

# STRATIFICATION DANS LA MER DE KITIKMEOT DE L'ARCHIPEL ARCTIQUE CANADIEN :

conséquences biologiques et géochimiques



**William J. Williams<sup>1\*</sup>, Kristina A. Brown<sup>1</sup>, Bodil A. Bluhm<sup>2</sup>, Eddy C. Carmack<sup>1</sup>, Laura Dalman<sup>4</sup>, Seth L. Danielson<sup>3</sup>, Brent G. T. Else<sup>5</sup>, Rosalyn Fredriksen<sup>2</sup>, C. J. Mundy<sup>4</sup>, Lina M. Rotermund<sup>6</sup>, et Adrian Schimnowski<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> Pêches et Océans Canada, Institut des sciences de la mer, Sidney, Colombie-Britannique, Canada

<sup>2</sup> Institut de biologie arctique et marine, UiT – Université de l'Arctique de Norvège, Tromsø, Norvège

<sup>3</sup> Collège des pêches et des sciences de la mer, Université de l'Alaska à Fairbanks, Fairbanks, Alaska, États-Unis

<sup>4</sup> Centre des sciences de l'observation de la Terre, Département de l'environnement et de la géographie, Université du Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada

<sup>5</sup> Département de géographie, Université de Calgary, Calgary, Alberta, Canada

<sup>6</sup> Département de physique et d'astronomie, Université de Victoria, Victoria, Colombie-Britannique, Canada

<sup>7</sup> Arctic Research Foundation, 201, avenue Bridgeland, Toronto, Ontario, Canada

\* [Bill.Williams@dfo-mpo.gc.ca](mailto:Bill.Williams@dfo-mpo.gc.ca)

L'étude scientifique de la mer de Kitikmeot (Kitikmeot Sea Science Study ou K3S) est dirigée par Pêches et Océans Canada, en collaboration avec l'Arctic Research Foundation, l'Université de l'Arctique de Norvège, l'Université de l'Alaska à Fairbanks, l'Université du Manitoba, l'Université de Calgary et l'Université de Victoria. Elle est financée par Savoir polaire Canada, l'Arctic Research Foundation, Pêches et Océans Canada et nos collaborateurs. La zone d'étude comprend la mer de Kitikmeot : toute la région marine de Kitikmeot entre le détroit de Dolphin et Union à l'ouest et le détroit de Victoria et le détroit de James Ross à l'est.

## Résumé

L'étude scientifique de la mer de Kitikmeot a été lancée en 2014 afin de fournir La Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique (SCREA) une base scientifique pour la surveillance et la recherche écologiques à long terme dans la région de Kitikmeot, dans le sud de l'archipel Arctique canadien. La région est unique dans l'Arctique en raison de ses seuils limitrophes peu profonds et de son apport massif en eau douce par rapport à sa zone. Ainsi, trois thèmes guident l'étude : (1) l'apport estuarien d'origine pacifique, qui établit la structure océanographique; (2) l'origine et les voies d'accès de l'eau douce, qui influent sur les équilibres et la stratification des nutriments; (3)

les communautés biologiques influencées par les marées dans des passages étroits. Pour étudier ces thèmes, nous utilisons une série d'outils déployés par le navire de recherche océanographique *Martin Bergmann*.

Nos résultats montrent que la mer de Kitikmeot est caractérisée par un flux estuarien à deux couches, soit des débits sortants en surface et des débits entrants sous-marins à travers les seuils limitrophes. Les apports fluviaux le long de la limite sud apportent de l'eau douce, des nutriments terrestres et du carbone au domaine riverain-côtier, qui se propagent ensuite dans tout le réseau. Les forts courants de marée dans les passages étroits

Citation suggérée :

Williams, W.J., Brown, K.A., Bluhm, B.A., Carmack, E.C., Dalman, L., Danielson, S.L., Else, B.G.T., Fredriksen, R., Mundy, C.J., Rotermund, L.M., Schimnowski, A. 2018. « Stratification dans la mer de Kitikmeot de l'archipel Arctique canadien : conséquences biologiques et géochimiques », *Savoir polaire* : Aqhaliat 2018, Savoir polaire Canada, p. 46-52. Identificateur d'objet numérique : 10.35298/pc.2018.22

accroissent la chaleur verticale et le flux de nutriments pour maintenir des conditions sans glace en hiver et un couplage benthique-pélagique étroit en été. Ces passages étroits ont un substrat à fond dur habité par des suspensivores, tandis que des sédiments meubles et des dépositivores se trouvent dans des zones de courants plus faibles ailleurs. Notre analyse révèle un écosystème dynamique caractérisé par un couplage benthique-pélagique modifié par le champ d'écoulement physique et limité par des apports externes de nutriments et d'eau douce.

