

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ENREGISTREMENT SCLÉROCHRONOLOGIQUE PAR LES BIVALVES DES
CHANGEMENTS RÉCENTS DU CLIMAT DE LA BAIE DE BAFFIN

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR
PHILIPPE ROBERGE

Septembre 2022

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.10-2015). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Cette section du mémoire est la dernière section à avoir été rédigée, car son écriture me rendait anxieux; beaucoup de gens m'ont soutenus et assistés dans ce projet de recherche lors des dernières années et j'espère pouvoir correctement mettre à l'écrit la gratitude que je ressens envers ces personnes.

Je souhaite tout d'abord remercier ma directrice de recherche, Anne de Vernal, qui m'a offert le projet de recherche et qui m'a soutenu et conseillé tout au long de ma maîtrise. Je n'ai pas toujours été un étudiant parfait, mais elle ne m'a jamais abandonné et pour cela je lui serai éternellement reconnaissant. Je remercie également mon co-directeur, Claude Hillaire-Marcel, qui a toujours su comment offrir des pistes de réflexion et des conseils utiles lors de ma recherche.

Un gros merci à Sam Davin, qui n'a pas hésité une seule seconde lorsque je lui ai demandé de l'aide. Lui aussi un étudiant en sclérochronologie, il m'a assisté à travers la préparation de mes échantillons et m'a offert une aide considérable lors de l'analyse des données.

Je tiens à remercier Julien Gogot et André Poirier, qui m'ont patiemment partagé leur expertise lors de mon travail aux laboratoires du Geotop et qui m'ont permis de transformer mes petits coquillages en immenses tableaux Excel de données isotopiques. Je suis très reconnaissant pour leur assistance technique et leurs réponses rapides à mes questions.

Merci à Philippe Archambault de l'Université Laval pour les bivalves d'*Astarte* qu'il m'a généreusement offert et qui ont ensuite été utilisés dans le cadre de cette étude.

Merci à Jean-Marc Gagnon du Musée d'Histoire Naturelle du Canada. Même si les bivalves que nous avons sélectionnées n'ont malheureusement pas été utilisés lors de cette étude, je suis sincèrement reconnaissant d'avoir eu l'opportunité de visiter les collections du Musée d'Histoire Naturelle du Canada.

Je remercie Pierre Poitevin, dont les connaissances en sclérochronologie des bivalves qu'il m'a partagées ont soutenu ma motivation à un moment critique de ma recherche.

Je remercie Joan Vallerand, qui a aidé à la révision de la version finale.

Je remercie ArcTrain pour les opportunités financières et le Geotop pour l'accès aux laboratoires de pointe. Je suis également très reconnaissant aux deux institutions pour leurs communautés étudiantes et professorales, pour les personnes chaleureuses, cordiales et altruistes qu'ils m'ont permis de rencontrer.

Et bien sûr, je remercie mes proches, ma famille et mes amis, qui m'ont charitablement écouté radoter à propos de coquillages, de cernes de croissance et de rapports isotopiques au courant des dernières années. En particulier, je remercie mon épouse, Anne-Marie Paquette, qui m'a soutenu et encouragé depuis le début de cette entreprise.

RÉSUMÉ

Afin de reconstituer les conditions environnementales et climatiques préindustrielles, les coquilles de bivalves, sont une source d'information unique en milieu marin car elles permettent des analyses selon une résolution annuelle. Cette étude s'appuie sur l'analyse sclérochronologique, soit la mesure des incréments de croissances et des éléments traces dans des coquilles de bivalves. Des coquilles (n = 13) du genre *Astarte* échantillonnées dans la baie de Baffin ont été analysées. Les échantillons analysés ont été recueillis vivants en 2016 à différents sites de la marge continentale groenlandaise, à des latitudes de 68,115 à 70,496 degrés Nord et à des profondeurs de 199 m à 615 m. L'analyse des marques de croissance indique que les spécimens ont un âge compris entre 27 et 69 années, soit de 1947 à 2016, avec des vitesses de croissance moyenne entre 289 $\mu\text{m}/\text{an}$, pour les spécimens les plus profonds, et 840 $\mu\text{m}/\text{an}$, pour les spécimens les moins profonds. Les résultats indiquent également des différences dans les rapports isotopiques selon la profondeur du site, témoignant ainsi d'une signature distincte des masses d'eau dans la baie de Baffin. En particulier, le site le plus profond, 615, présente des rapports Sr/Ca et Ba/Ca considérablement plus élevés que ceux des autres sites. Les vitesses de croissances et les compositions géochimiques (rapports Li/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca) que nous avons mesurées ont été comparées aux données instrumentales de glace de mer et de température de la région. Une relation existe entre le couvert annuel de glace de mer et la vitesse de croissance de certains spécimens, potentiellement avec la productivité primaire. Les rapports Mg/Ca dans les incréments de croissance indiquent peu de variations de température, sans doute due à une faible variabilité aux profondeurs des habitats d'*Astarte*. Le potentiel des rapports Mg/Ca, Sr/Ca et Ba/Ca en tant que proxy de certaines propriétés des masses d'eaux intermédiaires, telle la productivité, la couverture de glace de mer et la température devra cependant être davantage étayée.

Mots clés : Sclérochronologie, bivalves, *Astarte*, baie de Baffin

ABSTRACT

Bivalve shells are an important source of information for the reconstruction of pre-industrial environmental conditions and climate, as they may provide annual temporal resolutions of their growth rate and geochemical properties. In this study, bivalve shells of the genus *Astarte* collected in Baffin Bay were recovered and analysed for their trace element content. The samples (n=13) were collected alive in 2016, at four different sites along the continental margins of Greenland, at latitudes ranging $\sim 68.1^\circ$ to $\sim 70.5^\circ$ North, and at depths comprised between 199 m and 615 m. The analyses of growth increments indicate that the ages of the specimens collected ranged between 27 and 69 years, thus yielding records spanning the 1947 to 2016 interval, with average growth rates varying between $289 \mu\text{m/yr}$ at the deepest site, and $840 \mu\text{m/yr}$ at the shallowest site. Distinct elemental compositions are observed in relation with depth, thus in relation with the properties of the upper water masses of the Baffin Bay. In particular, the highest ratios of Sr/Ca and Ba/Ca are recorded at the deepest site, within the deep saline water mass of Baffin Bay. Growth rates and geochemical composition (Li/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca and Ba/Ca) were compared to hydrographic data including the sea-ice cover and sea-surface temperatures. There is a relationship between sea ice cover and growth rate, which could be linked to productivity. The relationship between Mg/Ca and temperature is less conclusive, suggesting a weak variability of water masses properties in the water depth range occupied by *Astarte* (≥ 200 m). The use of Mg/Ca, Sr/Ca and Ba/Ca as proxies of sea water properties, such as productivity, sea ice cover and temperature, sounds promising but requires further work for the setting of robust quantitative relationships.

Keywords: Sclerochronology, bivalves, *Astarte*, Baffin Bay

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	2
RÉSUMÉ	3
ABSTRACT.....	4
TABLE DES MATIÈRES	5
LISTE DES FIGURES	7
LISTE DES PLANCHES	10
LISTE DES TABLEAUX.....	11
1. Introduction	12
2. Contexte régional.....	14
3. Objets et Méthodes	16
3.1 Échantillonnage.....	16
3.2 Préparation des échantillons.....	20
3.3 Analyses chimiques au spectromètre de masse à ablation laser.....	20
3.4 Dénombrement des incréments sur une base visuelle.....	22
3.5 Dénombrement des incréments à partir de mesures isotopiques sur LA-ICP-MS et présentation des résultats.....	23
3.6 Sclérochronologie et composante tendancielle	23
4. Résultats.....	24
4.1 Vitesse de croissance et âges des spécimens analysés	25
4.2 Rapports Li/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca et Ba/Ca	26
4.2.1 Site 300 (199 m)	26
4.2.2 Site 418 (384 m)	28
4.2.3 Site 507 (294 m)	30
4.2.4 Site 615 (615 m)	31
4.3 Comparaison des résultats obtenus aux 4 sites.....	33
5. Discussion.....	37
5.1 Vitesse de croissance et rapport strontium/calcium	37
5.2 Température et rapport magnésium/calcium.....	41
5.3 Productivité, glace de mer et rapports baryum/calcium.....	48

6. Conclusion : Portée paléoenvironnementale de la sclérochronologie et des rapports élémentaires dans le contexte de la baie de Baffin	54
7. Références Bibliographiques	56
8. Annexe.	67

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des 4 sites d'échantillonnage d'*Astarte crenata* et *Astarte* sp. et position du transect Kangerluk (cf. Figure 2). Les courants de surface illustrés sur la figure incluent le courant de Baffin (CB, le courant Est-Groenlandais (CEG), le courant d'Irminger (CI), le courant Laurentien (CL et le courant Ouest Groenlandais (COG).

Figure 2. Distribution verticale de la salinité, de la température potentielle et de la densité de l'eau, le long du transect de Kangerluk (voir Figure 1) les 10-11 juillet 2007 (figure tirée de Ribergaard et al., 2008).

Figure 3. Épaisseur de la glace de mer moyenne en novembre (a) et en mars (b) de 2003 à 2016 déterminée à partir d'observations satellitaires *ICESat GLAS (Ice, Clouds, and Land Elevation Satellite - Geoscience Laser Altimeter System)*, *Cryosat-2* et *SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity)*. Les lignes noires illustrent la moyenne de la limite de glace moyenne correspondant à 20% de concentration (Figure tirée de Landy et al., 2017). Les rectangles noirs indiquent la localisation de notre zone d'étude.

Figure 4. Vitesse de croissance de tous les échantillons mesurés.

Figure 5. Résultats d'analyses élémentaires au site 300 par rapport à l'âge en année CE (Common Era). (a) rapport Li/Ca, (b) rapport Mg/Ca, (c) Sr/Ca, (d) Ba/Ca, (e) nombre de spécimens analysés. La courbe en gras présente une moyenne mobile sur cinq ans des résultats et les traits fins représentent les valeurs annuelles dans chaque spécimen individuel. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les courbes 300c, 418c et 615c représentent les données des spécimens d'*Astarte crenata*. Les courbes 300sp, 507sp et 615sp représentent les données des spécimens d'*Astarte* sp.

Figure 6. Résultats d'analyses élémentaires au site 418 par rapport à l'âge en année CE. (a) rapport Li/Ca, (b) rapport Mg/Ca, (c) Sr/Ca, (d) Ba/Ca, (e) nombre de spécimens analysés. La courbe en gras présente une moyenne mobile sur cinq ans des résultats et les traits fins représentent les valeurs annuelles dans chaque spécimen individuel. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les courbes 300c, 418c et 615c représentent les données des spécimens d'*Astarte crenata*. Les courbes 300sp, 507sp et 615sp représentent les données des spécimens d'*Astarte* sp.

