B.G., Asselin, N.C., Watt, C.A., Dunn, J.B., et Ferguson, S.H. 2016. Estimate of Cumberland Sound beluga (*Delphinapterus leucas*) population size from the 2014 visual and photographic aerial survey. *Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc.* 2016/037 : iv + 19 p. Disponible du http://publications.gc.ca/collections/collection_2016/mpo-dfo/Fs70-5-2016-037-eng.pdf [date d’accès 08 February 2019].
- Marcoux, M., Ferguson, S.H., Roy, N., Bedard, J.M., et Simard, Y. 2017. Seasonal marine mammal occurrence detected from passive acoustic monitoring in Scott Inlet, Nunavut, Canada. *Polar Biol.* 40 : 1127–1138. doi : 10.1007/s00300-016-2040-9.
- Martin, J., Tremblay, J.-É., Gagnon, J., Tremblay, G., Lapoussière, A., Jose, C., Poulin, M., Gosselin, M., et Michel, C. 2010. Prevalence, structure and properties of subsurface chlorophyll maxima in Canadian Arctic waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 412 : 69–84. doi : 10.3354/meps08666.
- Martin, J., Tremblay, J.-É., et Price, N. 2012. Nutritive and photosynthetic ecology of subsurface chlorophyll maxima in Canadian Arctic waters. *Biogeosc. Disc.* 9 : 6445–6488. doi : 10.5194/bgd-9-6445-2012.
- Martin, J., Dumont, D., et Tremblay, J.-É. 2013. Contribution of subsurface chlorophyll maxima to primary production in the coastal Beaufort Sea (Canadian Arctic): A model assessment: Contribution of SCM in Beaufort Sea. *J. Geophys. Res. Oceans* 118 : 5873–5886. doi : 10.1002/jgrc.20424.
- Matthews, C.J.D., Luque, S.P., Petersen, S.D., Andrews, R.D., et Ferguson, S.H. 2011. Satellite tracking of a killer whale (*Orcinus orca*) in the eastern Canadian Arctic documents ice

- avoidance and rapid, long-distance movement into the North Atlantic. *Polar Biol.* 34 :1091–1096. doi : 10.1007/s00300-010-0958-x.
- Matthews, C.J.D., Raverty, S.A., Noren, D.P., Arragutainaq, L., et Ferguson, S.H. 2019. Ice entrapment mortality may slow expanding presence of Arctic killer whales. *Polar Biol.* 42 : 639–644. doi : 10.1007/s00300-018-02447-3.
- McClelland, J.W., Holmes, R.M., Dundon, K.H., et Macdonald, R.W. 2012. The Arctic Ocean estuary. *Estuaries Coast.* 35 : 353–368. doi : 10.1007/s12237-010-9357-3.
- McClelland, J.W., Holmes, R.M., Peterson, B.J., Raymond, P.A., Striegl, R.G., Zhulidov, A.V., Zimov, S.A., Zimov, N., Tank, S.E., Spencer, R.G.M., Staples, R., Gurtovaya, T.Y., et Griffin, C.G. 2016. Particulate organic carbon and nitrogen export from major Arctic rivers. *Global Biogeochem. Cy.* 30 : 629–643. doi : 10.1002/2015GB005351.
- McGhee, R. 1988. Beluga hunters: An archaeological reconstruction of the history and culture of the Mackenzie Delta Kittégaryumiut. Institute of Social and Economic Research, Memorial University of Newfoundland, St. John's. 124 p.
- McLaughlin, F., et Carmack, E.C. 2010. Deepening of the nutricline and chlorophyll maximum in the Canada Basin interior, 2003–2009. *Geophys. Res. Lett.* 37 : L24602. doi : 10.1029/2010GL045459.
- McNicholl, D., et Dunmall, K. 2018a. Sachs Harbour coastal fish survey July 2018. Disponible du <https://www.facebook.com/arcticsalmon/photos/a.140681756049965/1850298851754905/?type=3&theater> [date d'accès 08 February 2019].
- McNicholl, D., et Dunmall, K. 2018b. Darnley Bay coastal fish survey - July 3rd-18th, 2018. Disponible du <https://tinyurl.com/Darnley-Bay-2018> [date d'accès 08 February 2019].
- McNicholl, D.G., Walkusz, W., Davoren, G.K., Majewski, A.R., et Reist, J.D. 2016. Dietary characteristics of co-occurring polar cod (*Boreogadus saida*) and capelin (*Mallotus villosus*) in the Canadian Arctic, Darnley Bay. *Polar Biol.* 39 : 1099–1108. doi : 10.1007/s0030-015-1834-5.
- McNicholl, D.G., Johnson, J.D., et Reist, J.D. 2017. Darnley Bay nearshore survey: Synthesis of 2012 and 2014–2016 field programs. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 3229 : ix + 101 p. Disponible du http://publications.gc.ca/collections/collection_2017_mpo-dfo/Fs97-6-3229-eng.pdf [date d'accès 08 February 2019].
- Melling, H. 2002. Sea ice of the northern Canadian Arctic Archipelago. *J. Geophys. Res. : Oceans.* 107 : 2-1–2-21. doi : 10.1029/2001JC001102.

- Melling, H., et Riedel, D.A. 1995. The underside topography of sea ice over the continental shelf of the Beaufort Sea in the winter of 1990. *J. Geophys. Res. : Oceans* 100 : 13641–13653. doi : 10.1029/95JC00309.
- Melling, H., et Riedel, D.A. 1996. Development of seasonal pack ice in the Beaufort Sea during the winter of 1991–1992: A view from below. *J. Geophys. Res.* 101 : 11975–11991. doi : 10.1029/96JC00284.
- Melling, H., Gratton, Y., et Ingram, G. 2001. Ocean circulation within the North Water polynya of Baffin Bay. *Atmos. Ocean.* 39 : 301–325. doi : 10.1080/07055900.2001.9649683.
- Melling, H., Riedel, D.A., et Gedalof, Z. 2005. Trends in the draft and extent of seasonal pack ice, Canadian Beaufort Sea. *Geophys. Res. Lett.* 32 : L24501. doi : 10.1029/2005GL024483.
- Melnikov, I.A., Zhitina, L.S., et Semenova, T.N. 2017. Recent condition of the sea ice biodiversity within the North Pole region. *Problemy Arktiki I Antarktiki* 4 : 104–110.
- Merkel, F., Labansen, A.L., Boertmann, D., Mosbech, A., Egevang, C., Falk, K., Linnebjerg, J.F., Frederiksen, M., et Kampp, K. 2014. Declining trends in the majority of Greenland's thick-billed murre (*Uria lomvia*) colonies 1981–2011. *Polar Biol.* 37 : 1061–1071. doi : 10.1007/s00300-014-1500-3.
- Michel, C. 2013. Marine Ecosystems. *In Arctic Biodiversity Assessment. Status and trends in Arctic biodiversity. Edited by H. Meltofte. Conservation of Arctic Flora and Fauna, . Akureyri.* pp. 486-526. Disponible du <http://arcticlcc.org/assets/resources/ABA2013Science.pdf> [date d'accès 09 February 2019].
- Michel, C., Legendre, L., Therriault, J.-C., Demers, S., et Vandavelde, T. 1993. Springtime coupling between ice algal and phytoplankton assemblages in Southeastern Hudson Bay, Canadian Arctic. *Polar Biol.* 13 : 441–449. doi : 10.1007/BF00233135.
- Michel, C., Hamilton, J., Hansen, E., Barber, D., Reigstad, M., Iacozza, J., Seuthe, L., et Niemi, A. 2015. Arctic Ocean outflow shelves in the changing Arctic: A review and perspectives. *Prog. Oceanogr.* 139 : 66–88. doi : 10.1016/j.pocean.2015.08.007.
- Miller, D.D., Ota, Y., Sumaila, U.R., Cisneros-Montemayor, A.M., et Cheung, W.W.L. 2018. Adaptation strategies to climate change in marine systems. *Glob. Change Biol.* 24 : e1–e14. doi : 10.1111/gcb.13829.
- Miller, L.A., Macdonald, R.W., McLaughlin, F., Mucci, A., Yamamoto-Kawai, M., Giesbrecht, K.E., et Williams, W.J. 2014. Changes in the marine carbonate system of the western Arctic: Patterns in a rescued data set. *Polar Res.* 33 : 20577. doi : 10.3402/polar.v33.20577.