## Introduction

La mer de Kitikmeot (fig. 1) — qui comprend le golfe Coronation, Bathurst Inlet, la baie de la Reine-Maud, et Chantrey Inlet dans le sud de l'archipel arctique

canadien — est unique au sein du système panarctique en raison (1) de son énorme apport en eau douce pour la taille du secteur, (2) de son apport principal en nutriments provenant du bassin du Canada, et (3) de ses seuils limites peu profonds à l'ouest et au nord-est ( $\leq 30$  m de profondeur). Ces conditions maintiennent une circulation de type estuarien, où l'eau douce de surface sortant de la rivière et les sources de fonte de la glace se mélangent aux eaux océaniques plus profondes et salées qui pénètrent au-dessus des seuils limites peu profonds. Ainsi, une stratification solide des sels limite généralement le mélange vertical et les flux ascendants des nutriments dissous, ce qui entraîne une production primaire globale relativement faible de la région. La faible production biologique annuelle qui en résulte doit avoir

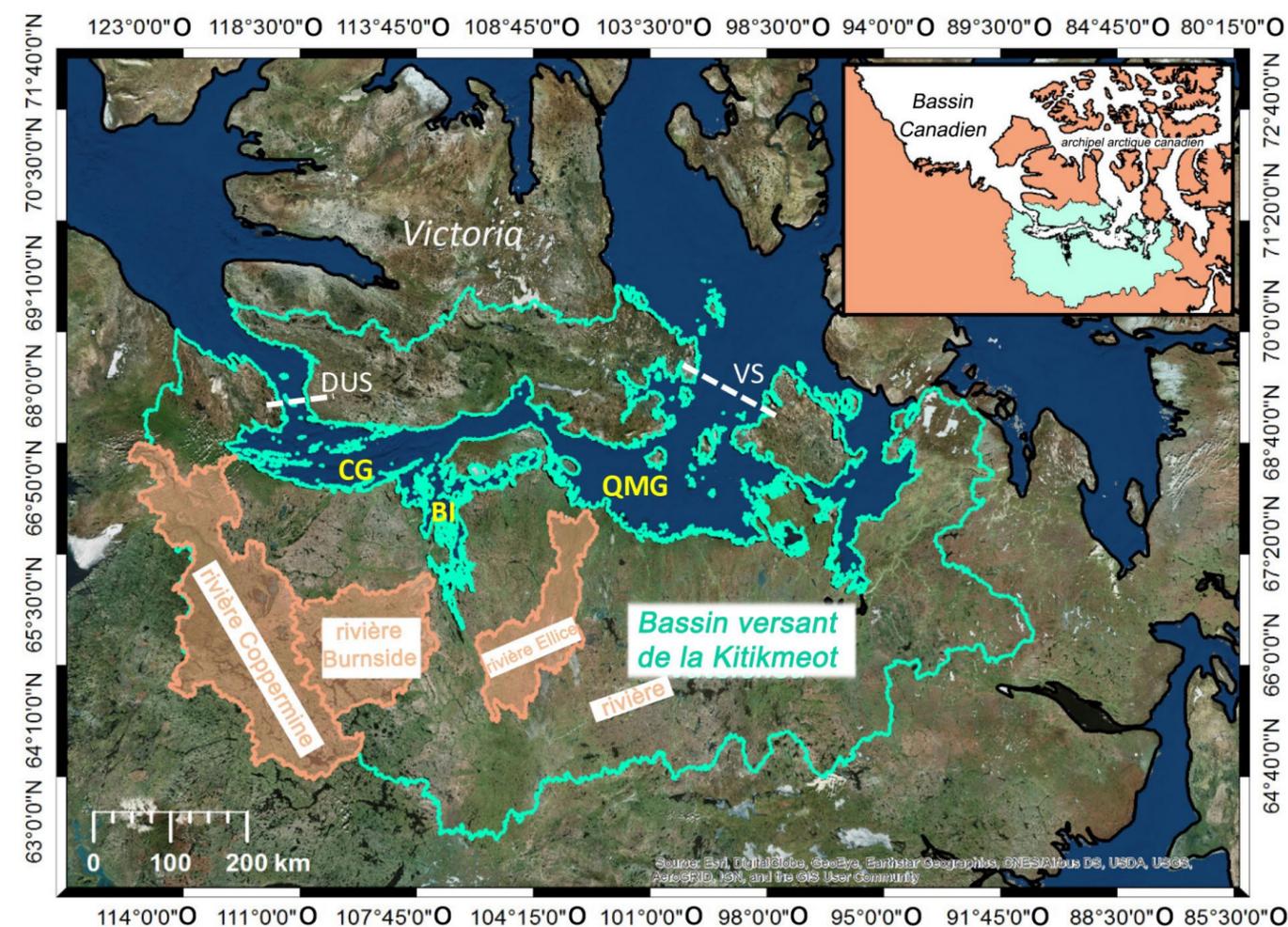


Figure 1 : Région de la mer de Kitikmeot dans le sud de l'archipel arctique canadien. La parcelle en médaillon montre la zone terrestre qui s'écoule dans la mer de Kitikmeot (le « bassin hydrographique de Kitikmeot », en vert ombré dans le contexte de l'archipel arctique canadien (rose). Le graphique principal montre les bassins versants des rivières Coppermine, Burnside et Ellice, ombragées de rose, qui s'écoulent dans le golfe Coronation (GC), dans le Bathurst Inlet (BI) et dans la baie de la Reine-Maud (BRM), respectivement. Les détroits océaniques peu profonds de l'ouest (détroit de Dolphin et d'Union, DDU, seuil de 18 m) et du nord-est (détroit de Victoria, DV, seuil de 20 à 30 m) limitent l'entrée des eaux d'origine du Pacifique relativement salées et riches en nutriments qui traversent l'archipel arctique canadien. (Tiré de : Brown et coll. 2016).