Figure 7. Résultats d'analyses élémentaires au site 507 par rapport à l'âge en année CE. (a) rapport Li/Ca, (b) rapport Mg/Ca, (c) Sr/Ca, (d) Ba/Ca, (e) nombre de spécimens analysés. La courbe en gras présente une moyenne mobile sur cinq ans des résultats et les traits fins représentent les valeurs annuelles dans chaque spécimen individuel. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les courbes 300c, 418c et 615c représentent les données des spécimens d'*Astarte crenata*. Les courbes 300sp, 507sp et 615sp représentent les données des spécimens d'*Astarte* sp.

Figure 8. Résultats d'analyses élémentaires au site 615 par rapport à l'âge en année CE. (a) rapport Li/Ca, (b) rapport Mg/Ca, (c) Sr/Ca, (d) Ba/Ca, (e) nombre de spécimens analysés. La courbe en gras présente une moyenne mobile sur cinq ans des résultats et les traits fins représentent les

valeurs annuelles dans chaque spécimen individuel. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les courbes 300c, 418c et 615c représentent les données des spécimens d'*Astarte crenata*. Les courbes 300sp, 507sp et 615sp représentent les données des spécimens d'*Astarte* sp.

Figure 9. Rapport Li/Ca dans les coquilles des 4 sites échantillonnés. La courbe en gras est une moyenne mobile sur cinq ans. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les données de la figure sont présentées dans l'annexe (Tableau A).

Figure 10. Rapport Mg/Ca dans les coquilles des 4 sites échantillonnés. La courbe en gras est une moyenne mobile sur cinq ans. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les données de la figure sont présentées dans l'annexe (Tableau B).

Figure 11. Rapport Sr/Ca dans les échantillons des 4 sites d'étude. La courbe en gras est une moyenne mobile sur cinq ans. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les données de la figure sont présentées dans l'annexe (Tableau C).

Figure 12. Rapport Ba/Ca dans les coquilles des 4 sites échantillonnés. La courbe en gras présente une moyenne mobile sur cinq ans. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les données de la figure sont présentes dans l'annexe (Tableau D).

Figure 13. Vitesse de croissance moyen et écart-type (1 sigma) par rapport à la profondeur de chaque site.

Figure 14. Vitesse de croissance par rapport à la concentration moyenne annuelle du couvert de glace de mer aux sites d'études ($n = 293$). La vitesse de croissance est issue de nos mesures et le couvert de glace annuel provient de données du *National Snow and Ice Data Center*, tel que compilé par Walsh et al. (2019). À noter qu'il n'y pas de relation pour les données de chaque site, mais qu'une relation inverse est perceptible lorsque les données de tous les sites sont prises en compte.

Figure 15. Rapports Sr/Ca dans les coquilles d'*Astarte* par rapport aux vitesses de croissance estimées à partir de la largeur des incréments. Les lignes pointillées représentent les meilleures relations pour chaque site et r^2 représente le coefficient de corrélation. Le nombre de points de mesure est de 213 pour le site 300, 90 pour le site 418, 63 pour le site 507 et 255 pour le site 615. Le coefficient de corrélation pour l'ensemble des points est 0,3608.

Figure 16. Rapports Sr/Ca dans les coquilles d'*Astarte* par rapport aux vitesses de croissance après l'élimination de la composante tendancielle avec le package *dplR* pour le logiciel de programmation R (Bunn, 2010). Les lignes pointillées représentent les meilleures relations pour chaque site et r^2 représente le coefficient de corrélation. Le nombre de points de mesure est de 213 pour le site 300, 90 pour le site 418, 63 pour le site 507 et 255 pour le site 615. Le coefficient de corrélation pour l'ensemble des points est 0,0307.

Figure 17. Profil de température moyenne selon la profondeur; A. À la sortie de la baie de Disko en juillet 2007. Les masses d'eau illustrées sont les eaux de surface (SW), les eaux polaires (PW) et le courant Ouest-Groenlandais (WGC) (Figure tirée de Moros et al. 2016); B. Dans la partie est du Déroit de Davis en juillet, de 1950 à 2000. Les données ont été prises dans une région de 50

km par 50km, centrée à 66.67°N, 56.68°W (Figure tirée de Tang et al., 2004); Des points ont été rajouté à la droite de la figure pour indiquer la profondeur de nos sites d'échantillonnage.

Figure 18. Profils de température et de densité potentielle de l'eau entre l'île de Baffin (gauche) et le Groenland (droite), à la hauteur du Détroit de Davis, pour les mois septembre-octobre en 2004. Le profil de densité montre la position des masses d'eaux : Eaux Arctiques (AW), Eaux de Surface Ouest-Groenlandaise (WGSW), Courant Ouest-Groenlandais/Irminger (WGIW) et Eaux Profondes de la Baie de Baffin (BBDW). La figure est tirée de Azetsu-Scott et al. (2012). Des points ont été rajoutés à la droite de la figure pour indiquer la profondeur de nos sites d'échantillonnage.

Figure 19. Index de l'Oscillation nord-atlantique (ONA), température, salinité, apport d'eau douce et niveau de la mer dans la Mer du Labrador de 1960 à 2005. Figure tirée de Yashayaev (2007).

Figure 20. Température dans la Mer du Labrador (Yashayaev 2007) comparée aux rapports Mg/Ca des sites 418 et 615, de 1960 à 2005.

Figure 21. Oscillation Nord Atlantique (Yashayaev 2007) et rapports Mg/Ca du site 615, de 1960 à 2005.

Figure 22. Températures potentielles au centre de la Mer du Labrador de 1987 à 2005. Sur la figure sont identifiées les masses d'eaux suivantes : Eaux de Débordement du Détroit de Denmark (DSOW), Eaux de la Mer du Labrador (LSW) et une nouvelle classe de LSW qui apparait dans la Mer du Labrador en 2000 (LSW₂₀₀₀). Figure tirée de Yashayaev (2007).

Figure 23. Températures potentielles au centre de la Mer du Labrador (Yashayaev, 2007) comparées aux rapports Mg/Ca des bivalves de la baie de Baffin entre 1987 et 2005.

Figure 24. Rapports Ba/Ca dans les coquilles d'*Astarte* par rapport aux vitesses de croissance estimées à partir de la largeur des incréments. Les lignes pointillées représentent la meilleure relation pour chaque site et r^2 représente le coefficient de corrélation. Le nombre de points de mesure est de 213 pour le site 300, 90 pour le site 418, 63 pour le site 507 et 255 pour le site 615. Le coefficient de corrélation pour l'ensemble des points est 0,1688.

Figure 25. Rapport annuel Ba/Ca (moyenne mobile sur 5 ans) de chaque site et couvert de glace moyen annuel (Walsh et al. 2019). Corrélations : 615c ; n=61; p-value=0,023 615sp : n=61, p-value=0,020.

Figure 26. Rapport annuel Ba/Ca (moyenne mobile sur 5 ans) du site 300 et couvert de glace moyen annuel (Walsh et al. 2019). Corrélations : 300c: n=61, p-value=4,61E-05; 300sp : n=36, p-value=0,018.

Figure 27. Rapport annuel Ba/Ca (moyenne mobile sur 5 ans) du site 418 et couvert de glace moyen annuel (Walsh et al. 2019). Corrélation : 418c : n=44 p-value=0,164.

Figure 28. Rapport annuel Ba/Ca (moyenne mobile sur 5 ans) du site 507 et couvert de glace moyen annuel (Walsh et al. 2019). Corrélation : 507sp : n=38, p-value=0,0011.

Figure 29. Rapports annuel Mg/Ca et Ba/Ca (moyenne mobile sur 5 ans) du site 615.

LISTE DES PLANCHES

Planche 1. *Astarte crenata*. Les photos 1 et 2 montrent les vues internes et externes des valves droites de six spécimens d'*Astarte crenata*. Les trois spécimens de la rangée supérieure proviennent du site 300 et les trois spécimens de la rangée inférieure proviennent du site 615. On note que la plupart des échantillons montrent de l'érosion autour de l'umbo.

Planche 2. *Astarte* sp. Les photos 1 et 2 montrent les vues internes et externes des valves droites de six spécimens d'*Astarte* sp. Les trois spécimens de la rangée supérieure proviennent du site 300, tandis que les trois spécimens de la rangée inférieure proviennent du site 615. Certains spécimens présentent une légère érosion autour de l'umbo.

Planche 3. Vue transversale d'une valve droite d'*Astarte crenata* (échantillon 300c2). La partie visible dans photo 2 a été colorée avec de la solution de Mutvei (cf. Schöne et al., 2005) afin de faciliter le discernement des incréments de croissance.

Planche 4 : Section d'*Astarte crenata* (échantillon 418c2) vue à la loupe binoculaire. La coquille a été colorée avec de la solution de Mutvei (cf. Schöne et al., 2005) afin de faciliter le discernement des incréments de croissance.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Liste et localisation des sites d'échantillonnage.

Tableau 2. Éléments mesurés par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif par ablation laser (*LA-ICP-MS*) et leur signal potentiel.

Tableau 3. Vitesse de croissance pour chaque spécimen analysé : valeurs minimales, maximales, moyenne et écart-type (1 sigma).

1. Introduction

Au cours des dernières décennies, plusieurs études ont démontré que les bivalves peuvent constituer des archives paléoclimatiques. En utilisant des techniques analytiques de haute résolution telle que la spectrométrie de masse par ablation au laser (LA-ICP-MS), il est en effet possible d'obtenir des enregistrements élémentaires dans les incréments de croissance des bivalves (e.g., Gillikin et al., 2006; Schöne et al., 2010; Holland et al., 2014; Füllenbach et al., 2015; Marali et al., 2017a; Marali et al., 2017b).

Les coquilles de bivalves peuvent renfermer des enregistrements paléoclimatiques de résolution annuelle (Toland et al., 2000; Schöne et al., 2004; Helama et al., 2007; Carroll et al., 2009), saisonnière ou même hebdomadaire (Hatch et al., 2012). La structure des coquilles de bivalves se distingue en effet par la présence d'incrément de croissance périodiques (Pannella et MacClintock, 1968; Clark, 1975) qui permettent de replacer les informations structurelles et géochimiques contenues dans celle-ci dans un contexte temporel. Ces paramètres peuvent potentiellement être influencés par le contexte environnemental entourant l'organisme durant sa croissance (Kennish et Olsson, 1975; Killingley et Berger, 1979). Des études ont permis de proposer une relation entre le rapport Mg/Ca et la température de l'eau (Ullman et al., 2013; Bourgeois et al., 2014). Toutefois, d'autres études indiquent une influence déterminante des effets vitaux (Lorrain et al., 2005; Surge & Lohmann, 2008; Wanamaker et al., 2008). Le rapport U/Ca dans les coraux présenterait une relation directe avec la température (Min et al., 1995; Shen & Dunbar, 1995), ce qui ne semble pas être le cas de certains bivalves (Gillikin et Dehairs, 2013). Par ailleurs, les rapports Mg/Ca et Sr/Ca dans les incréments de croissance des bivalves peuvent varier considérablement selon les espèces et entre spécimens contemporains d'une même localité (Dodd, 1965; Gillikin et al., 2005; Lorrain et al., 2005; Freitas et al., 2008). Le signal géochimique dans les incréments de bivalves n'est donc pas univoque et plusieurs études ont été entreprises dans le but de démontrer que certains genres et espèces peuvent être utilisés comme proxy de température et de productivité en paléoclimatologie, paléoécologie ou paléocéanographie (Gillikin et al., 2005; Hatch et al., 2012; Lazareth et al., 2013; Vihtakari et al., 2016).