- Mol, J., Thomas, H., Myers, P.G., Hu, X., et Mucci, A. 2018. Inorganic carbon fluxes on the Mackenzie Shelf of the Beaufort Sea. *Biogeosciences* 15 : 1011–1027. doi : 10.5194/bg-15-1011-2018.
- Monier, A., Comte, J., Babin, M., Forest, A., Matsuoka, A., et Lovejoy, C. 2014. Oceanographic structure drives the assembly processes of microbial eukaryotic communities. *ISME J.* 9 : 990–1002. doi : 10.1038/ismej.2014.197.
- Moore, J.W. 1975. Reproductive biology of anadromous arctic char, *Salvelinus alpinus* (L.)? in the Cumberland Sound area of Baffin Island. *J. Fish Biol.* 7 : 143–151. doi : 10.1111/j.1095-8649.1975.tb04584.x.
- Moore, J.S., Harris, L.N., Tallman, R.F., et Taylor, E.B. 2013. The interplay between dispersal and gene flow in anadromous Arctic Char (*Salvelinus alpinus*): Implications for potential for local adaptation. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 70 : 1327–1338. doi : 10.1139/cjfas-2013-0138.
- Moore, S.E., et Huntington, H.P. 2008. Arctic marine mammals and climate change: Impacts and resilience. *Ecol. Appl.* 18 : S157–S165. doi : 10.1890/06-0571.1.
- Morrison, C. 2017. Life history strategies of northern form Dolly Varden (*Salvelinus malma malma*) in the western Canadian Arctic. Thesis (M.Sc.) University of Alberta, Edmonton, AB. x + 114 p. Disponible du <https://era.library.ualberta.ca/items/35535b22-aaa0-40dd-8391-fba8e22e8b19> [date d'accès 13 February 2019].
- MPO. 2005. Rapport d'évaluation du stock de l'omble chevalier de Kipisa. Secr. can de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2005/028. Disponible du <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/336796.pdf> [date d'accès 14 February 2019].
- MPO. 2009. Élaboration d'un cadre et de principes pour la classification biogéographique des zones marines canadiennes. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2009/056. Disponible du http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/publications/sar-as/2009/2009_056-fra.htm [date d'accès 14 February 2019].
- MPO. 2013a. Évaluation du Dolly Varden de la rivière Big Fish (T.N.-O) de 2009 à 2011. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2012/065. Disponible du <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/348051.pdf> [date d'accès 12 February 2019].
- MPO. 2013b. Mise à jour de l'évaluation de la pêche à l'omble chevalier de Cambridge Bay, de 1960 à 2009. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2013/051. Disponible du <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/349944.pdf> [date d'accès 12 February 2019].
- MPO. 2013c. Évaluation de l'omble chevalier (*Salvinelinus alpinus*) dans la rivière Sylvia Grinnell, au Nunavut, en 2009-2011. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2013/043. Disponible du http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/Publications/SAR-AS/2013/2013_043-fra.html [date d'accès 12 February 2019].

- MPO. 2013d. Estimations de l'abondance et du total autorisé de prélèvements de morse de l'Atlantique (*Odobenus rosmarus rosmarus*) dans l'Arctique canadien. Secr. can. de consult. sci., Avis sci. 2013/034. Disponible du <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/350374.pdf> [date d'accès 08 February 2019].
- MPO. 2015. Zone d'intérêt Anguniaqvia Niqiyuam : indicateurs, protocoles et stratégies de surveillance. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2015/025. Disponible du <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/364883.pdf> [date d'accès 08 February 2019].
- MPO. 2016a. Évaluation du stock d'ombles chevaliers (*Salvelinus alpinus*) dans la région de la baie Darnley, dans les Territoires du Nord-Ouest. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2015/024. Disponible du <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/364880.pdf> [date d'accès 12 February 2019].
- MPO. 2016b. Évaluation du stock d'ombles chevaliers (*Salvelinus alpinus*) dans la région d'Ulukhaktok, dans les Territoires du Nord-Ouest. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2016/038. Disponible du <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/40595109.pdf> [date d'accès 12 February 2019].
- MPO. 2016c. Estimations de l'abondance et totaux autorisés des prélèvements de morses de l'Atlantique (*Odobenus rosmarus rosmarus*) dans le bassin Foxe. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2016/007. Disponible du <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/365444.pdf> [date d'accès 08 February 2019].
- MPO. 2016d. Estimations de l'abondance et prélèvements totaux autorisés pour les stocks de morses de l'Atlantique (*Odobenus rosmarus rosmarus*) de la baie d'Hudson et du détroit de Davis et de la partie sud et est de la Baie d'Hudson. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2015/063. Disponible du <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/40574921.pdf> [date d'accès 08 February 2019].
- MPO. 2017a. Évaluation du Dolly Varden de la Rivière Babbage, au Territoire du Yukon 2010–2014. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2016/055. Disponible du <http://publications.gc.ca/site/fra/9.831269/publication.html> [date d'accès 12 February 2019].
- MPO. 2017b. Évaluation du Dolly Varden de la Rivière Rat, dans les Territoires du Nord-Ouest 2009–2014. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2016/058. Disponible du <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/40596709.pdf> [date d'accès 12 February 2019].
- MPO. 2018a. Incidence de l'emprisonnement de narvals (*Monodon monoceros*) dans les glaces en 2015 sur le stock du détroit D'Eclipse. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2018/012. Disponible du <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/4070810x.pdf> [date d'accès 08 February 2019].