une incidence sur l'ensemble du réseau trophique, et nous supposons que cela contribue à l'absence de prédateurs de niveau trophique supérieur, les plus grands spécimens d'ours et de baleines polaires, que l'on trouve ailleurs.

Cette faible production biologique globale nous oblige donc à chercher des endroits précis où elle pourrait être améliorée. Les observations faites par les habitants, combinées à l'imagerie satellite à haute résolution, suggèrent que les étroites brèches et les détroits entre les nombreuses îles de Kitikmeot peuvent être sujets à une débâcle précoce, suggérant ainsi une glace plus mince, ce qui en fait des endroits dangereux pour les déplacements hivernaux (fig. 2).

Nous supposons que ces « trous d'hiver » dans la glace de mer sont causés par le mélange ascendant de la chaleur souterraine, induit par l'accélération de l'écoulement de la marée sur les seuils et dans les passages étroits (fig. 2). En outre, comme l'eau souterraine est probablement relativement riche en nutriments, le même mélange à la hausse fournira également pendant toute l'année des nutriments à la zone euphotique. Par conséquent,

nous suggérons que près de ces « trous d'hiver » dans la glace de mer, il y aura une productivité biologique accrue en été et une mosaïque d'écosystèmes benthiques améliorés. Ces « jardins d'été » contrasteront avec la très faible productivité globale de la région (fig. 3) et seront donc des points chauds biologiques pouvant former des sites d'alimentation cruciaux pour les niveaux trophiques supérieurs.

L'étude scientifique de la mer de Kitikmeot (K3S) a donc été lancée en 2014 pour étudier l'hypothèse selon laquelle les brèches étroites et les détroits entre les nombreuses îles sont des sites de mélange vertical toute l'année, ce qui entraîne des polynies en hiver (« trous d'hiver ») et des points chauds biologiques en été (« jardins d'été »).

De plus, le projet K3S fournirait à la SCREA une base scientifique pour la surveillance et la recherche écologiques à long terme et faciliterait un partenariat solide avec celle-ci. Trois thèmes orientent l'étude : (1) l'apport estuarien d'origine pacifique, qui établit la structure océanographique; (2) l'origine et les voies d'accès de l'eau douce, qui influent