Les mollusques du genre *Astarte* sont des animaux endobenthiques qui se nourrissent par filtration de la matière en suspension et vivent généralement dans le sédiment à quelques millimètres de profondeur, préférentiellement dans les sables silteux pouvant contenir quelques graviers (Saleuddin, 1965). Ils occupent les milieux marins polaires et subpolaires. *Astarte* est un genre approprié pour des études sclérochronologiques dans le contexte de la baie de Baffin, tel que démontré par l'étude sclérochronologique d'Olivier et al. (2020) utilisant des *Astarte moerchi* provenant de la baie de Baffin. Par ailleurs, le genre *Astarte* occupe souvent des milieux marins de quelques centaines de mètres de profondeur, ce qui constitue un avantage pour l'étude des milieux de marges continentales et permet d'éviter la très grande variabilité des environnements côtiers et peu profonds. Marali et Schöne (2015) ont en effet noté que les incréments de croissance des bivalves d'eaux peu profondes, dans la zone de mélange au-dessus de la pycnocline, présentent souvent de mauvaises corrélations affichant ainsi une grande hétérogénéité de leur signal et rendant difficile l'établissement d'une chronologie fiable. La synchronicité équivoque du signal

environnemental dans les spécimens vivant près de la surface est sans doute due à des variations de salinité, température et turbidité qui sont atténuées en profondeur (Epplé et al., 2006).

L'objectif principal de ce projet de recherche est de vérifier le signal des enregistrements sclérochronologiques de bivalves du genre *Astarte* afin d'en évaluer la portée, comme proxy, de paramètres environnementaux. Pour ce faire, les incréments de croissance et la composition géochimique de treize coquilles échantillonnées dans quatre sites du secteur sud-est de la baie de Baffin (Figure 1) ont été analysés. La marge continentale de l'est de la baie de Baffin est baignée par le courant ouest groenlandais circulant vers le nord. Les eaux de surface se caractérisent par de faibles salinités en raison d'apports d'eau de fonte de la calotte groenlandaise. Il s'agit d'un environnement se singularisant par de la glace de mer saisonnière et une productivité fortement influencée par les courants océaniques (Buch et al., 2004).

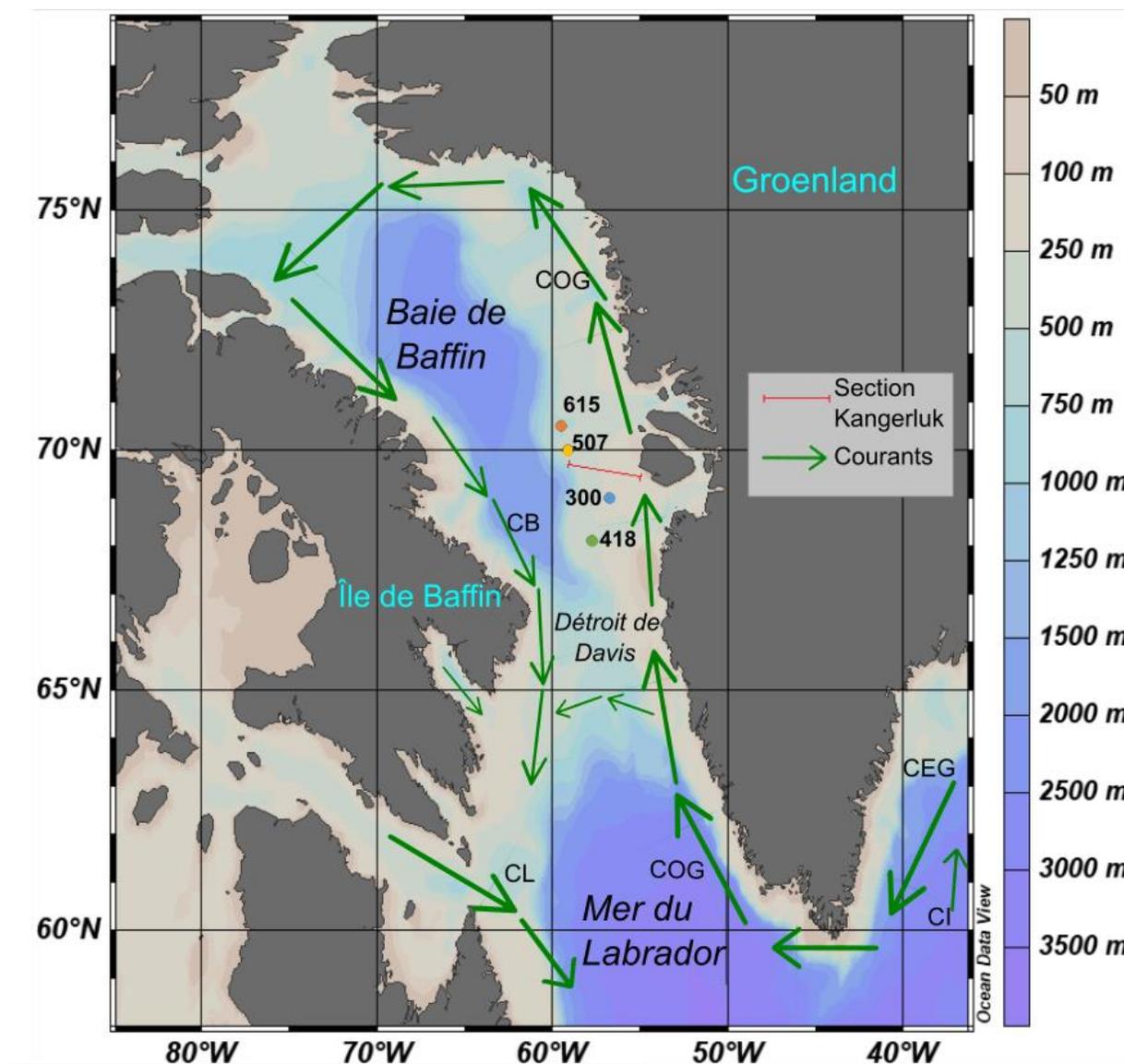


Figure 1. Localisation des 4 sites d'échantillonnage d'*Astarte crenata* et *Astarte* sp. et position du transect Kangerluk (cf. Figure 2). Les courants de surface illustrés sur la figure incluent le courant de Baffin (CB), le courant Est-Groenlandais (CEG), le courant d'Irminger (CI), le courant du Labrador (CL) et le courant Ouest Groenlandais (COG).

2. Contexte régional

Les sites d'échantillonnages se situent à l'est de la baie de Baffin, dans la Baie de Disko. Il s'agit d'une zone au nord du détroit de Davis qui sépare la baie de Baffin, au nord, et la Mer du Labrador, au sud (Jørgensen et al., 2005). La baie de Baffin est connectée à l'océan Arctique via le détroit de Nares qui est peu profond (seuil < 200 m) et semble constituer une barrière physiographique pour les animaux d'eaux profondes (Jørgensen et al., 2005). La baie de Baffin est ainsi un bassin marin subarctique isolé de l'Océan Arctique (Buch, 2000). Il est connecté à l'Atlantique Nord par le détroit de Davis dont le seuil se situe à 700 m de profondeur (Jørgensen et al., 2005).

La région d'étude, à l'ouest du Groenland, se singularise par une forte stratification des eaux de surface qui enregistrent des températures sous le point de congélation en hiver et dépassent 5°C en été (Buch et Nielsen, 2001). Sous la mince couche de surface (~0-1 m, Landy et al., 2017) s'étend une couche d'eau froide (< 0°C) d'environ 100 m d'épaisseur qui surmonte les eaux plus chaudes d'origine Atlantique, marquées par des températures atteignant 2,2°C entre 400 et 500 m de profondeur. En dessous de 500 m, les températures diminuent et peuvent atteindre des valeurs négatives à forte profondeur (Buch, 2000). Selon Tang et al. (2004), les températures potentielles diminuent sous 0°C autour de 1500 m et la masse d'eau du fond de la baie de Baffin (> 1800 m) a une température potentielle moyenne d'environ -0,5°C.

La circulation des eaux de surface se caractérise au sud-est du Groenland par le courant d'Irminger, une branche du courant nord-atlantique qui transporte des eaux relativement chaude (4-6°C) de la mer d'Irminger vers le cap Farewell. Le courant d'Irminger se mélange graduellement au courant est-groenlandais d'origine arctique, pour former le courant ouest-groenlandais circulant vers le nord. Au sud du Détroit de Davis, une branche du courant ouest-groenlandais bifurque vers l'ouest et une autre branche circule vers le nord dans la baie de Baffin le long des marges groenlandaises (Jørgensen et al., 2005). Dans la région d'étude, la couche d'eau de surface est peu salée car elle est composée d'eaux de fonte de l'Arctique et des glaces groenlandaises véhiculées par le courant est-groenlandais se mélangeant au courant ouest-groenlandais (Mauritzen et al., 2013). Sous la couche peu salée et jusqu'à des profondeurs d'environ 500 à 600 mètres, circule le courant ouest-groenlandais. En dessous, les eaux profondes de la baie de Baffin proviennent de l'Océan Arctique via le détroit de Nares.