- MPO. 2018b. Avis sur le prélèvement de béluga (*Delphinapterus leucas*) dans l'est et l'ouest de la baie d'Hudson. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2018/008. Disponible du <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/40712047.pdf> [date d'accès 08 February 2019].
- MPO. 2019. Rapport sur la désignation de la Zone de Protection Marine de Tuvaijuittuq. Disponible du <https://www.dfo-mpo.gc.ca/oceans/publications/tuvaijuittuq/designation/index-fra.html> [date d'accès 3 November 2019].
- Mueter, F., Nahrgang, J., Nelson, R.J., et Berge, J. 2016. The ecology of gadid fishes in the circumpolar Arctic with a special emphasis on the polar cod (*Boreogadus saida*). *Polar Biol.* 39 : 961–967. doi : 10.1007/s00300-016-1965-3.
- Mulder, I.M., Morris, C.J., Dempson, J.B., Fleming, I.A., et Power, M. 2018. Overwinter thermal habitat use in lakes by anadromous Arctic char. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 75 : 2343–2353. doi : 10.1139/cjfas-2017-0420.
- Münchow, A. 2016. Volume and freshwater flux observations from Nares Strait to the west of Greenland at daily time scales from 2003 to 2009. *J. Phys. Oceanogr.* 46 : 141–157. doi : 10.1175/JPO-D-15-0093.1.
- Mundy, C.J., Gosselin, M., Ehn, J., Gratton, Y., Rossnagel, A., Barber, D.G., Martin, J., Tremblay, J. É., Palmer, M., Arrigo, K.R., Darnis, G., et Fortier, L. 2009. Contribution of under-ice primary production to an ice-edge upwelling phytoplankton bloom in the Canadian Beaufort Sea. *Geophys. Res. Lett.* 36 : L17601. doi : 10.1029/2009GL038837.
- Mundy, C.J., Gosselin, M., Gratton, Y., Brown, K., Galindo, V., Campbell, K., Levasseur, M., Barber, D., Papkyriakou, T., et Bélanger, S. 2014. Role of environmental factors on phytoplankton bloom initiation under landfast sea ice in Resolute Passage, Canada. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 497 : 39–49. doi : 10.3354/meps10587.
- Mymrin, N.I., et Huntington, H.P. 1999. Traditional knowledge of the ecology of beluga whales (*Delphinapterus leucas*) in the Northern Bering Sea, Chukotka, Russia. *Arctic* 52 : 62–70. doi : 10.2307/40512181.
- Nelson, J.S. 2006. *Fishes of the world*, fourth edition. John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey. xix + 601 p.
- Neukermans, G., Reynolds, R.A., et Stramski, D. 2016. Optical classification and characterization of marine particle assemblages within the western Arctic Ocean. *Limnol. Oceanogr.* 61 : 1472–1494. doi : 10.1002/lno.10316.
- Nielsen, J.L., Ruggerone, G.T., et Zimmerman, C.E. 2013. Adaptive strategies and life history characteristics in a warming climate: Salmon in the Arctic? *Environ. Biol. Fish.* 96 : 1187–1226. doi : 10.1007/s10641-012-0082-6.

- Niemi, A., et Michel, C. 2015. Temporal and spatial variability in sea-ice carbon:nitrogen ratios on Canadian Arctic shelves. *Elementa: Sci. Anthrop.* 3 : 000078. doi : 10.12952/journal.elementa.000078.
- Niemi, A., Michel, C., Hille, K., et Poulin, M. 2011. Protist assemblages in winter sea ice: Setting the stage for the spring ice algal bloom. *Polar Biol.* 34 : 1803–1817. doi : 10.1007/s00300-011-1059-1.
- Noël, M., Loseto, L.L., et Stern, G. 2018. Legacy contaminants in the eastern Beaufort Sea beluga whales (*Delphinapterus leucas*): Are temporal trends reflecting regulations? *Arctic Science* 4 : 373–387. doi : 10.1139/as-2017-0049.
- Norton, P., et Harwood, L.A. 1985. White whale use of the southeastern Beaufort Sea, July-September 1984. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 1401 : v + 46 p. Disponible du http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/mpo-dfo/Fs97-6-1401-eng.pdf [date d'accès 09 February 2019].
- Nunavut Coastal Resource Inventory – Pangnirtung. 2013. Nunavut Department of Environment, Iqaluit, NU. 113 p. Disponible du https://www.gov.nu.ca/sites/default/files/ncri_pangnirtung_en_0.pdf [date d'accès 09 February 2019].
- Obbard, M.E., Cattet, M.R.L., Howe, E.J., Middel, K.R., Newton, E.J., Kolenosky, G.B., Abraham, K.F., et Greenwood, C.J. 2016. Trends in body condition in polar bears (*Ursus maritimus*) from the southern Hudson Bay subpopulation in relation to changes in sea ice. *Arctic Sci.* 2 : 15–32. doi : 10.1139/as-2015-0027.
- Obbard, M.E., Stapleton, S., Szor, G., Middel, K.R., Jutras, C., et Dyck, M. 2018. Re-assessing abundance of southern Hudson Bay polar bears by aerial survey: Effects of climate change at the southern edge of the range. *Arctic Sci.* 4 : 634–655. doi : 10.1139/as-2018-0004.
- Obbard, R.W., Sadri, S., Wong, Y.Q., Khitun, A.A., Baker, I., et Thompson, R.C. 2014. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic sea ice. *Earth's Future* 2 : 315–320. doi : 10.1002/2014EF000240.
- Obu, J., Lantuit, H., Grosse, G., Günther, F., Sachs, T., Helm, V., and Fritz, M. 2017. Coastal erosion and mass wasting along the Canadian Beaufort Sea based on annual airborne LiDAR elevation data. *Geomorphology* 293 : 331–346. doi : 10.1016/j.geomorph.2016.02.014.
- Ogloff, W.R., Yurkowski, D.J., Davoren, G.K., et Ferguson, S.H. 2019. Diet and isotopic niche overlap elucidate competition potential between seasonally sympatric phocids in the Canadian Arctic. *Mar. Biol.* 166 :103. doi : 10.1007/s00227-019-3549-6.

- Osborne, E., Richter-Menge, J., et Jeffries, M. (eds.). 2018. Arctic report card 2018. Disponible du : <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card> [date d'accès 11 February 2019].
- Ostertag, S., Loseto, L., Snow, K., Lam, J., Hynes, K., et Gillman, V. 2018. "That's how we know they're healthy": The inclusion of Indigenous Knowledge in beluga health monitoring in the Inuvialuit Settlement Region. *Arctic Science* 4 : 292–320. doi : 10.1139/as-2017-0050.
- Palmer, M.A., Saenz, B.T., et Arrigo, K.A. 2014. Impacts of sea ice retreat, thinning, and melt-pond proliferation on the summer phytoplankton bloom in the Chukchi Sea, Arctic Ocean. *Deep Sea Res. II* 105 : 85–104. doi : 10.1016/j.dsr2.2014.03.016.
- PAME. 2019. Underwater noise in the Arctic: A state of knowledge report. Protection of the Arctic Marine Environment (PAME) Secretariat, Akureyri. Disponible du <https://oaarchive.arctic-council.org/bitstream/handle/11374/2394/Underwater%20noise%20report.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Parsons, T.R., Webb, D.G., Rokeby, B.E., Lawrence, M., Hopky, G.E., et Chipertzak, D.B. 1989. Autotrophic and heterotrophic production in the Mackenzie river/Beaufort sea estuary. *Polar Biol.* 9 : 261–266. doi : 10.1007/BF00263774.
- Paull, C.K., Dallimore, S.R., Caress, D.W., Gwiazda, R., Melling, H., Riedel, M., Jin, Y.K., Hong, J.K., Kim, Y.-G., Graves, D., Sherman, A., Lundsten, E., Anderson, K., Lundsten, L., Villinger, H., Kopf, A., Johnson, S.B., Hughes Clarke, J., Blasco, S., Conway, K., Neelands, P., Thomas, H., et Côté, M. 2016. Active mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 16 : 3160–3181. doi : 10.1002/2015GC005928.
- Pedrés-Alió, C., Potvin, M., et Lovejoy, C. 2015. Diversity of planktonic microorganisms in the Arctic Ocean. *Prog. Oceanogr.* 139 : 233–243. doi : 10.1016/j.pocean.2015.07.009.
- Peeken, I., Primpke, S., Beyer, B., Gütermann, J., Katlein, C., Krumpfen, T., Bergmann, M., Hehemann, L., et Gerds, G. 2018. Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic. *Nat. Commun.* 9 : 1505. doi : 10.1038/s41467-018-03825-5.
- Peklova, I., Hussey, N.E., Hedges, K.J., Treble, M.A., et Fisk, A.T. 2012. Depth and temperature preferences of the deepwater flatfish Greenland halibut *Reinhardtius hippoglossoides* in an Arctic marine ecosystem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 467 : 193–205. doi : 10.3354/meps09899.
- Peklova, I., Hussey, N.E., Hedges, K.J., Treble, M.A., et Fisk, A.T. 2014. Movement, depth and temperature preferences of an important bycatch species, Arctic skate (*Amblyraja hyperborea*) in Cumberland Sound, Canadian Arctic. *Endanger. Species Res.* 23 : 229–240. doi : 10.3354/esr00563.