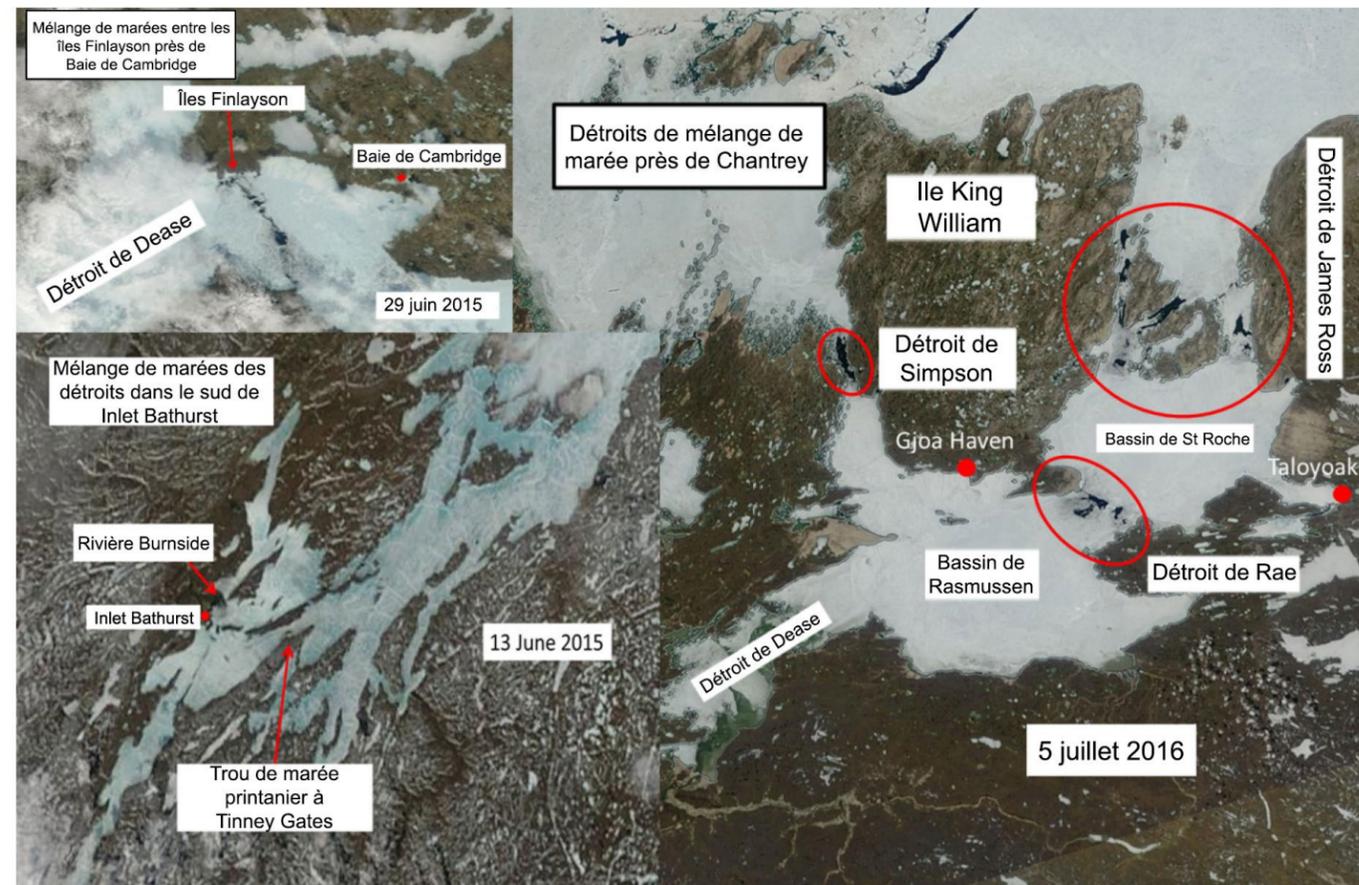


Figure 2 : Vue satellite du détroit de marée mixte printanier (« trous d'hiver ») dans la glace de mer des îles Finlayson (en haut à gauche), de Chantry Inlet (à droite) et de Bathurst Inlet (en bas à gauche). (Tiré de : Williams et coll. 2016).

sur les équilibres et la stratification des nutriments et (3) les communautés biologiques influencées par les marées dans des passages étroits. Nous utilisons une série d'outils océanographiques et d'amarrages tout au long de l'année déployés par le *Martin Bergmann* pour étudier ces thèmes.

Le projet K3S a permis de réaliser des programmes d'observation sur le terrain dans la mer de Kitikmeot à bord du *Martin Bergmann* de 2014 à 2017, recueillant une série de nouvelles observations passionnantes et faisant progresser notre compréhension de cette région (p. ex., Williams et coll. 2016, 2017; Brown et coll. Rotermund et coll. 2017; Fredriksen 2018). Afin de tenir compte de l'ensemble de la région étudiée (terrestre et marine),

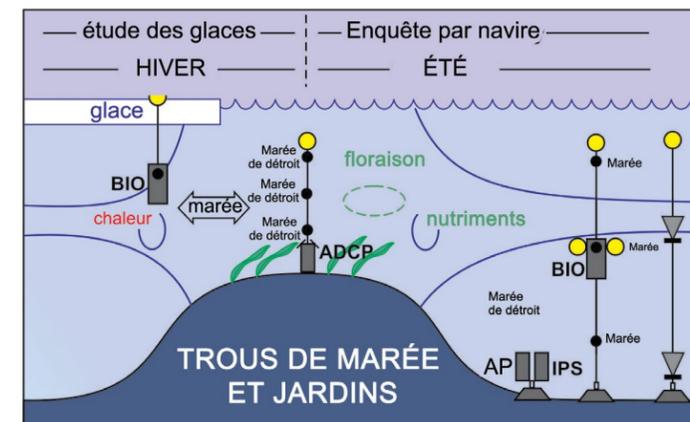


Figure 3 : Schéma du cycle annuel des « trous de marée » et des « jardins », montrant les mécanismes par lesquels les « trous d'hiver » entraînés par les marées dans la glace de mer peuvent mener à une production biologique locale élevée pendant la saison de croissance (« jardins d'été »). Les contours représentent les lignes isopycniques indiquant la stratification. Les instruments amarrés mesurent la variation saisonnière de la température et de la stratification de la salinité (TS), dressent le profil des courants océaniques (profilleur de courant à effet Doppler, ADCP), évaluent la réponse biologique à la lumière (ensemble bio-optique, BIO), écoutent les mammifères marins (acoustique passive, PA) et mesurent le tirant d'eau des glaces (profilage sonar de la glace, IPS). (De : Eddy Carmack, Tiré de : Williams et coll. 2016).

l'étude scientifique de la région marine de Kitikmeot (KMRSS) a changé de nom pour l'étude scientifique de la mer de Kitikmeot (K3S) au cours du programme de 2017. Le rapport qui suit résume les principales conclusions du programme sur le terrain K3S réalisé au cours des étés 2014 à 2017.