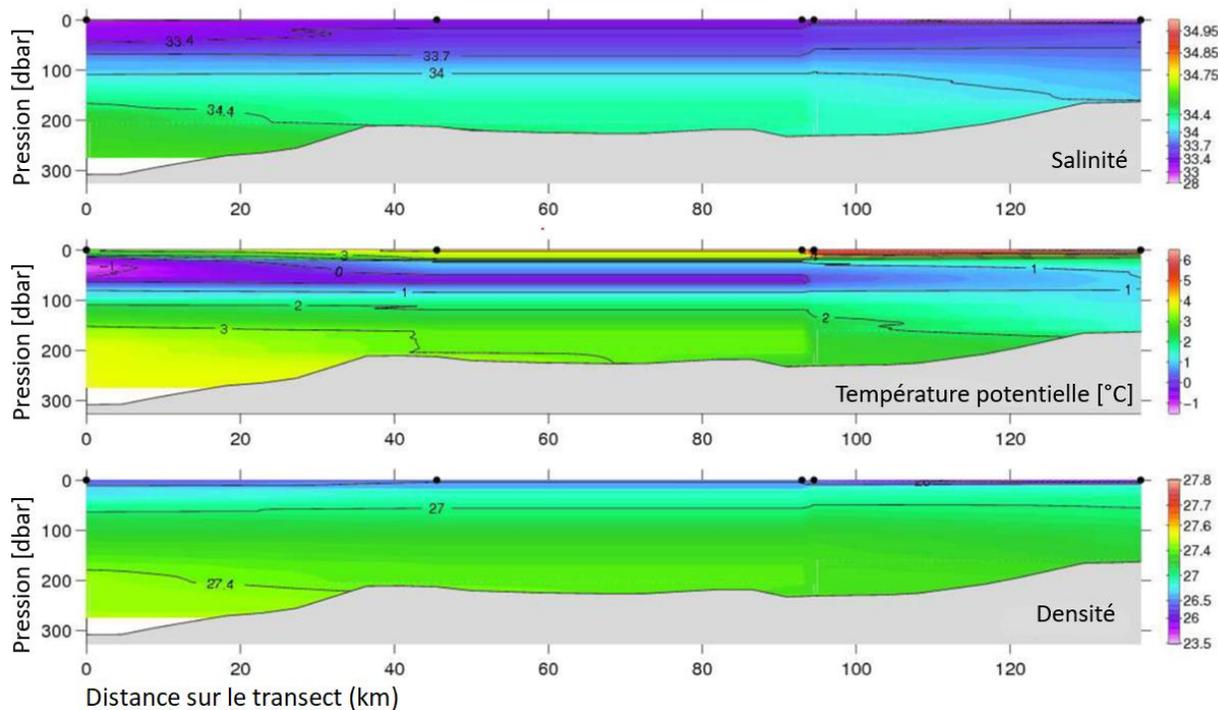


Figure 2. Distribution verticale de la salinité, de la température potentielle et de la densité de l'eau, le long du transect de Kangerluk (voir Figure 1) les 10-11 juillet 2007 (figure tirée de Ribergaard et al., 2008).

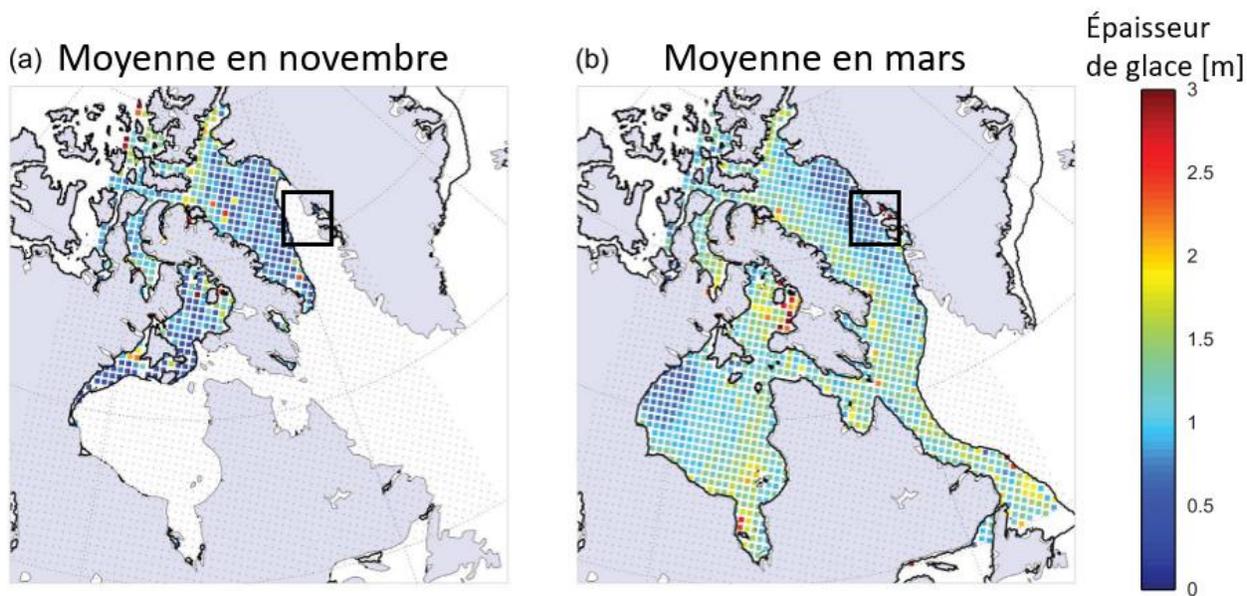


Figure 3. Épaisseur de la glace de mer moyenne en novembre (a) et en mars (b) de 2003 à 2016 déterminée à partir d'observations satellitaires ICESat GLAS (*Ice, Clouds, and Land Elevation Satellite - Geoscience Laser Altimeter System*), Cryosat-2 et SMOS (*Soil Moisture Ocean Salinity*). Les lignes noires illustrent la moyenne de la limite de glace moyenne correspondant à 20% de concentration (Figure tirée de Landy et al., 2017). Les rectangles noirs indiquent la localisation de notre zone d'étude.

La productivité dans la baie de Baffin est grandement influencée par le couvert annuel de glace de mer (Heide-Jørgensen et al., 2007; Landy et al., 2017). Heide-Jørgensen et al. (2007) ont montré que les blooms de phytoplancton se développent avec une couverture de glace de mer entre 50% et 80%. Ils ont aussi observé que la partie est de la baie de Disko, affectée par les eaux de fontes des glaciers groenlandais, enregistre un bloom accéléré après la fonte des glaces.

L'étude d'Olivier et al. (2020) met en relation un net changement dans les variations de croissance et les rapports Ba/Ca chez des *Astarte* provenant du nord de la baie de Baffin depuis la fin des années 1970, avec un changement dans la disponibilité de la nourriture pour les bivalves. Leur résultats suggèrent que les changements sclérochronologiques observés dans les coquilles de leur spécimens (croissance et Ba/Ca) sont probablement dus soit à des changements locaux dans la dynamique de la glace de mer (régulation ascendante exercée par la glace de mer sur la production de phytoplancton), soit à un décalage entre les efflorescences de phytoplanctons et le broutage du zooplancton dû à des changements phénologiques.

Entre les années 1950 et 2002, il semble y avoir eu une tendance à la hausse de l'étendue du couvert de glace dans certains secteurs de la baie de Baffin, contrairement à la plupart des mers arctiques où l'on a plutôt enregistré un déclin (Stern et Heide-Jørgensen, 2003; Heide-Jørgensen et Laidre, 2004). Cependant, des études plus récentes montrent aussi une tendance à la baisse de l'étendue de la glace de mer à l'échelle de la baie de Baffin et de la Mer du Labrador depuis trois décennies (Parkinson et Cavalieri, 2008; Møller et Nielsen, 2020). Møller et Nielsen (2020) démontrent que la diminution de la glace de mer dans les régions arctiques et subarctiques mène à la migration d'espèces vers le Nord. En particulier, parmi les espèces zooplanctoniques, *Calanus finmarchicus* d'origine atlantique s'intègre de plus en plus dans la baie de Baffin où il compétitionne avec les espèces arctiques telles *Calanus hyperboreus* et *Calanus glacialis*. La compétition entre les espèces a un impact majeur sur les populations de *Calanus* qui joue un rôle central dans la chaîne alimentaire arctique et affecte indirectement les consommateurs primaires comme les bivalves et les niveaux trophiques supérieurs, incluant les poissons, les oiseaux de mers et les mammifères marins.

3. Objets et Méthodes

3.1 Échantillonnage

Les spécimens de bivalves ont été récupérés vivants par carottage boîte lors de l'expédition 2016 du *CCGS Amundsen* (cf. Tableau 1). Ils ont été échantillonnés à des bathymétries comprises entre 199 et 615 mètres, donc sous la zone de mélange de surface. Ils ont été identifiés par Philippe Archambault, professeur de l'Université Laval, avant de nous être expédiés. Les spécimens appartiennent au genre *Astarte*, et certains ont été identifiés comme *Astarte crenata*. (Planche 1 et 2)



Planche 1 : *Astarte crenata*. Les photos 1 et 2 montrent les vues internes et externes des valves droites de six spécimens d'*Astarte crenata*. Les trois spécimens de la rangée supérieure proviennent du site 300 et les trois spécimens de la rangée inférieure proviennent du site 615. On note que la plupart des échantillons montrent de l'érosion autour de l'umbo.



Planche 2 : *Astarte* sp. Les photos 1 et 2 montrent les vues internes et externes des valves droites de six spécimens d'*Astarte* sp. Les trois spécimens de la rangée supérieure proviennent du site 300, tandis que les trois spécimens de la rangée inférieure proviennent du site 615. Certains spécimens présentent une légère érosion autour de l'umbo.