- Peralta-Ferriz, C., et Woodgate, R.A. 2015. Seasonal and interannual variability of pan-Arctic surface mixed layer properties from 1979 to 2012 from hydrographic data, and the dominance of stratification for multiyear mixed layer depth shoaling. *Prog. Oceanogr.* 134 : 19–53. doi : 10.1016/j.pocean.2014.12.005.
- Perovich, D. Meier, W., Tschudi, S., Farrell, S., Hendricks, S., Gerland, S., Haas, C., Krumpen, T., Polashenski, C., Ricker, R., et Webster, M. 2018. Sea ice. *In Arctic Report Card 2018*. Disponible du <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>. [date d'accès 9 February 2019]
- Peterson, I., Hamilton, J., Prinsenber, S., et Pettipas, R. 2012. Wind-forcing of volume transport through Lancaster Sound. *J. Geophys. Res.* 117 : C11018. doi : 10.1029/2012JC008140.
- Pikialasorsuaq Commission. 2017. People of the ice bridge: The future of the Pikialasorsuaq. Report of the Pikialasorsuaq Commission. November 2017. 119 p. Disponible du <http://www.pikialasorsuaq.org/en/Resources/Reports> [date d'accès 09 February 2019].
- Pine, M.K., Hannay, D.E., Insley, S.J., Halliday, W.D., et Juanes, F. 2018. Assessing vessel slowdown for reducing auditory masking for marine mammals and fish of the western Canadian Arctic. *Mar. Pollut. Bull.* 135 : 290–302. doi : 10.1016/j.marpolbul.2018.07.031.
- Piwosz, K., Wiktor, J.M., Niemi, A., Taterek, A., et Michel, C. 2013. Mesoscale distribution and functional diversity of picoeukaryotes in the first-year sea ice of the Canadian Arctic. *ISME J.* 7 : 1461–1471. doi : 10.1038/ismej.2013.39.
- Pizzolato, L., Howell, S.E.L., Dawson, J., Laliberté, F., et Copland, L. 2016. The influence of declining sea ice on shipping activity in the Canadian Arctic. *Geophys. Res. Lett.* 43 : 12146–12154. doi : 10.1002/2016GL071489.
- Pomerleau, C., Winkler, G., Sastri, A.R., Nelson, R.J., Vagle, S., Lesage, V., et Ferguson, S.H. 2011. Spatial patterns in zooplankton communities across the eastern Canadian sub-Arctic and Arctic waters: Insights from stable carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) isotope ratios. *J. Plank. Res.* 33 : 1779–1792. doi : 10.1093/plankt/fbr080.
- Poulin, M., Daugbjerg, N., Gradinger, R., Ilyash, L., Ratkova, T., et von Quillfeldt, C. 2011. The pan-Arctic biodiversity of marine pelagic and sea-ice unicellular eukaryotes: A first-attempt assessment. *Mar. Biodiv.* 41 : 13–28. doi : 10.1007/s12526-010-0058-8.
- Poulin, M., Underwood, G.J.C., et Michel, C. 2014. Sub-ice colonial *Melosira arctica* in Arctic first-year ice. *Diatom Res.* 29 : 213–221. doi : 10.1080/0269249X.2013.877085.
- Proshutinsky, A.Y., et Johnson, M.A. 1997. Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean. *J. Geophys. Res. : Oceans* 102 : 12493–12514. doi : 10.1029/97JC00738.

- Proshutinsky, A., Dukhovskoy, D., Timmermans, M.L., Krishfield, R., et Bamber, J.L. 2015. Arctic circulation regimes. *Phil. Trans. R. Soc. A* 373 : 20140160. doi : 10.1098/rsta.2014.0160.
- Proshutinsky, A., Krishfield, R., et Timmermans, M.-L. 2019. Preface to special issue Forum for Arctic Ocean Modeling and Observational Synthesis (FAMOS) 2: Beaufort Gyre phenomenon. *J. Geophys. Res. : Oceans* 124. doi : 10.1029/2019JC015400.
- Qi, D., Chen, L., Chen, B., Gao, Z., Zhong, W., Feely, R.A., Anderson, L.G., Sun, H., Chen, J., Chen, M., Zhan, L., Zhang, Y., et Cai, W.-J. 2017. Increase in acidifying water in the western Arctic Ocean. *Nat. Clim. Change* 7 : 195–199. doi : 10.1038/nclimate3228.
- Quinn, N.L., McGowan, C.R., Cooper, G.A., Koop, B.F., et Davidson, W.S. 2011. Ribosomal genes and heat shock proteins as putative markers for chronic, sublethal stress in Arctic charr: Applications for aquaculture and wild fish. *Physiol. Genomics* 43 : 1056–1064. doi : 10.1152/physiolgenomics.00090.2011.
- Rachold, V., Eicken, H., Gordeev., V.V., Grigoriev, M.N., Hubberten, H.-W., Lisitzin, A.P., Shevchenko, V.P., et Schirrmeister, L. 2004. Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean. *In The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Edited by R. Stein, et R.W. Macdonald.* Springer, Berlin. pp. 33–55.
- Ramage, J.L., Irrgang, A.M., Morgenstern, A., et Lantuit, H. 2018. Increasing coastal slump activity impacts the release of sediment and organic carbon into the Arctic Ocean. *Biogeosciences* 15 : 1483–1495. doi : 10.5194/bg-15-1483-2018.
- Rand, K.M., et Logerwell, E.A. 2010. The first demersal trawl survey of benthic fish and invertebrates in the Beaufort Sea since the late 1970s. *Polar Biol.* 34 : 475–488. doi : 10.1007/s00300-010-0900-2.
- Ratajczak, Z., Carpenter, S.R., Ives, A.R., Kucharik, C.J., Ramiadantsoa, T., Stegner, M.A., Williams, W.J., Zhang, J., et Turner, M.G. 2018. Abrupt change in ecological systems: Inference and diagnosis. *Trends Ecol. Evol.* 33 : 513–526. doi : 10.1016/j.tree.2018.04.013.
- Reeves, R.R. 1998. Distribution, abundance and biology of ringed seals (*Phoca hispida*): An overview. *NAMMCO Sci. Pub.* 1 : 9–45. doi : 10.7557/3.2979.
- Reinhart, N., Fortune, S., Richard, P., et Matthews, C. 2014. Rare sightings of white-beaked dolphins (*Lagenorhynchus albirostris*) off south-eastern Baffin Island, Canada. *Mar. Biodivers. Rec.* 7 : E121. doi : 10.1017/S1755267214001031.
- Reist, J.D., et Bond, W.A. 1988. Life history characteristics of migratory coregonids of the lower Mackenzie River, Northwest Territories, Canada. *Finnish Fish. Res.* 9 : 133–144.