## Circulation estuarienne et flux continu de l'eau du Pacifique

L'un des principaux axes du programme K3S est l'étude de l'afflux d'origine du Pacifique, qui établit la structure

océanographique de la région. L'eau souterraine d'origine pacifique s'écoule du bassin du Canada à travers l'archipel arctique canadien et cette eau ne peut entrer dans la mer de Kitikmeot en raison des détroits océaniques peu profonds à l'ouest (détroit de Dolphin et Union, DDU, seuil de 18 m) et au nord-est (détroit de Victoria, DV, seuil de 20 à 30 m) (fig. 1; p. ex., McLaughlin et coll. 2006; Michel et coll. 2015). Les eaux souterraines qui se déversent dans la mer de Kitikmeot à travers ces seuils peu profonds sont les couches supérieures de l'eau d'origine du Pacifique et sont relativement salées et riches en nutriments. Ces apports du Pacifique (salinité = 29, volume = 256 km<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>) devraient se combiner aux apports de la rivière dans la mer de Kitikmeot (salinité = 0, volume des apports de la rivière ≈ 41 km<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>; Williams et coll. 2016) et à la fonte de la glace de mer à faible salinité pour former le débit sortant en surface peu profond de la mer de Kitikmeot (salinité ≈ 25, volume ≈ 297 km<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>). Il s'agit d'une circulation estuarienne dans laquelle l'eau d'entrée de la rivière se mélange aux eaux océaniques salées d'entrée profonde pour produire le débit sortant de surface à faible salinité, et qui donne un temps de séjour d'environ 13 ans aux eaux résidant dans la mer de Kitikmeot (Williams et coll. 2016).

L'origine et les voies des composantes d'eau douce de la mer de Kitikmeot (précipitations, entrée dans la rivière et fonte de la glace de mer) influencent les bilans en éléments nutritifs et la stratification de l'océan de surface. Les apports fluviaux à eux seuls représentent jusqu'à 70 cm d'eau douce ajoutés annuellement à la surface de la mer de Kitikmeot (Brown et coll. 2016), et peuvent constituer une source saisonnière d'éléments nutritifs terrestres (nitrate et silicate) pour le système marin côtier, fournissant les éléments nutritifs nécessaires aux producteurs primaires une fois mélangés à des eaux plus profondes d'origine du Pacifique, qui fournissent beaucoup de phosphate. La confluence de nitrates terrestres et de phosphates marins dans les estuaires de la mer de Kitikmeot pourrait jouer un rôle important dans la productivité de la région côtière (Brown et coll. 2016). Par exemple, les relations entre les éléments nutritifs dans le golfe Coronation et le golfe de la Reine-Maud montrent une quantité plus faible de nitrate et de phosphate (mais des ratios semblables de nitrate et de phosphate) en comparaison aux mêmes profondeurs dans le golfe Amundsen et le détroit de Larsen, mais une quantité beaucoup plus élevée de silicate (fig. 4; Williams et coll. 2017).

## Preuve de mélange dans les détroits de marée

La stratification de l'eau douce dans l'océan de surface limite le mélange des nutriments d'origine profonde du Pacifique dans la zone photique, où elle pourrait alimenter la production primaire. Les courants de marée dans de nombreux détroits étroits de la mer de Kitikmeot offrent la possibilité de mélanger des nutriments profonds jusqu'à la surface, brisant ainsi cette forte stratification de surface. Les courants de marée sont les plus élevés dans les détroits étroits et devraient contribuer au mélange tout au long de l'année, générant les « trous d'hiver » en eau libre dans la glace printanière (fig. 2). Au cours de la saison de terrain 2017, nous avons déployé des amarrages à échantillonnage rapide pour obtenir une série chronologique de données sur la température, la salinité et la fluorescence chlorophyllienne sur une période de 24 heures afin d'observer le cycle des marées. La figure 5a illustre des observations faites tout juste au sud du détroit étroit de Tinney Gates, dans le sud de Bathurst Inlet (fig. 2).