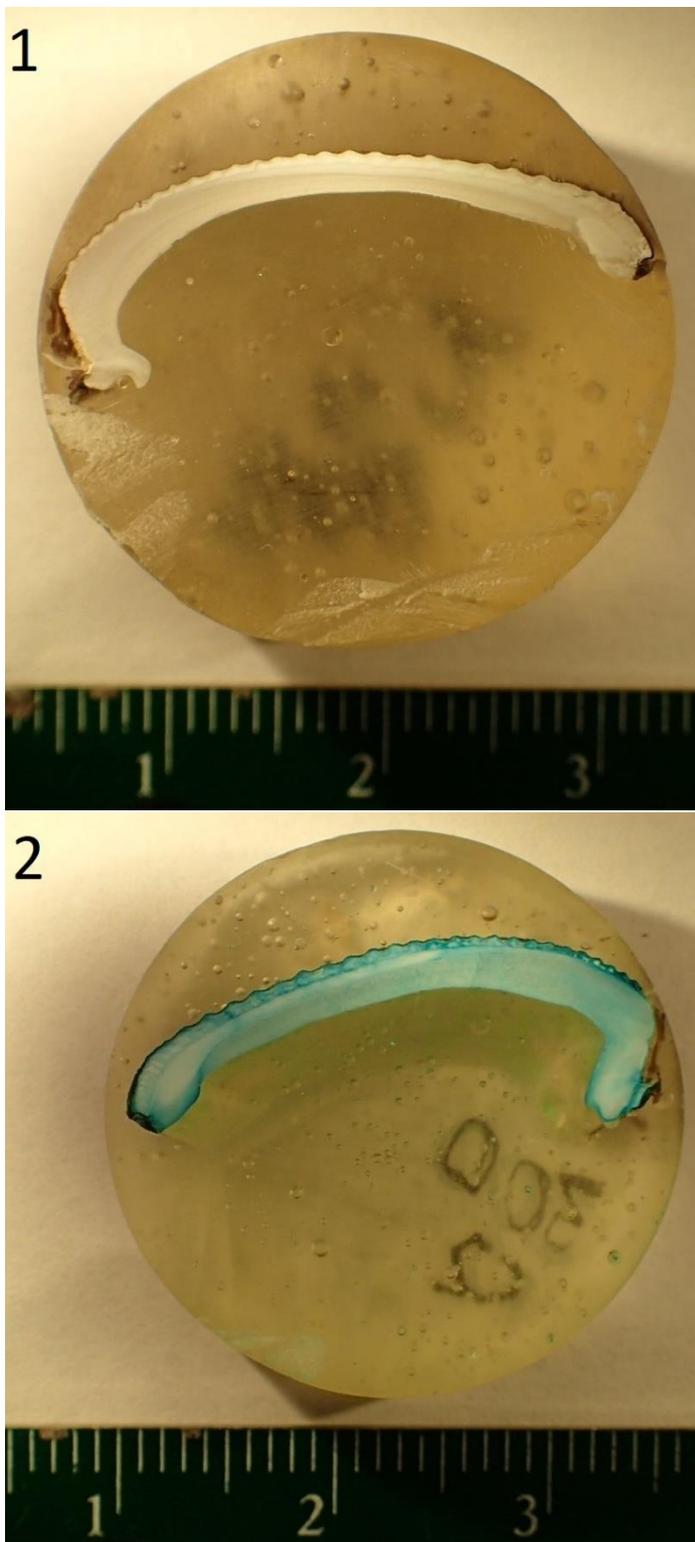


Planche 3 : Vue transversale d'une valve droite d'*Astarte crenata* (échantillon 300c2). La partie visible dans photo 2 a été colorée avec de la solution de Mutvei (cf. Schöne et al., 2005) afin de faciliter le discernement des incréments de croissance.

Tableau 1. Liste et localisation des sites d'échantillonnage.

Station	Date	Latitude	Longitude	Profondeur (m)	Nb spécimens
300	2016-06-17	68.99948	56.78880	199	5
418	2016-06-28	68.11500	57.76250	384	2
507	2016-06-30	70.01088	59.11640	294	2
615	2016-07-05	70.49607	59.51383	615	4

3.2 Préparation des échantillons

Les tissus vivants à l'intérieur de chaque échantillon ont été éliminés mécaniquement et les coquilles ont été lavées à l'eau et séchées à l'air. Afin de les solidifier avant de les scier, les coquilles ont été placées dans des cylindres d'époxy. La valve droite de chaque spécimen a été utilisée pour des analyses chimiques et sclérochronologiques. Les coquilles ont été sciées avec une scie rotative *Dremel*TM, perpendiculairement aux incréments de croissance et en passant par l'umbo. Les coquilles sciées ont par la suite été polies avec un papier abrasif de 600 grains par cm² sur un instrument de polissage de type *ECOMET3*TM. Les cylindres d'époxy ont été polis jusqu'à ce que la surface soit aussi lisse que possible.

3.3 Analyses chimiques au spectromètre de masse à ablation laser

Une partie des moitiés de valve a été réservée pour des analyses par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif par ablation laser (*LA-ICP-MS*): l'instrument utilisé est un G2 de *Photon Machine*TM avec un laser à longueur d'onde de 193 nm et l'acquisition élémentaire sur un *Nu Atom*TM (*HR-ICP-MS*) au Centre de recherche sur la dynamique du système Terre (Geotop) à l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Préalablement à l'analyse au *LA-ICP-MS*, les sections polies ont subi une pré-ablation, afin de nettoyer la surface, en utilisant un laser de 150 µm de diamètre à une vitesse de 100 µm/s. L'analyse chimique a ensuite été réalisée avec un laser de 40 µm de diamètre et une vitesse de 10 µm/s, sur la tranche de la coquille externe des échantillons, en suivant la direction de croissance, perpendiculairement aux stries annuelles. Les mesures ont été prises toutes les 0,41 secondes, soit à des intervalles d'environ 5 µm. Les échantillons sont préparés pour le spectromètre de masse, par groupe de trois, avec le matériel de référence standard (*SRM*) *NIST 610*, un verre contenant des éléments traces, afin de calibrer les mesures faites au spectromètre (Jochum et al., 2011).

Les éléments d'intérêt ont été mesurés via les isotopes suivants: ⁷Li, ²⁵Mg, ²⁷Al, ⁴³Ca, ⁴⁴Ca, ⁵⁵Mn, ⁵⁹Co, ⁶⁰Ni, ⁶³Cu, ⁶⁶Zn, ⁸⁶Sr, ⁸⁸Sr, ⁹⁷Mo, ¹¹¹Cd, ¹³⁵Ba, ¹³⁷Ba, ²⁰⁸Pb et ²³⁸U. Le choix de ces éléments a été fait suite aux compilations de Doré et al. (2020) qui font état d'un signal environnemental potentiel pour chacun d'entre eux (voir Tableau 2). Les données sont généralement rapportées en référence au calcium, qui est le cation majeur de la composition de la coquille carbonatée pouvant être mesurée par le spectromètre de masse, en pratique, via son isotope ⁴³Ca.

L'étude vise à comparer des rapports entre éléments et leur évolution relative au cours de la croissance des spécimens. Les tendances générales entre les rapports isotopiques et les rapport élémentaires sont similaires, donc les résultats présentés font références aux rapports entre isotopes mesurés.

Tableau 2 : Éléments mesurés par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif par ablation laser (*LA-ICP-MS*) et leur signal potentiel.

Élément	Signal potentiel
Li	Traceur du taux de calcification ou d'apports sédimentaires riches en lithium (Thébault et al. 2009a; Thébault et Chauvaud 2013)
Mg	Traceur de paléotempératures (Tresher et al., 2004, 2005, 2010; Sherwood et al., 2005), mais son efficacité dans les bivalves est fortement débattue (Vander Putten et al., 2000; Freitas et al., 2006 & 2008; Wanamaker et al. 2008b; Izumida et al., 2011; Marali et al., 2017b).
Al	Traceur de matériel détritique (Buat-Menard 1979; Buat-Menard & Chesselet 1979). Traceur de productivité dans la relation Al/Ti (Averyt & Paytan, 2004).
Ca	Élément majeur de la structure carbonatée. Utilisé pour normaliser les autres éléments (Sinclair et al. 2011).
Mn	Traceur de blooms et d'activité biologique (Lazareth et al., 2003; Sinclair et al., 2011), d'apport sédimentaires terrigènes ou hydrothermaux (Shiller, 1997) ou de concentration de Mn^{2+} dissout dans l'eau de mer (Franklin & Morse, 1983).
Co	Traceur de pollution (Protasowicki et al., 2008; Youssef et al., 2016)
Ni	Traceur de pollution (Protasowicki et al., 2008; Youssef et al., 2016)
Cu	Élément toxique pour les bivalves, traceur de pollution (Protasowicki et al., 2008; Youssef et al., 2016, Beyer et al. 2017)
Zn	Élément toxique pour les bivalves, traceur de pollution (Protasowicki et al., 2008; Youssef et al., 2016, Beyer et al. 2017)
Sr	Traceur de la vitesse de précipitation de la calcite (Zhong & Mucci, 1989), de la vitesse de croissance (Weinbauer & Velimirov, 1995; Weinbauer et al., 2000) ou des températures de surface (Yan et al. 2013).
Mo	Traceur de productivité (Richard, 2009; Thébault et al., 2009b; Barats et al., 2010; Tabouret et al. 2012).
Cd	Élément toxique pour les bivalves, traceur de pollution (Protasowicki et al., 2008; Youssef et al., 2016, Beyer et al. 2017)
Ba	Traceur de différents mécanismes dans l'océan, incluant les upwellings (Lea et al., 1989), un apport de sédiments continentaux (Sinclair, 1999; Sinclair & McCulloch, 2004), le ruissellement souterrain (Moore & Shaw, 1998; Shaw et al., 1998) et la productivité de surface (Lea & Boyle, 1990; Hatch et al. 2012; Doré et al. 2020). Le Ba a également été suggéré comme un traceur de salinité spécifique aux estuaires (Gillikin et al., 2006; Poulain et al., 2015).
Pb	Traceur de pollution anthropique (Murozumi et al., 1969; Shen et Boyle, 1987; Boutron et al., 1994; Lazareth et al., 2000; Protasowicki et al., 2008; Youssef et al., 2016). Élément potentiellement toxique pour les bivalves (Beyer et al. 2017).

U	Traceur pour la température et la salinité, indicateur des concentrations en ions de carbonates (Sinclair et al. 2011).
---	---

3.4 Dénombrement des incréments sur une base visuelle

Les moitiés de coquilles réservées pour le dénombrement des incréments de croissance ont été colorées avec de la solution de Mutvei (cf. Schöne et al., 2005), qui est préparée à partir de 500 ml d'acide acétique (1%), 500 ml de glutaraldéhyde (25%) et 5 à 10 g de bleu alcian. Le colorant marque visuellement les marques de croissance ce qui rend l'observation et le dénombrement des incréments plus facile. Les coquilles ont été trempées dans la solution pendant 40 minutes à une heure, à une température de 20°C, puis rincées à l'eau distillée. Par la suite, les spécimens ont été photographiés à haute résolution pour mesurer la largeur des incréments de croissance. Lors de la mesure, les spécimens ont été observés à la loupe binoculaire afin d'identifier aussi précisément que possible les incréments de croissance et de détecter les bris et les impuretés éventuels (Planche 4).