- Reist, J.D., Wrona, F.J., Prowse, T.D., Power, M., Dempson, J.B., King, J.R., et Beamish, R.J. 2006a. An overview of effects of climate change on selected Arctic freshwater and anadromous fishes. *Ambio* 35 : 381–387. doi : 10.1579/0044-7447(2006)35%5B381:A00EOC%5D2.0.CO;2.
- Reist, J.D., Wrona, F.J., Prowse, T.D., Power, M., Dempson, J.B., Beamish, R.J., King, J.R., Carmichael, T.J., et Sawatzky, C.D. 2006b. General effects of climate change on Arctic fishes and fish populations. *Ambio* 35 : 370–380. doi : 10.1579/0044-7447(2006)35[370:GEOCCO]2.0.CO;2.
- Renaud, P.E., Riedel, A., Morata, N., Gosselin, M., Michel, C., Juul-Pedersen, T., et Chiuchiolo, A. 2007. Seasonal variation in the benthic community oxygen demand: A response to an ice algal bloom in the Beaufort Sea, Canadian Arctic? *J. Mar. Syst.* 67 : 1–12. doi : 10.1016/j.marsys.2006.07.006.
- Renaut, S., Devred, E., et Babin, M. 2018. Northward expansion and intensification of phytoplankton growth during the early ice-free season in Arctic. *Geophys. Res. Lett.* 45 : 10590–10598. doi : 10.1029/2018GL078995.
- Rice, D.W. 1998. Marine mammals of the world: Systematics and distribution. The Society for Marine Mammalogy, Special Publication Number 4. Allen Press, Inc., Lawrence, KS. ix + 231 p.
- Richard, P.R., Martin, A.R., et Orr, J.R. 2001. Summer and autumn movements of belugas of the eastern Beaufort Sea stock. *Arctic* 54 : 223–236. doi : 10.14430/arctic783.
- Riedlinger, D., et Berkes, F. 2001. Contributions of traditional knowledge to understanding climate change in the Canadian Arctic. *Polar Rec.* 37 : 315–328. doi : 10.1017/S0032247400017058.
- Roth, E.H., Schmidt, V., Hildebrand, J.A., et Wiggins, S.M. 2013. Underwater radiated noise levels of a research icebreaker in the central arctic ocean. *J. Acoust. Soc. Am.* 133 : 1971–2013. doi : 10.1121/1.4790356.
- Roux, M.-J., Tallman, R.F., et Lewis, C.W. 2011. Small-scale Arctic charr *Salvelinus alpinus* fisheries in Canada's Nunavut: management challenges and options. *J. Fish Biol.* 79 : 1625–1647. doi : 10.1111/j.1095-8649.2011.03092.x.
- Roux, M.-J., Howland, K., Gallagher, C.P., et Tallman, R.F. 2012. Synthesis of biological and harvest information used to assess populations of northern form Dolly Varden (*Salvelinus malma malma*) in Canada. Part I: Rat River. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2011/132. viii + 77 p. Disponible du <http://publications.gc.ca/site/eng/458620/publication.html> [date d'accès 13 February 2019].

- Roux, M.-J., Tallman, R.F., et Martin, Z.A. 2019. Small-scale fisheries in Canada's Arctic: Combining science and fishers knowledge towards sustainable management. *Mar. Policy* 101 : 177–186. doi : 10.1016/j.marpol.2018.01.016.
- Roy, V., et Gagnon, J.M. 2018. Natural history museum data on Canadian Arctic marine benthos. *Mar. Biodiv.* 48 : 1357–1367. doi : 10.1007/s12526-016-0610-2.
- Roy, V., Iken, K., et Archambault, P. 2014. Environmental drivers of the Canadian Arctic megabenthic communities. *PLoS ONE* 9 : e100900. doi : 10.1371/journal.pone.0100900.
- Roy, V., Iken, K., Gosselin, M., Tremblay, J.-É., Bélanger, S., et Archambault, P. 2015a. Benthic faunal assimilation pathways and depth-related changes in food-web structure across the Canadian Arctic. *Deep Sea Res. I* 102 : 55–71. doi : 10.1016/j.dsr.2015.04.009.
- Roy, V., Iken, K., et Archambault, P. 2015b. Regional variability of megabenthic community structure across the Canadian Arctic. *Arctic* 68 : 180–192. doi : 10.14430/arctic4486.
- Róžańska, M., Gosselin, M., Poulin, M., Wiktor, J.M., et Michel, C. 2009. Influence of environmental factors on the development of bottom landfast ice protists in the Canadian Beaufort Sea during the winter-spring transition. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 386 : 43–59. doi : 10.3354/meps08092.
- RSEA. 2018. Beaufort Sea Regional Strategic Environmental Assessment. <https://rsea.inuvialuit.com>.
- Rudels, B. 1986. The outflow of polar water through the Arctic Archipelago and the oceanographic conditions in Baffin Bay. *Polar Res.* 4 : 161–180. doi : 10.3402/polar.v4i2.6929.
- Ruiz, G., et Carlton, J. 2003. Invasion vectors: A conceptual framework for management. *In Invasive Species: Vectors and Management Strategies. Edited by G. Ruiz, et J. Carlton.* Island Press, Washington. pp. 459–504.
- Samelson, R.M., Agnew, T., Melling, H., et Münchow, A. 2006. Evidence for atmospheric control of sea-ice motion through Nares Strait. *Geophys. Res. Lett.* 33 : L02506. doi : 10.1029/2005GL025016.
- Sandstrom, S., Harwood, L., et Howland, K. 2009. Status of anadromous Dolly Varden Charr (*Salvelinus malma*) of the Rat River, Northwest Territories, as assessed through mark-recapture and live-sampling at the spawning and overwintering site (1995-2007). *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2842 : vi + 68 p. Disponible du <http://publications.gc.ca/site/eng/429445/publication.html> [date d'accès 13 February 2019].
- Savoir polaire Canada. 2017. Faire progresser la science et la collaboration en matière polaire. *Savoir polaire Canada : Rapport 2015–2017.* Savoir polaire Canada, Ottawa, ON. 28 p.

Disponible du <https://www.canada.ca/content/dam/polar-polaire/documents/pdf/polar-annual-report-2015-2017-FR.pdf> [date d'accès 13 February 2019].

- Sawatzky, C.D., Boguski, D.A., Moons, B., Reist, J.D., et Martin, K. 2018. Results of the 2015 General Status Assessment of selected marine invertebrates, fishes, and marine mammals in DFO's Central and Arctic Region. Can. Data Rep. Fish. Aquat. Sci. 1286 : vii + 45 p. Disponible du <http://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/40709632.pdf> [date d'accès 09 February 2019].
- Schweder, T., Sadykova, D., Rugh, D.J., et Koski, W.R. 2010. Population estimates from aerial photographic surveys of naturally and variably marked bowhead whales. J. Agr. Biol. Envir. St. 15 : 1–19. doi : 10.1007/s13253-009-0002-1.
- Sciullo, L., Thiemann, G.W., et Lunn, N.J. 2016. Comparative assessment of metrics for monitoring the body condition of polar bears in western Hudson Bay. J. Zool. 300 : 45–58. doi : 10.1111/jzo.12354.
- Sepp, M., et Jaagus, J. 2011. Changes in the activity and tracks of Arctic cyclones. Clim. Change 105 : 577–595. doi : 10.1007/s10584-010-9893-7.
- Sergeant, D.E. 1973. Biology of white whales (*Delphinapterus leucas*) in Western Hudson Bay. J. Fish. Res. Board Can. 30 : 1065–1090. doi : 10.1139/f73-178.
- Service canadien des glaces. 2019. Graphe des glaces [website], <https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page1.xhtml?lang=fr> [date d'accès 11 February 2019].
- Siferd, T. 2015. Central and Arctic multi-species stock assessment surveys version 6 In OBIS Canada Digital Collections. Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, NS, Canada. Published by OBIS, Digital. Disponible du <http://www.iobis.org/> [date d'accès 09 February 2019].
- Sipler, R.E., Gong, D., Baer, S.E., Sanderson, M.P., Roberts, Q.N., Mulholland, M.R., et Bronk, D.A. 2017. Preliminary estimates of the contribution of Arctic nitrogen fixation to the global nitrogen budget. Limnol. Oceanogr. Lett. 2 : 159–166. doi : 10.1002/lol2.10046.
- Smith, T.G., St. Aubin, D.J., et Hammill, M. 1992. Rubbing behaviour of belugas, *Delphinapterus leucas*, in a high Arctic estuary. Can. J. Zool. 70 : 2405–2409. doi : 10.1139/z92-322.
- Smoot, C.A., et Hopcroft, R.R. 2017. Depth-stratified community structure of Beaufort Sea slope zooplankton and its relations to water masses. J. Plankton Res. 39 : 79–91. doi : 10.1093/plankt/fbw087.
- Smythe, T.A., Loseto, L.L., Bignert, A., Rosenberg, B., Budakowski, W., Halldorson, T., Pleskach, K., et Tomy, G.T. 2018. Temporal trends of brominated and fluorinated