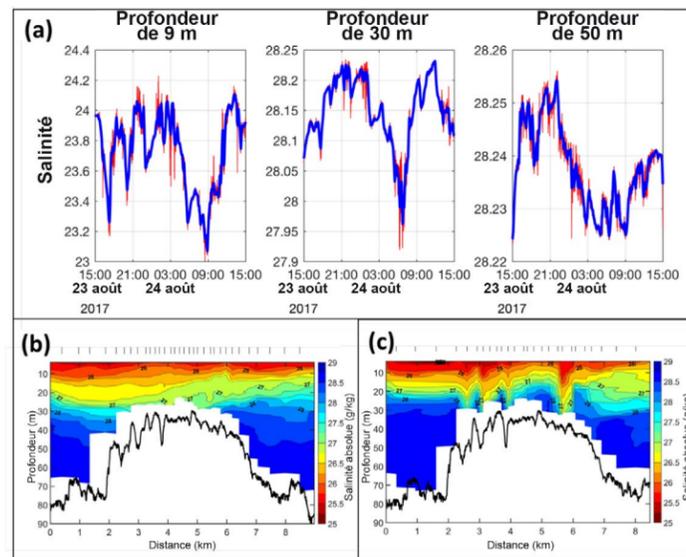


Figure 5 : 9a) Le déploiement d'un échantillonnage rapide des amarres juste au sud du détroit étroit à Tinney Gates du 23 au 24 août 2017, montre des fluctuations lentes et rapides de la salinité sur 24 heures et (b) et (c) la répétition des sections de CTP Underway dans les îles Finlayson le 18 août 2017, (b) à 9 h GMT et (c) 9 h plus tard à 18 h GMT. Ces analyses montrent qu'à mesure que le cycle des marées progresse jusqu'au débit maximal, les isohalines (p. ex.,  $S = 27 \text{ g kg}^{-1}$ ) sont amenées à la surface en raison du mélange des marées au-dessus du seuil.

Ici, des fluctuations lentes et rapides de la salinité sont observées aux trois différents intervalles de profondeur. Ces déplacements isopycniques verticaux et ces mélanges diapycnaux ont le potentiel de libérer des nutriments des eaux plus profondes du Pacifique dans la zone photique à intervalles réguliers. D'autres observations du mélange des marées ont été observées dans Unahitak Narrows, un étroit détroit entre les îles Finlayson dans le détroit de Dease près de Cambridge Bay (fig. 5 b, 5c; Rotermund et coll. 2017). Ici, la répétition des sections de l'instrument de mesure de la conductivité, de la température et de la profondeur (CTP) Underway montre que, à mesure que le cycle des marées progresse jusqu'au débit de pointe, les isohalines (p. ex.,  $S = 27 \text{ g kg}^{-1}$ ) sont amenées vers la surface par les marées au-delà du seuil du Unahitak Narrows, encore une fois créant la possibilité d'apporter des nutriments plus profonds dans la zone photique.

## Augmentation du nombre d'algues de glace dans les « trous d'hiver » et structure benthique différente dans les « jardins d'été »

Le mélange des nutriments d'origine profonde du Pacifique jusqu'à la zone photique dans le détroit de marée de la mer de Kitikmeot crée des conditions favorables pour les

producteurs primaires, et entraîne des effets en cascade dans le réseau trophique. On en trouve des exemples dans les études d'hiver et d'été sur les « trous » et les « jardins » qui pourraient être créés par ces détroits de marée. Des études hivernales menées dans les îles Finlayson en 2016 indiquent que la biomasse des algues de glace et la vitesse du courant étaient les plus élevées au centre des détroits de marée et qu'elles diminuaient en s'éloignant des détroits vers l'ouest (fig. 6a; Dalman et coll. 2017). Les observations estivales des communautés benthiques indiquent que les sites à débit élevé, les sites à faible débit et les sites de transition différaient dans la composition des communautés (fig. 6 b; Fredriksen 2018). Les suspensivores (p. ex., concombres de mer, cnidaires et comatules) dominaient les sites à forte vitesse de courant dans les détroits de marée, alors que les dépositivores (p. ex., ophiures) dominaient dans les zones à faible débit en aval (fig. 6 b; Fredriksen 2018). Les données sur les isotopes stables révèlent d'autres renseignements sur la structure du réseau trophique et indiquent un lien étroit entre le benthos et les sources alimentaires à base de phytoplancton dans les détroits de marée et juste en aval de ces sources (Fredriksen 2018). De plus, les brouteurs et les suspensivores dans les détroits de marée semblent utiliser la matière la plus fraîche, alors que les dépositivores dans les zones en aval qui accumulent les sédiments sont légèrement plus enrichis par l'isotope (Fredriksen 2018).

## Conclusions

Les observations préliminaires du projet K3S illustrent la nature unique de la mer de Kitikmeot. Les eaux provenant du Pacifique, combinées à l'apport d'eau douce provenant du grand bassin hydrographique terrestre, ont créé la structure estuarienne de la mer de Kitikmeot et ont une influence supplémentaire sur son équilibre nutritionnel et