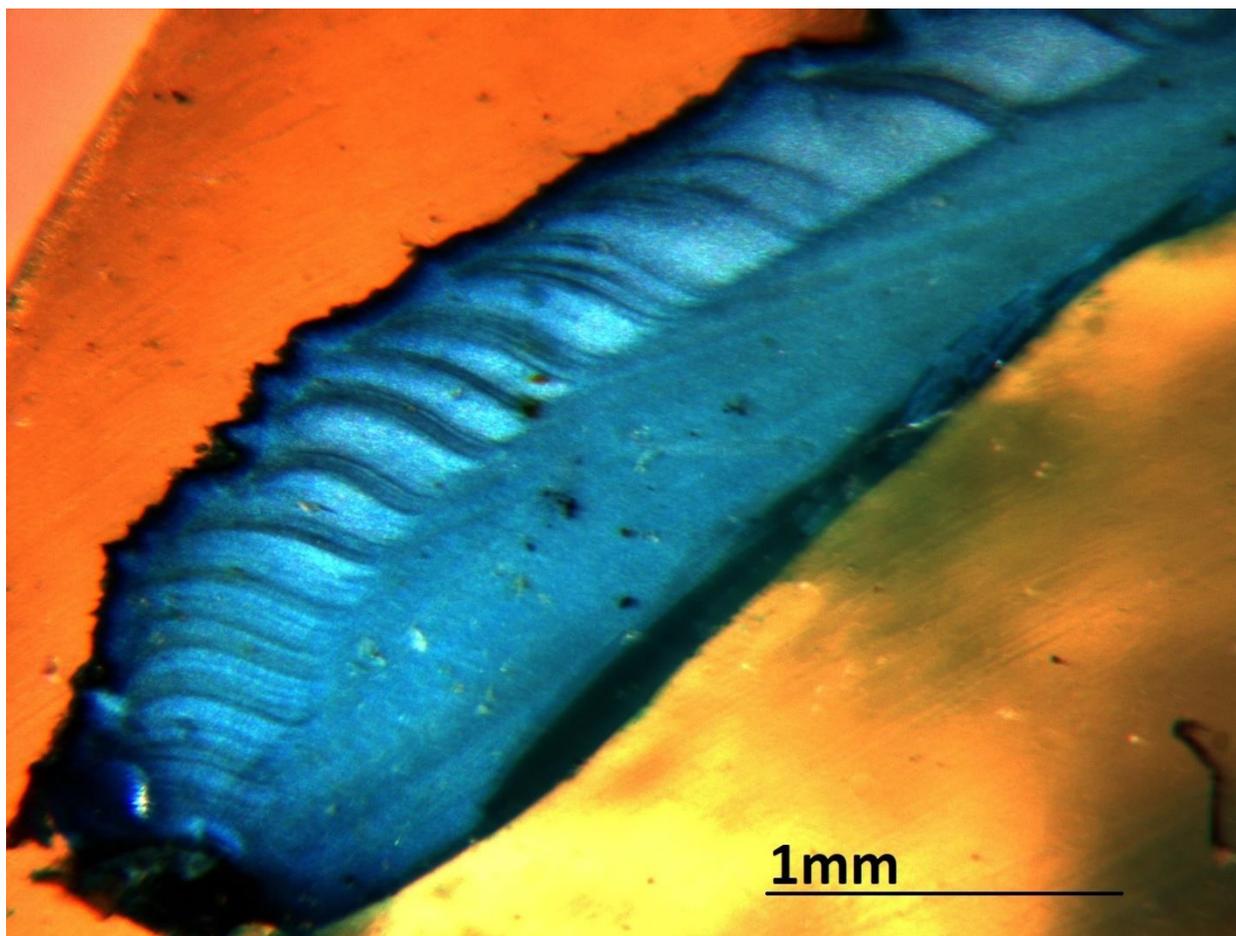


Planche 4 : Section d'*Astarte crenata* (échantillon 418c2) vue à la loupe binoculaire. La coquille a été colorée avec de la solution de Mutvei (cf. Schöne et al., 2005) afin de faciliter le discernement des incréments de croissance.

Pour isoler l'effet de l'environnement sur la croissance de l'organisme, il faut retirer l'effet ontogénique associé à celle-ci pour ne conserver que la part des variations de croissance associées à l'environnement (Román-González et al., 2016). En effet, la vitesse de croissance des bivalves, comme celle de la plupart des animaux et des plantes, est beaucoup plus rapide en début de vie et se stabilise lorsque l'organisme atteint la maturité.

3.5 Dénombrement des incréments à partir de mesures isotopiques sur LA-ICP-MS et présentation des résultats

Les résultats de mesures au spectromètre de masse ont été calibrés par rapport à l'étalon NIST 610 en utilisant le logiciel *Iolite* (<https://iolite-software.com/>) (Hellstrom et al., 2008; Paton et al., 2011) qui fonctionne avec Igor Pro (<http://www.wavemetrics.com>). L'analyse au spectromètre produit plusieurs séries de fichiers textes et Excel contenant les données brutes ainsi que l'horodatage de chaque transect. *Iolite* permet alors de rassembler toutes les mesures et de les standardiser.

Les données ont ensuite été compilées pour faire des graphiques illustrant les rapports élémentaires molaires par rapport à la distance à l'umbo. Toutes les données sont reportées dans l'annexe 1, mais nous n'avons utilisé ici que les rapports ayant des valeurs significatives au-dessus du seuil de détection. Il s'agit des rapports Li/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca et Ba/Ca. Finalement, on a calculé des moyennes annuelles pour des rapports élémentaires à partir du logiciel R, via un script fourni par Sam Davin (WWF-Canada).

Les impuretés, la bioérosion et les bris peuvent affecter la proportion de calcium, dans le carbonate, ce qui biaise les proportions de ^{43}Ca et, par conséquent, les rapports élémentaires. Aux endroits de la coquille où on observe des imperfections, les données brutes ont été examinées dans *Iolite* afin de vérifier la stabilité ou les instabilités de la composition isotopique. À de nombreux endroits, des chutes de calcium coïncidaient avec des maximas d'aluminium. Les proportions élevées d'aluminium peuvent être associées à des argiles accumulées dans les fractures de la coquille, biaisant ainsi le rapport élémentaire normalisé sur le calcium. De tels résultats n'ont pas été utilisés.

3.6 Sclérochronologie et composante tendancielle

La taille des incréments de croissance des bivalves est fortement influencée par la physiologie de l'individu, en particulier la composante tendancielle ontogénique (Román-González et al., 2016).

Afin de retirer la composante tendancielle des données de croissance des spécimens, nous avons utilisé la fonction *detrend* de la librairie de programme *dplr* (Bunn, 2010) avec le logiciel de programmation R. La fonction *detrend* a été utilisée avec la méthode de spline cubique sur 15 ans. La méthode de spline cubique est souvent utilisée en sclérochronologie des bivalves (Black et al. 2015, Butler et al. 2010, Butler et al. 2013, Chalut 2014, Hatch et al. 2013, Helama et al.

2007, Helama et al. 2009, Holland et al. 2014, Marali et al. 2017, Nielsen et al. 2008, Wanamaker et al. 2009).

Malheureusement, un bon nombre des spécimens ont des marques d'érosion au niveau de l'umbo, qui correspond à la région de la coquille incluant les incréments de croissance du début de la vie de l'animal. La coquille carbonatée de certains types de bivalves peut commencer à se dissoudre, parfois même pre-mortem (Linné, 1806; Björk, 1962; Cummins, 1994; Helama & Valovirta, 2007, Helama et al. 2009). Qui plus est, le taux de dissolution peut varier en fonction de la chimie des eaux environnante (Björk, 1962), donc si celle-ci est différente entre nos sites d'échantillonnages, l'érosion autour de l'umbo se produira à un rythme différent entre les différents sites.

Dans les cas où la dissolution commence pre-mortem, l'aire d'érosion augmentera progressivement au courant de la vie du bivalve (Helama & Valovirta, 2007). Donc, les individus plus âgés présenteront une plus grande aire de dissolution autour de l'umbo, et donc une plus grande perte d'incrément de jeunesse (cette tendance est visible sur les coquilles de la planche 1). La fonction *detrend* est plus efficace lorsque tous les incréments de croissance sont présence, puisqu'on peut alors identifier la tendance de croissance de l'organisme dans son entièreté. Chez les spécimens où les premiers incréments sont manquants, il est possible que la fonction *detrend* n'agisse pas à la perfection.

4. Résultats

Nous avons utilisé les mesures visuelles de largeur des incréments de croissances afin de déterminer les vitesses de croissances et de reporter les mesures géochimiques par rapport à l'âge.

Quatorze éléments ont été mesurés par LA-ICP-MS (voir tableau 2) en plus du calcium que l'on utilise pour la normalisation des rapports élémentaire. Parmi les éléments mesurés, certains présentent des variations comprises dans le bruit de fond et ne sont pas utilisés. Il s'agit de Al, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Pb et U (voir annexes 1 à 4). En revanche, les résultats de mesures du Li, Mg, Sr et Ba présentent des variations mesurables et significatives. Les résultats de leur analyse sont présentés ici. Les isotopes des éléments utilisés sont ${}^7\text{Li}$, ${}^{25}\text{Mg}$, ${}^{86}\text{Sr}$ et ${}^{135}\text{Ba}$. Ils ont été rapportés au ${}^{43}\text{Ca}$. Les rapports isotopiques (${}^7\text{Li}/{}^{43}\text{Ca}$, ${}^{25}\text{Mg}/{}^{43}\text{Ca}$, ${}^{86}\text{Sr}/{}^{43}\text{Ca}$, ${}^{135}\text{Ba}/{}^{43}\text{Ca}$) ont ensuite été traduits en rapports élémentaires (Li/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca) en considérant les pourcentages d'occurrence naturelle de chaque isotope. Finalement, les rapports ont été compilés pour calculer des moyennes annuelles correspondant aux incréments de croissance.

Les rapports ont été calculés à partir des mesures réalisées par spectrométrie de masse et exprimées en CPS (coups par seconde). Le résultat des mesures a ensuite été normalisé par rapport à l'étalon NIST610.