- contaminants in Canadian Arctic beluga (*Delphinapterus leucas*). *Arctic Sci.* 4 : 388–404. doi : 10.1139/as-2017-0044.
- Søreide, J.A., Leu, E., Berge, J., Graeve, M., et Falk-Petersen, S. 2010. Timing of blooms, algal food quality and *Calanus glacialis* reproduction and growth in a changing Arctic. *Global Change Biol.* 16 : 3154–3163. doi : 10.1111/j.1365-2486.2010.02175.x.
- Sprules, W.M., 1952. The Arctic Char of the west coast of Hudson Bay. *J. Fish. Res. Board Can.* 9 : 1–15. doi : 10.1139/f52-001.
- St. Aubin, D.J., Smith, T.G., et Geraci, J.R. 1990. Seasonal epidermal moult in beluga whales, *Delphinapterus leucas*. *Can. J. Zool.* 68 : 359–364. doi : 10.1139/z90-051.
- Stafford, K.M., Ferguson, M.C., Hauser, D.D.W., Okkonen, S.R., Berchok, C.L., Citta, J.J., Clarke, J.T., Garland, E.C., Jones, J., et Suydam, R.S. 2018. Beluga whales in the western Beaufort Sea: current state of knowledge on timing, distribution, habitat use and environmental drivers. *Deep Sea Res. II* 152 : 182–194. doi : 10.1016/j.dsr2.2016.11.017.
- Stanley, R.H.R., Sandwith, Z.O., et Williams, W.J. 2015. Rates of summertime biological productivity in the Beaufort Gyre: A comparison between the low and record-low ice conditions of August 2011 and 2012. *J. Mar. Syst.* 147 : 29–44. doi : 10.1016/j.jmarsys.2014.04.006.
- Stasko, A.D., Bluhm, B.A., Michel, C., Archambault, P., Majewski, A., Reist, J.D., Swanson, H., et Power, M. 2018. Benthic-pelagic trophic coupling in an Arctic marine food web along vertical water mass and organic matter gradients. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 594 : 1–19. doi : 10.3354/meps12582.
- Steiner, N., Azetsu-Scott, K., Hamilton, J., Hedges, K., Hu, X., Janjua, M.Y., Lavoie, D., Loder, J., Melling, H., Merzouk, A., Perrie, W., Peterson, I., Scarratt, M., Sou, T., et Tallmann, R. 2015. Observed trends and climate projections affecting marine ecosystems in the Canadian Arctic. *Environ. Rev.* 23 : 191–239. doi : 10.1139/er-2014-0066.
- Steiner, N., Drost, H.E., et Hunter, K. 2018. A physiological limits database for Arctic and Subarctic species. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 3256, v + 56 p. Disponible du <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/40691160.pdf> [date d'accès 09 October 2019].
- Stephenson, S., Burrows, J.A., et Babaluk, J.A. 2005. Long-distance migrations by Inconnu (*Stenodus leucichthys*) in the Mackenzie River system. *Arctic* 58 : 21–25. doi : 10.14430/arctic385.
- Stevenson, M.G. 2004. Decolonizing co-management in northern Canada. *Cultural Survival Quarterly* 28-1 : 68.

- Stewart, R.E.A., et Hamilton, J.W. 2013. Estimating total allowable removals for walrus (*Odobenus rosmarus rosmarus*) in Nunavut using the potential biological removal approach. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2013/031 : iv + 13 p. Disponible du <http://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/350227.pdf> [date d'accès 09 February 2019].
- Stirling, I. 1997. The importance of polynyas, ice edges, and leads to marine mammals and birds. *J. Mar. Syst.* 10 : 9–21. doi : 10.1016/S0924-7963(96)00054-1.
- Stirling, I., Lunn, N. J., et Iacozza, J. 1999. Long-term trends in the population ecology of polar bears in Western Hudson Bay in relation to climatic change. *Arctic* 52 : 294–306. doi : 10.14430/arctic935.
- Stroeve, J., et Notz, D. 2018. Changing state of Arctic sea ice across all seasons. *Environ. Res. Lett.* 13 : 103001. doi : 10.1088/1748-9326/aade56.
- Stroeve, J., Serreze, M., Drobot, S., Gearheard, S., Holland, M., Maslanik, J., Meier, W., et Scambos, T. 2008. Arctic sea ice extent plummets in 2007. *Trans. Am. Geophys. Union* 89 : 13–14. doi : 10.1029/2008EO020001.
- Syvitski, J.P.M., LeBlanc, K.W.G., et Cranston, R.E. 1990. The flux and preservation of organic carbon in Baffin Island fjords. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 53 : 177–199. doi : 10.1144/GSL.SP.1990.053.01.10.
- Tallman, R.F., Zhu, X., Janjua, Y., Toyne, M., Roux, M.-J., Harris, L., Howland, K.L., et Gallagher, C. 2013. Data limited assessment of selected North American anadromous charr stocks. *J. Ichthyol.* 53 : 867–874. doi : 10.1134/S0032945213100123.
- Tallman, R.F., Roux, M.-J., et Martin, Z.A. 2019. Governance and assessment of small-scale data-limited Arctic Charr fisheries using productivity-susceptibility analysis coupled with life history invariant models. *Mar. Policy* 101 : 187-197. doi : 10.1016/j.marpol.2017.11.032.
- Tempestini, A., Rysgaard, S., et Dufresne, F. 2018. Species identification and connectivity of marine amphipods in Canada's three oceans. *PLoS ONE* 13 : e0197174. doi : 10.1371/journal.pone.0197174.
- Tervo, O.M., Christoffersen, M.F., Simon, M., Miller, L.A., Jensen, F.H., Parks, S.E., et Madsen, P.T. 2012. High source levels and small active space of high-pitched song in bowhead whales (*Balaena mysticetus*). *PLoS ONE* 7 : e52072. doi : 10.1371/journal.pone.0052072.
- Thompson, D.W.J. 2019. Annular modes website, <http://www.atmos.colostate.edu/~davet/ao/index.html> [date d'accès 11 February 2019].