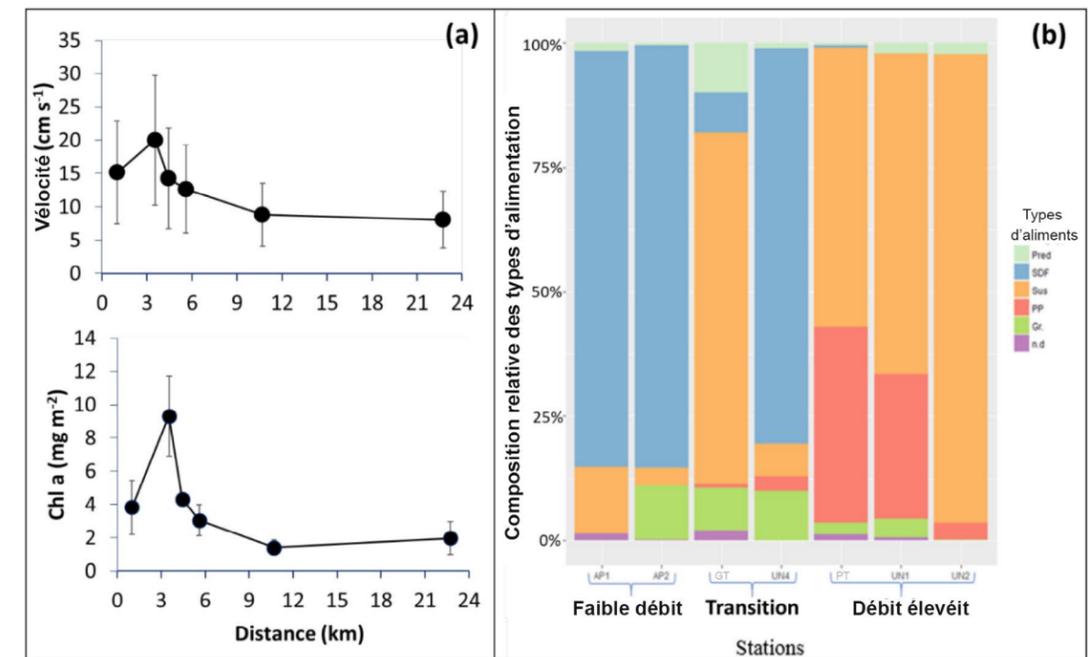


Figure 6 : (a) Aux îles Finlayson, la biomasse des algues de glace (chlorophylle a, au fond) et la vitesse du courant (sur le dessus) étaient plus élevées au centre des détroits de marée (à 3 km dans le transect) et diminuaient vers l'est et (b) les communautés benthiques de suspensivores (p. ex., concombres de mer, cnidaires, comatules) dominaient les sites à la vitesse de courant élevée dans les détroits de marée, et les dépositivores (pour la plupart des ophiures) dominaient dans les zones à faible débit en aval (préd = prédateur/détritivores, PP = producteur primaire, Br. = brouteurs, n.d. = non défini).

sa stratification. Le mélange dans les détroits de marée vise à briser cette stratification et à introduire les nutriments du Pacifique dans la zone photique, où ils sont disponibles pour les producteurs primaires. Les observations des communautés sous la glace et benthiques illustrent les effets de ces processus physiques sur le réseau trophique, montrant une augmentation des concentrations d'algues glaciaires dans les détroits de marée et un changement dans les communautés benthiques vers les suspensivores, qui peuvent tirer parti des matériaux de coulée associés à l'amélioration de la productivité océanique en surface. Le projet K3S continuera d'étudier ces thèmes en collaboration avec des partenaires communautaires de la région de Kitikmeot jusqu'en 2018 et plus.

## Préoccupations pour la collectivité

Notre exploration océanographique de la mer de Kitikmeot vise à fournir une description du fonctionnement et de la connectivité de l'écosystème marin qui complète le savoir autochtone et qui est utile aux collectivités du Nord. Ces collectivités dépendent du réseau alimentaire marin pour les poissons et les phoques et de la glace de mer pour leurs déplacements. Nos résultats commencent à fournir une base scientifique indiquant une production biologique