4.1 Vitesse de croissance et âges des spécimens analysés

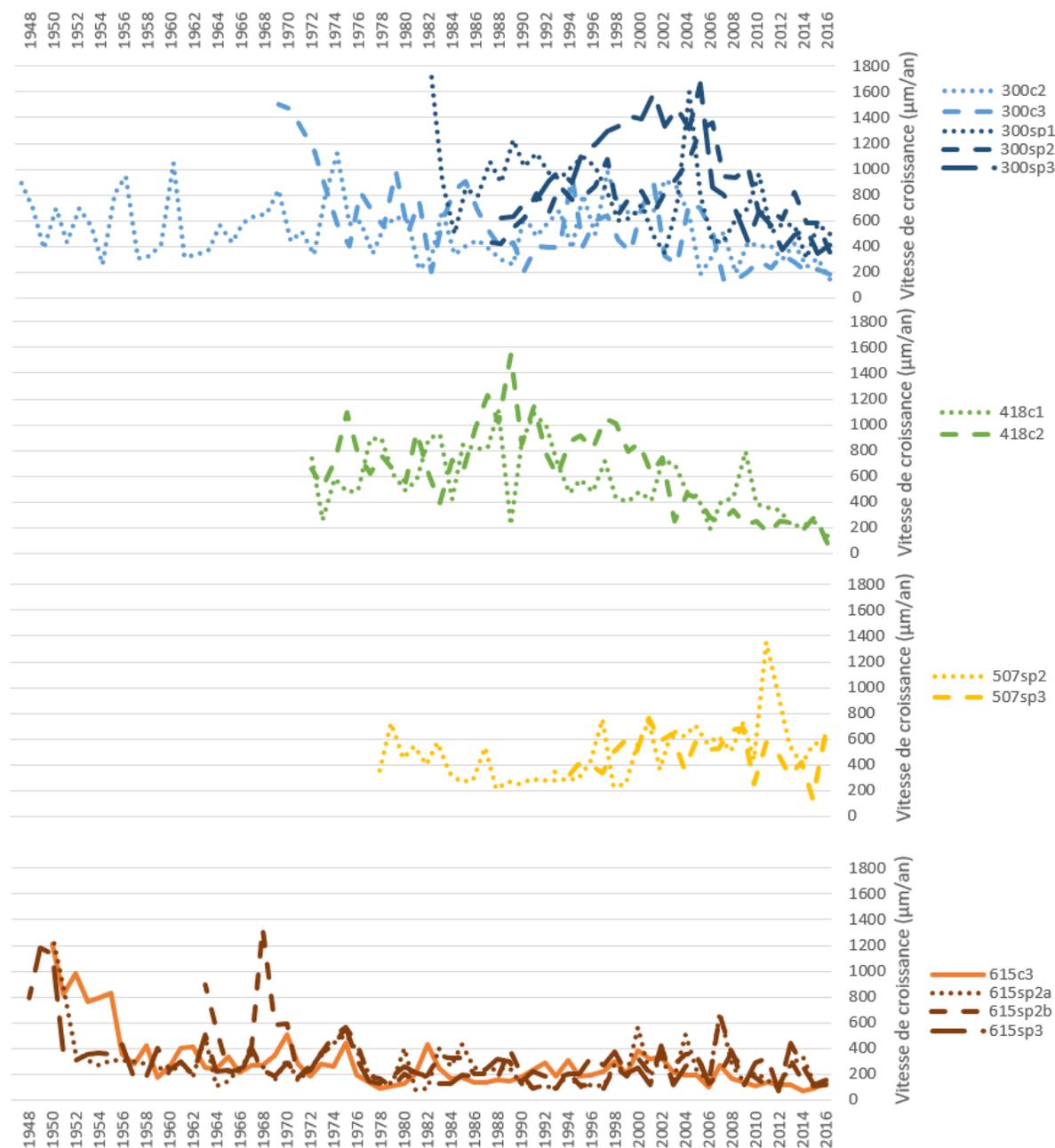


Figure 4. Vitesse de croissance de tous les échantillons mesurés.

Tableau 3 : Vitesse de croissance pour chaque spécimen analysé : valeurs minimales, maximales, moyenne et écart-type (1 sigma).

Spécimen	Minimum($\mu\text{m}/\text{an}$)	Maximum($\mu\text{m}/\text{an}$)	Moyenne($\mu\text{m}/\text{an}$)	Écart-type ($\mu\text{m}/\text{an}$)
300c2	146	1122	530	221
300c3	133	1502	568	335
300sp1	303	1733	800	319
300sp2	352	1361	772	235
300sp3	348	1666	926	394
418c1	133	1101	572	252
418c2	79	1540	648	328
507sp2	214	1356	491	231
507sp3	132	760	480	151
615c3	67	1208	289	219
615sp2a	79	1272	277	192
615sp2b	86	1329	294	221
615sp3	73	1178	290	193

Dans presque tous les spécimens, les premières années de vie produisent les incréments de croissance les plus larges. Rappelons cependant que les premières années de vie sont absentes chez certains spécimens en raison d'érosion autour de l'umbo (voir Planche 1; photo 1).

Les vitesses de croissances varient de 67 $\mu\text{m}/\text{an}$ à 1733 $\mu\text{m}/\text{an}$, soit de plus d'un ordre de grandeur. Les spécimens enregistrant les plus grandes variations proviennent des sites 300 et 418 (voir Tableau 3).

4.2 Rapports Li/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca et Ba/Ca

4.2.1 Site 300 (199 m)

Au site 300, deux spécimens d'*Astarte crenata* et trois spécimens d'*Astarte* sp. ont fait l'objet de mesures. Tel qu'illustré sur la Figure 2, l'ensemble des échantillons couvre une période temporelle allant de 1947 à 2016, mais seul l'intervalle de 1968 à 2016 permet de vérifier la reproductibilité environnementale des mesures sur plusieurs échantillons contemporains.

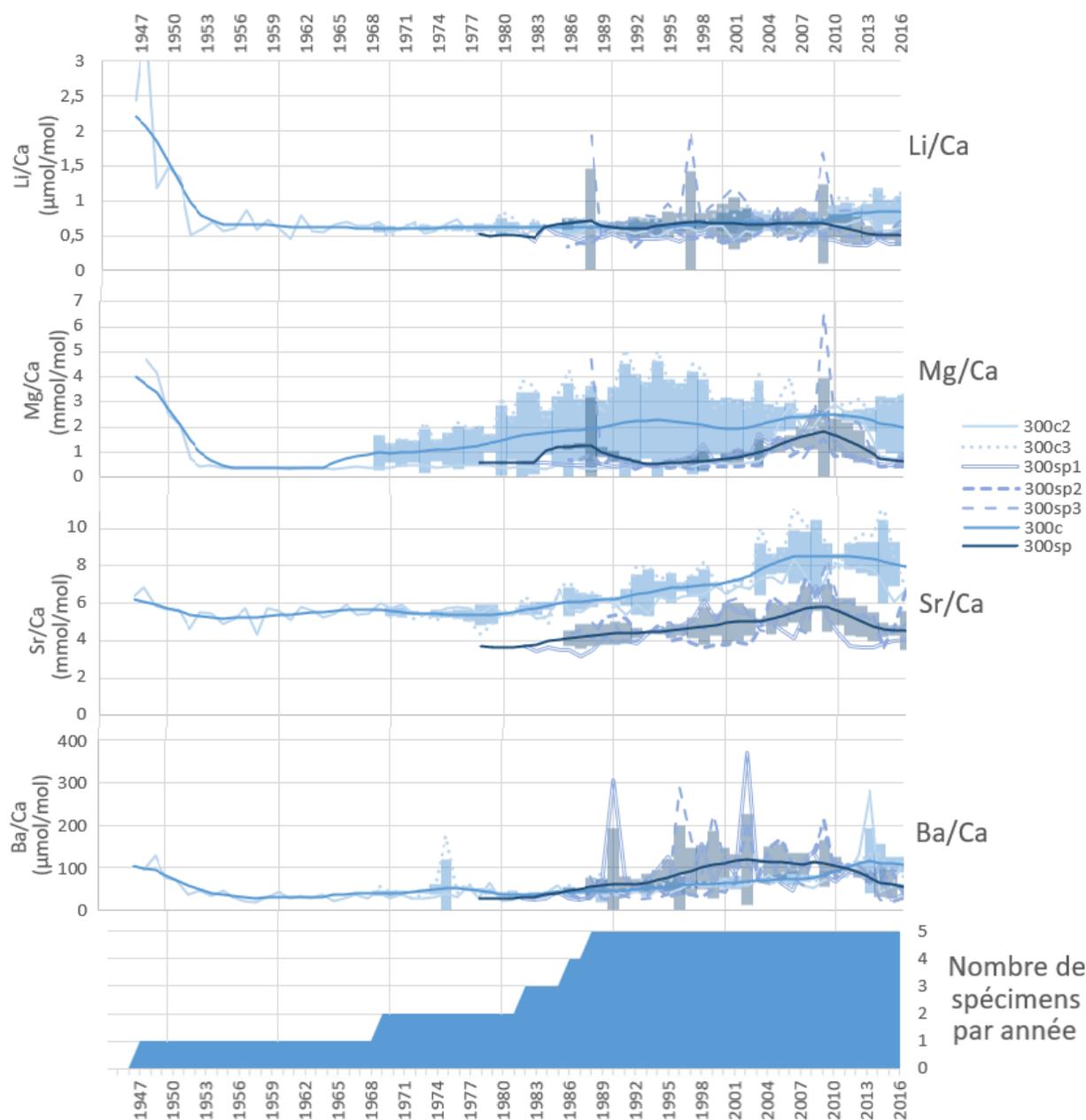


Figure 5. Résultats d'analyses élémentaires au site 300 par rapport à l'âge en année CE (Common Era). (a) rapport Li/Ca, (b) rapport Mg/Ca, (c) Sr/Ca, (d) Ba/Ca, (e) nombre de spécimens analysés. La courbe en gras présente une moyenne mobile sur cinq ans des résultats et les traits fins représentent les valeurs annuelles dans chaque spécimen individuel. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les courbes 300c, 418c et 615c représentent les données des spécimens d'*Astarte crenata*. Les courbes 300sp, 507sp et 615sp représentent les données des spécimens d'*Astarte* sp.

Les rapports Li/Ca sont pour la plupart compris entre 0,5 et 1 μmol/mol présentent peu de variations. La section antérieure à 1955 fait exception avec des valeurs atteignant 2. Après 2010, les spécimens d'*Astarte crenata* présentant des rapports en moyenne plus élevés, mais un des

spécimens d'*Astarte sp.* présente plusieurs pics supérieurs à 1,5 $\mu\text{mol/mol}$ en 1988, 1997 et 2009.

Les rapports Mg/Ca dans *Astarte crenata* sont plus faibles que dans *Astarte sp.* bien qu'il y ait un chevauchement potentiel des écarts types avant 2005. Les rapports Mg/Ca dans les échantillons d'*Astarte crenata* suivent une tendance à la hausse de 1955 à 2010. Ceux d'*Astarte sp.* se caractérisent par un minimum vers 1990 et par une augmentation jusque vers 2010.

Les rapports Sr/Ca suivent un profil très similaire dans les coquilles d'*Astarte crenata* et celles d'*Astarte sp.*, avec une augmentation graduelle de 1980 à 2005-2010, suivi d'une diminution après 2010. Toutefois, les rapports dans les spécimens d'*Astarte crenata* ($5 \pm 1 \text{ mmol/mol}$) sont supérieurs à ceux d'*Astarte sp.* ($7 \pm 1 \text{ mmol/mol}$). Il semble également y avoir une similitude entre les profils de Sr/Ca et Mg/Ca.

Les profils des rapports Ba/Ca dans les coquilles d'*Astarte sp.* et *Astarte crenata* se chevauchent mais ont des tendances très différentes. Le rapport Ba/Ca augmente graduellement de 20 à 120 à partir de 1980, mais atteint un plateau autour de 2001 dans les spécimens d'*Astarte sp.*, et autour de 2012 dans ceux d'*Astarte crenata*.

4.2.2 Site 418 (384 m)

Au site 418, deux spécimens de *Astarte crenata* ont fait l'objet de mesures. Les deux spécimens couvrent de 1972 à 2016.