- Towns, L., Derocher, A.E., Stirling, I., Lunn, N.J., et Hedman, D. 2009. Spatial and temporal patterns of problem bears in Churchill, Manitoba. *Polar Biol.* 32 : 1529–1537. doi : 10.1007/s00300-009-0653-y.
- Treble, M.A., et Nogueira, A. 2018. Assessment of the Greenland halibut stock component in NAFO subarea 0 + division 1A (offshore) and divisions 1B-1F. NAFO SCR Doc. 18/040 : 32 p. Disponible du <https://www.nafo.int/Portals/0/PDFs/sc/2018/scr18-040.pdf> [date d'accès 13 February 2019].
- Tremblay J.-É., et Gagnon, J. 2009. The effects of irradiance and nutrient supply on the productivity of Arctic waters: A perspective on climate change. *In* Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions. *Edited by* J.C.J. Nihoul, et A.G. Kostianoy. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht. pp. 73–93. doi : 10.1007/978-1-4020.
- Tremblay, J.-É., Michel, C., Hobson, K.A., Gosselin, M., et Price, N.M. 2006a. Bloom dynamics in early-opening waters of the Arctic Ocean. *Limnol. Oceanogr.* 51 : 900–912. doi : 10.4319/lo.2006.51.2.0900.
- Tremblay, J.-É., Hattori, H., Michel, C., Ringuette, M., Mei, Z.-P., Lovejoy, C., Fortier, L., Hobson, K.A., Amiel, D., et Cochran, K. 2006b. Trophic structure and pathways of biogenic carbon flow in the eastern North Water polynya. *Prog. Oceanogr.* 71 : 402–425. doi : 10.1016/j.pocean.2006.10.006.
- Tremblay, J.-É., Bélanger, S., Barber, D.G., Asplin, M., Martin, J., Darnis, G., Fortier, L., Gratton, Y., Link, H., Archambault, P., Sallon, A., Michel, C., Williams, W.J., Philippe, B., et Gosselin, M. 2011. Climate forcing multiplies biological productivity in the coastal Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.* 38 : L18604. doi : 10.1029/2011GL048825.
- Tremblay, J.-É., Robert, D., Varela, D.E., Lovejoy, C., Darnis, G., Nelson, R.J., et Sastri, A.R. 2012. Current state and trends in Canadian Arctic marine ecosystems: I. Primary production. *Clim. Change* 115 : 161–178. doi : 10.1007/s10584-012-0496-3.
- Tremblay, J.-É., Raimbault, P., Garcia, N., Lansard, B., Babin, M., et Gagnon, J. 2014. Impact of river discharge, upwelling and vertical mixing on the nutrient loading and productivity of the Canadian Beaufort Shelf. *Biogeosci.* 11 : 4853–4868. doi : 10.5194/bg-11-4853-2014.
- Tremblay, J.-É., Anderson, L.G., Matrai, P., Coupel, P., Bélanger, S., Michel, C., et Reigstad, M. 2015. Global and regional drivers of nutrient supply, primary production and CO₂ drawdown in the changing Arctic Ocean. *Prog. Oceanogr.* 139 : 171–196. doi : 10.1016/j.pocean.2015.08.009.

- Tremblay, M., Frugal, C., Larrivee, C., Annanack, T., Tookalook, P., Qiisik, M., Angiyou, E., Swappie, N., Savard, J., et Barrett, M. 2008. Climate change in northern Quebec: Adaptation strategies from community-based research. *Arctic* 61 : 27–34. doi : 10.14430/arctic99.
- Trenberth, K.E., et Hurrell, J.W. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Clim. Dynam.* 9 : 303–319. doi : 10.1007/BF00204745.
- Trenberth, K.E., et Hurrell, J.W. 2019. The climate data guide: North Pacific (NP) [website], <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/north-pacific-np-index-trenberth-and-hurrell-monthly-and-winter> [date d'accès 12 February 2019].
- Turk, D., Bedard, J.M., Burt, W.J., Vagle, S., Thomas, H., Azetsu-Scott, K., McGillis, W.R., Iverson, S.J., et Wallace, D.W.R. 2016. Inorganic carbon in a high latitude estuary-fjord system in Canada's eastern Arctic. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 178 : 137–147. doi : 10.1016/j.ecss.2016.06.006.
- Tynan, E., Clarke, J.S., Humphreys, M.P., Ribas-Ribas, M., Esposito, M., Rérolle, V.M.C., Schlosser, C., Thorpe, S.E., Tyrrell, T., et Achterberg, E.P. 2016. Physical and biogeochemical controls on the variability in surface pH and calcium carbonate saturation states in the Atlantic sectors of the Arctic and Southern Oceans. *Deep Sea Res. II* 127 : 7–27. doi : 10.1016/j.dsr2.2016.01.001.
- Ulrich, K.L. 2013. Trophic ecology of Arctic Char (*Salvelinus alpinus* L.) in the Cumberland Sound region of the Canadian Arctic. Thesis (M.Sc.) University of Manitoba, Winnipeg, MB. xiii + 211 p. Disponible du <https://mspace.lib.umanitoba.ca/xmloi/handle/1993/21693> [date d'accès 13 February 2019].
- Vancoppenolle, M., Meiners, K.M., Michel, C., Bopp, L., Brabant, F., Gauthier, C., Delille, B., Lannuzel, D., Madec, G., Moreau, S., Tison, J.-L., et van der Merwe, P. 2013. Role of sea ice in global biogeochemical cycles: Emerging views and challenges. *Quat. Sci. Rev.* 79 : 207–230. doi : 10.1016/j.quascirev.2013.04.011.
- Vermaire, J.C., Pisaric, M.F.J., Thienpont, J.R., Courtney Mustaphi, C.J., Kokelj, S.V., et Smol, J.P. 2013. Arctic climate warming and sea ice declines lead to increased storm surge activity. *Geophys. Res. Lett.* 40 : 1386–1390. doi : 10.1002/grl.50191.
- Wang, J., Zhang, J., Watanabe, E., Ikeda, M., Mizobata, K., Walsh, J. E., Bai, X., et Wu, B. 2009. Is the Dipole Anomaly a major driver to record lows in Arctic summer sea ice extent? *Geophys. Res. Lett.*, 36 : L05706. doi : 10.1029/2008GL036706.
- Wang, Q., Wekerle, C., Danilov, S., Koldunov, N., Sidorenko, D., Sein, D., Rabe, B., et Jung, T. 2018. Arctic sea ice decline significantly contributed to the unprecedented liquid freshwater accumulation in the Beaufort Gyre of the Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.* 45 : 4956–4964. doi : 10.1029/2018GL077901.

- Wassmann, P. 2015. Overarching perspectives of contemporary and future ecosystems in the Arctic Ocean. *Prog. Oceanogr.* 139 : 1–12. doi : 10.1016/j.pocean.2015.08.004.
- Wathne, J.A., Haug, T., et Lydersen, C. 2000. Prey preference and niche overlap of ringed seals *Phoca hispida* and harp seals *P. groenlandica* in the Barents Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 194 : 233–239. doi : 10.3354/meps194233.
- Watt, C.A., Orr, J., LeBlanc, B., Richard, P., et Ferguson, S.H. 2012. Satellite tracking of narwhals (*Monodon monoceros*) from Admiralty Inlet (2009) and Eclipse Sound (2010–2011). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2012/046. iii + 17 p. Disponible du http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/mpo-dfo/Fs70-5-2012-046-eng.pdf [date d'accès 09 February 2019].
- Watt, C.A., Orr, J., et Ferguson, S.H. 2016. A shift in foraging behaviour of beluga whales *Delphinapterus leucas* from the threatened Cumberland Sound population may reflect a changing Arctic food web. *Endanger. Species Res.* 31 : 259–270. doi : 10.3354/esr00768.
- Watt, C.A., Orr, J., et Ferguson, S.H. 2017. Spatial distribution of narwhal (*Monodon monoceros*) diving for Canadian populations helps identify important seasonal foraging areas. *Can. J. Zool.* 95 : 41–50. doi : 10.1139/cjz-2016-0178.
- Watts, P.D., et Draper, B.A. 1986. Note on the behaviour of beluga whales feeding on capelin. *Arct. Alp. Res.* 18 : 439. doi : 10.1080/00040851.1986.12004107.
- Watts, P.D., Draper, B.A., et Henrico, J. 1991. Preferential use of warm water habitat by adult beluga whales. *J. Therm. Biol.* 16 : 57–60. doi : 10.1016/0306-4565(91)90053-5.
- Waugh, D., Pearce, T., Ostertag, S.K., Pokiak, V., Collings, P., et Loseto, L. 2018. Inuvialuit traditional ecological knowledge of beluga whale (*Delphinapterus leucas*) under changing climatic conditions in Tuktoyaktuk, NT. *Arctic Science* 4 : 242–258. doi : 10.1139/as-2017-0034.
- Westdal, K.H., Davies, J., MacPherson, A., Orr, J., et Ferguson, S.H. 2016a. Behavioural changes in belugas (*Delphinapterus leucas*) during a killer whale (*Orcinus orca*) attack in Southwest Hudson Bay. *Can. Field-Nat.* 130 : 315–319. doi : 10.22621/cfn.v130i4.1925.
- Westdal, K.H., Higdon, J.W., et Ferguson, S.H. 2016b. Review of killer whales (*Orcinus orca*) ice entrapments and ice-related mortality events in the northern hemisphere. *Polar Biol.* 40 : 1467–1473. doi : 10.1007/s00300-016-2019-6.
- White, G. 2006. Cultures in collision: Traditional knowledge and Euro-Canadian governance processes in native land-claim boards. *Arctic* 59 : 401–414. doi : 10.14430/arctic289.