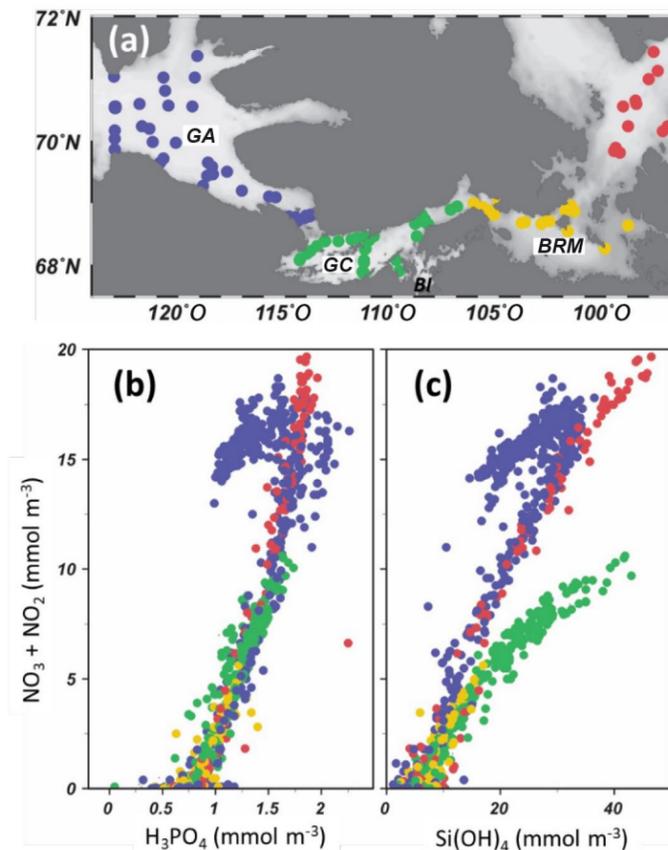


Figure 4 : Les relations entre les éléments nutritifs dans le golfe Coronation (GC) et la baie de la Reine-Maud (BRM) montrent des taux de nitrate et de phosphate plus faibles (mais des ratios de nitrate et de phosphate semblables) que dans les mêmes profondeurs dans le golfe Amundsen (GA) et le détroit de Larsen (DL), mais des taux de silicate beaucoup plus élevés.

plus élevée et une glace mince dangereuse dans le détroit de marée de la région. Notre élaboration du modèle des « trous d'hiver et des jardins d'été » est fondée sur notre compréhension générale des océans côtiers et des conversations avec les Rangers canadiens dans le cadre du programme de surveillance des océans des Rangers canadiens pendant l'hiver. Nous offrons également de la formation et du renforcement des capacités en matière de surveillance océanographique dans la région par l'entremise du programme de surveillance des océans des Rangers canadiens, en collaboration avec Ocean Networks Canada et l'Arctic Research Foundation. Les séries chronologiques océanographiques communautaires lancées à Kitikmeot peuvent être mises en contexte en utilisant les connaissances océanographiques développées par K3S.

## Remerciements

Nous tenons à remercier les capitaines et l'équipage du *Martin Bergmann*. Leur compétence et leur souplesse permettent de mener des expéditions océanographiques interdisciplinaires complexes à partir de leur petit navire; sans leur soutien, l'étude scientifique de la mer de Kitikmeot ne serait pas possible. De plus, cette recherche océanographique n'est possible qu'avec la vision et le soutien de Jim Balsillie, fondateur et bienfaiteur de l'Arctic Research Foundation, propriétaire du navire de recherche *Martin Bergmann*. Nous remercions également la Commission d'aménagement du Nunavut, la Commission du Nunavut chargée de l'examen des répercussions et l'Institut de recherches du Nunavut d'avoir autorisé cette recherche dans leurs eaux territoriales.

## Références

Brown, K., Williams, W., Carmack, E., Schimnowski, A., Nivingalok, J., and Clarke, C. 2016. Where the river meets the sea: Investigating nutrient dynamics in the Kitikmeot riverine-coastal domain. ArcticNet Annual Scientific Meeting, Winnipeg, Man., December 2016. [poster presentation].

Dalman, L., Else, B., Barber, D., Carmack, E., Williams, W.J., Campbell, K., and Mundy, C.J. 2017. Tidal straits as hotspots for ice algal production: A case study in the Kitikmeot Sea. International Arctic Change Conference, Québec, P.Q., 11–15 December. [poster presentation].

Fredriksen, R. 2018. Epibenthic community structure in northeast Greenland and the Kitikmeot Sea in the Canadian Arctic Archipelago. M.Sc. thesis, Faculty of Biosciences, Fisheries, and Economics, Department of Arctic and Marine Biology, Institute for Arctic and Marine Biology, UiT–The Arctic University of Norway, Tromsø, Norway.

McLaughlin, F.A., Carmack, E.C., Ingram, R.G., Williams, W., and Michel, C. 2006. Oceanography of the Northwest Passage. In *The sea*, vol. 14B, chap. 31, Robinson, A. and Brink K. (eds.), Harvard Press. pp. 1213–1244.

Michel, C. et al. 2015. Arctic Ocean outflow shelves in the changing Arctic: A review and perspectives. *Progress In Oceanography*. Available from <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2015.08.007>.

Rotermund, L. M., Williams, W.J., Brown, K.A., Danielson, S.L., Carmack, E.C., Bluhm, B.A., and Klymak, J.M. 2017. Tidal mixing and advection in Dease Strait: The connection between Coronation Gulf and Queen Maud Gulf. Arctic Change, Québec, P.Q., 11–15 December 2017. [poster presentation].

Williams, W., Bluhm, B., Brown, K., Carmack, E., Danielson S., Mundy C.J., and Rotermund L. 2017. Making and breaking stratification in the Canadian Arctic Archipelago's Kitikmeot Sea: Biological and geochemical consequences. Arctic Change, Québec, P.Q., 11–15 December 2017. [poster presentation].

Williams, W., Bluhm, B., Brown, K., Carmack, E., Clarke, C., Danielson, S., Rotermund, L.M., Schimnowski, A., and Schimnowski, O. 2016. Adventures in a new Arctic frontier: Investigating the tidal-driven “winter holes” and “summer gardens” of the Kitikmeot Marine Region of the Canadian Arctic Archipelago. ArcticNet Annual Scientific Meeting, Winnipeg, Man., December 2016. [oral presentation].