- Woodgate, R.A., Weingartner, T., et Lindsay, R. 2010. The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice retreat. *Geophys. Res. Lett.* 37 : L01602. doi : 10.1029/2009GL041621.
- Woodgate, R.A., Weingartner, T.J., et Lindsay, R. 2012. Observed increases in Bering Strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic Ocean water column. *Geophys. Res. Lett.* 39 : L24603. doi : 10.1029/2012GL054092.
- Worden, E. 2018. “Everything is changing so much”: Community perspectives on the declining beluga whale harvest in Aklavik, NT. Thesis (M.Sc.) University of Manitoba, Winnipeg, MB. viii + 188 p. Disponible du <https://mspace.lib.umanitoba.ca/xmlui/handle/1993/33654> [date d'accès 13 February 2019].
- Yamamoto-Kawai, M., McLaughlin, F.A., Carmack, E.C., Nishino, S., et Shimada, K. 2009. Aragonite undersaturation in the Arctic Ocean: Effects of ocean acidification and sea ice melt. *Science* 326 : 1098–1100. doi : 10.1126/science.1174190.
- Yamamoto-Kawai, M., McLaughlin, F., et Carmack, E. 2013. Ocean acidification in the three oceans surrounding northern North America. *J. Geophys. Res. : Oceans.* 118 : 6274–6284. doi : 10.1002/2013JC009157.
- Yasunaka, S., Murata, A., Watanabe, E., Chierici, M., Fransson, A., van Heuven, S., Hoppema, M., Ishii, M., Johannessen, T., Kosugi, N., Lauvset, S.K., Mathis, J.T., Nishino, S., Omar, A.M., Olsen, A., Sasano, D., Takahashi, T., et Wanninkhof, R. 2016. Mapping of the air-sea CO₂ flux in the Arctic Ocean and adjacent seas: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability. *Polar Sci.* 10 : 323–334. doi : 10.1016/j.polar.2016.03.006.
- Yoon, S., Watanabe, E., Hiromichi, U., et Kishi, M.J. 2015. Potential habitat for chum salmon (*Oncorhynchus keta*) in the Western Arctic based on a bioenergetics model coupled with a three-dimensional lower trophic ecosystem model. *Prog. Oceanogr.* 131 : 146–158. doi : 10.1016/j.pocean.2014.12.009.
- Young, B.G., Higdon, J.W., et Ferguson, S.H. 2011. Killer whale (*Orcinus orca*) photo-identification in the eastern Canadian Arctic. *Polar Res.* 30 : 7203. doi : 10.3402/polar.v30i0.7203.
- Yurkowski, D.J., Hussey, N.E., Fisk, A.T., Imrie, K.L., Tallman, R.F., et Ferguson, S.H. 2017. Temporal shifts in intraguild predation pressure between beluga whales and Greenland halibut in a changing Arctic. *Biol. Lett.* 13 : 20170433. doi : 10.1098/rsbl.2017.0433.
- Yurkowski, D.J., Hussey, N.E., Ferguson, S.H., et Fisk, A.T. 2018. A temporal shift in trophic diversity among a predator assemblage in a warming Arctic. *R. Soc. Open Sci.* 5 : 180259. doi : 10.1098/rsos.180259.

- Yurkowski, D.J., Carlyle, C.G., Amarualik, U., Lange, B.A., Platt, A., Higdon, J.W., Stewart, D.B., Ferguson, A., Ferguson, S.H., et Michel, C. 2019a. Novel observations of Atlantic walrus (*Odobenus rosmarus rosmarus*) in Archer Fjord, northern Ellesmere Island, Nunavut, Canada. *Polar Biol.* 42 : 1193-1198. doi : 10.1007/s00300-019-02499-z.
- Yurkowski, D.J., Auger-Méthé, M., Mallory, M.L., Wong, S.N.P., Gilchrist, G., Derocher, A.E., Richardson, E., Lunn, N.J., Hussey, N.E., Marcoux, M., Togunov, R.R., Fisk, A.T., Harwood, L.A., Dietz, R., Rosing-Asvid, A., Born, E.W., Mosbech, A., Fort, J., Grémillet, D., Loseto, L., Richard, P.R., Iacozza, J., Jean-Gagnon, F., Brown, T.M., Westdal, K.H., Orr, J., LeBlanc, B., Hedges, K.J., Treble, M.A., Kessel, S.T., Blanchfield, P.J., Davis, S., Maftai, M., Spencer, N., McFarlane-Tranquilla, L., Montevecchi, W.A., Bartzen, B., Dickson, L., Anderson, C., et Ferguson, S.H. 2019b. Abundance and species diversity hotspots of tracked marine predators across the North American Arctic. *Divers. Distrib.* 25 : 328–345. doi : 10.1111/ddi.12860.
- Żarski, D., Kucharczyk, D., Sasinowski, W., Targońska, K., et Mamcarz, A. 2010. The influence of temperature on successful reproductions of Burbot, *Lota lota* (L.) under hatchery conditions. *Pol. J. Natur. Sci.* 25 : 93–105. doi : 10.2478/v10020-010-0007-9.
- Zhang, F., He, J., Lin, L., et Jin, H. 2015. Dominance of picophytoplankton in the newly open surface water of the central Arctic Ocean. *Polar Biol.* 38 : 1081–1089. doi : 10.1007/s00300-015-1662-7.
- Zhang, J.L., Lindsay, R., Schweiger, A., et Steele, M. 2013. The impact of an intense summer cyclone on 2012 Arctic sea ice retreat. *Geophys. Res. Lett.* 40 : 720–726. doi : 10.1002/grl.50190.
- Zhang, M., Perrie, W., et Long, Z. 2019. Springtime North Pacific Oscillation and summer sea ice in the Beaufort sea. *Clim. Dyn.* 53 : 671-686. doi : 10.1007/s00382-019-04627-1.
- Zhu, X., Gallagher, C.P., Howland, K.L., Harwood, L.A., et Tallman, R.F. 2017. Multimodel assessment of population production and recommendations for sustainable harvest levels of anadromous Arctic Char, *Salvelinus alpinus* (L.), from the Hornaday River, Northwest Territories. *Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc.* 2016/116. v + 81 p. Disponible du <http://publications.gc.ca/site/eng/9.833172/publication.html> [date d'accès 13 February 2019].