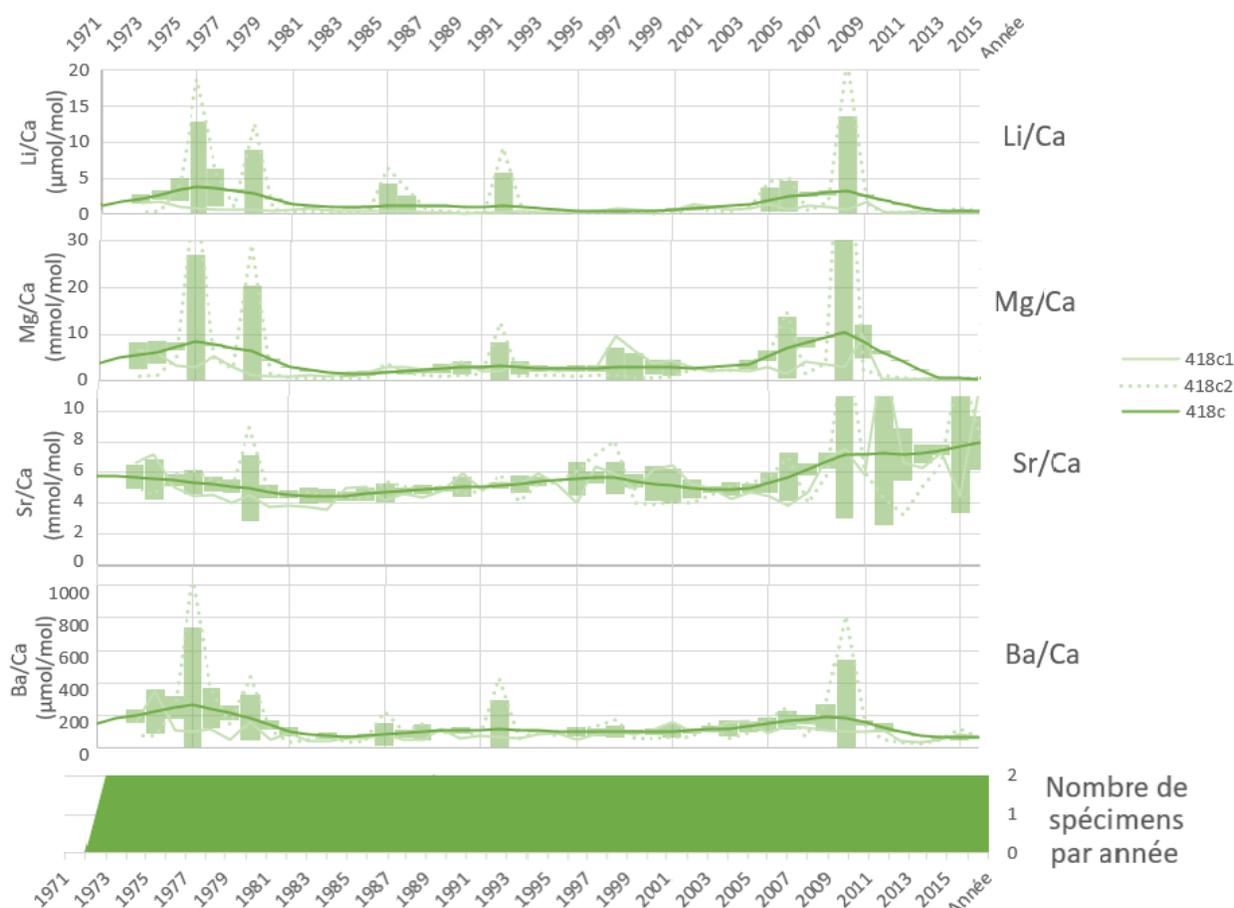


Figure 6. Résultats d'analyses élémentaires au site 418 par rapport à l'âge en année CE. (a) rapport Li/Ca, (b) rapport Mg/Ca, (c) Sr/Ca, (d) Ba/Ca, (e) nombre de spécimens analysés. La courbe en gras présente une moyenne mobile sur cinq ans des résultats et les traits fins représentent les valeurs annuelles dans chaque spécimen individuel. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les courbes 300c, 418c et 615c représentent les données des spécimens d'*Astarte crenata*. Les courbes 300sp, 507sp et 615sp représentent les données des spécimens d'*Astarte* sp.

Les rapports Li/Ca au site 418 sont relativement faibles et enregistrent peu de variations. Les courbes ne présentent pas de tendance particulière, mais sont parsemées de pics ponctuels. Il est à noter que les quelques pics ne sont enregistrés que dans une coquille à la fois. Le même constat peut être fait pour les rapports Mg/Ca et Ba/Ca.

Contrairement aux rapports des autres éléments, les rapports Sr/Ca présentent des variations, qui paraissent significatives dans les deux coquilles. Les valeurs moyennes décroissent légèrement entre 1970 et 1980, augmentent jusqu'en 1996, puis enregistrent une légère baisse jusqu'en 2001-2004 avant d'augmenter de façon très marquée jusqu'en 2016. Les deux coquilles ne présentent pas de variations identiques ou uniformes car elles sont ponctuées de maxima isolés, mais les tendances restent similaires.

4.2.3 Site 507 (294 m)

Au site 507, deux spécimens d'*Astarte* sp. ont fait l'objet de mesures. L'un de ces spécimens couvre de 1976 à 2016 et l'autre de 1992 à 2016.

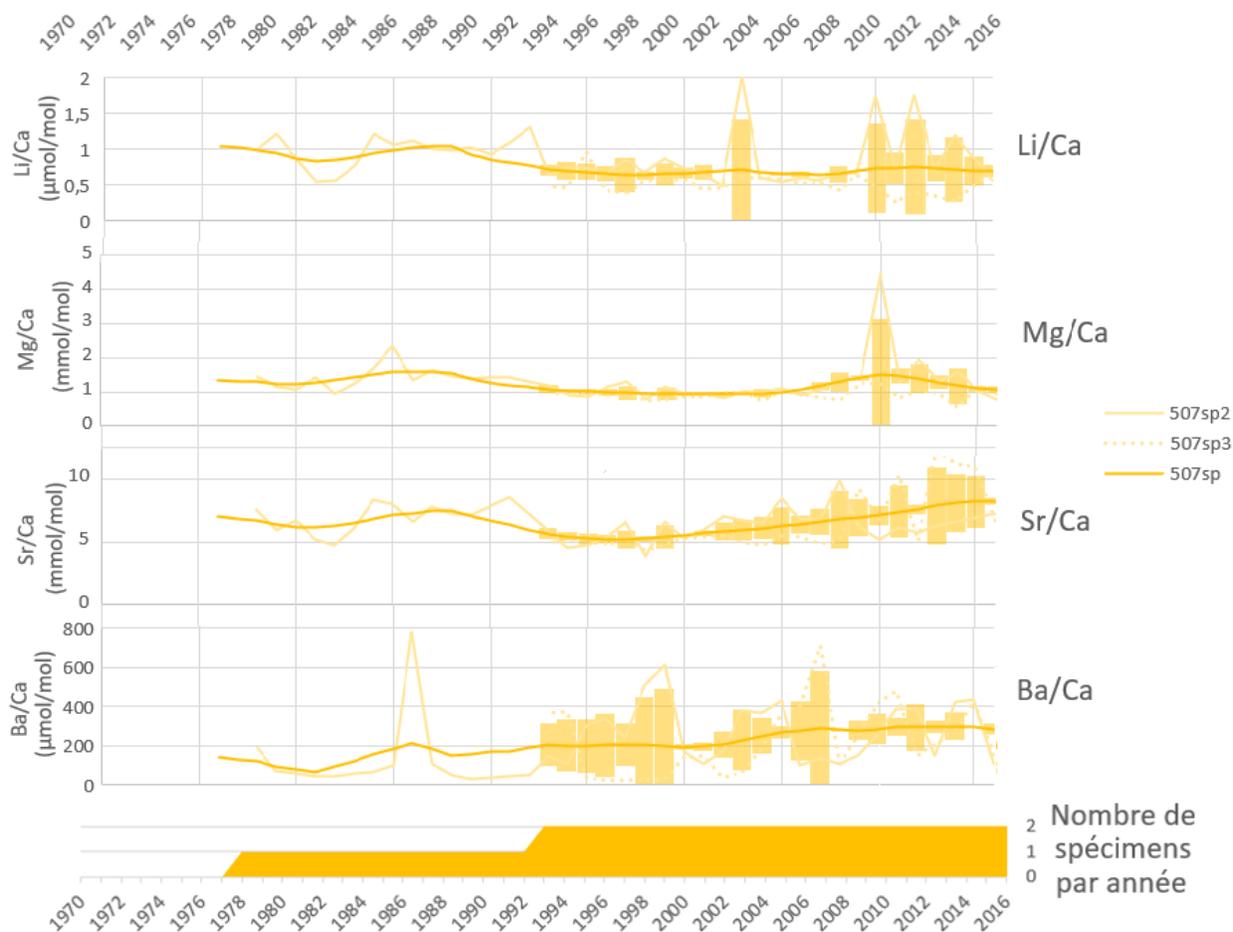


Figure 7. Résultats d'analyses élémentaires au site 507 par rapport à l'âge en année CE. (a) rapport Li/Ca, (b) rapport Mg/Ca, (c) Sr/Ca, (d) Ba/Ca, (e) nombre de spécimens analysés. La courbe en gras présente une moyenne mobile sur cinq ans des résultats et les traits fins représentent les valeurs annuelles dans chaque spécimen individuel. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les courbes 300c, 418c et 615c représentent les données des spécimens d'*Astarte crenata*. Les courbes 300sp, 507sp et 615sp représentent les données des spécimens d'*Astarte* sp.

Le rapport Li/Ca est de 0,769 à 1,04 μmol/mol (moyenne de 0,92 μmol/mol) jusqu'en 1992. Ensuite, le rapport dans les 2 échantillons est assez faible ($0,686 \pm 0,029$ μmol/mol) avec un écart considérable entre les deux spécimens au cours de certains intervalles.

Les rapports Mg/Ca présentent deux pics, l'un autour de 1986 et l'autre en 2010. Le pic autour de 1986 est aussi marqué pour trois autres éléments, particulièrement dans le rapport Ba/Ca.

Les rapports Sr/Ca augmentent de façon régulière entre 1996 et 2016, de 5 à 10 mmol/mol. Après 1996, les valeurs moyennes suivent une tendance à la hausse jusqu'en 2016.

Les rapports Ba/Ca augmentent de 69 à 300 $\mu\text{mol/mol}$ entre 1981 et 2016, avec un plateau notable à 200 $\mu\text{mol/mol}$ entre 1993 et 2000, soit après le début des mesures du second spécimen.

4.2.4 Site 615 (615 m)

Au site 615, un spécimen d'*Astarte crenata* et trois spécimens d'*Astarte* sp. ont fait l'objet de mesures. Tel qu'illustré sur la Figure 5, l'ensemble des échantillons couvre de 1949 à 2016, mais l'intervalle de 1963 à 2016 permet de vérifier la reproductibilité environnementale

des mesures sur plusieurs échantillons contemporains.

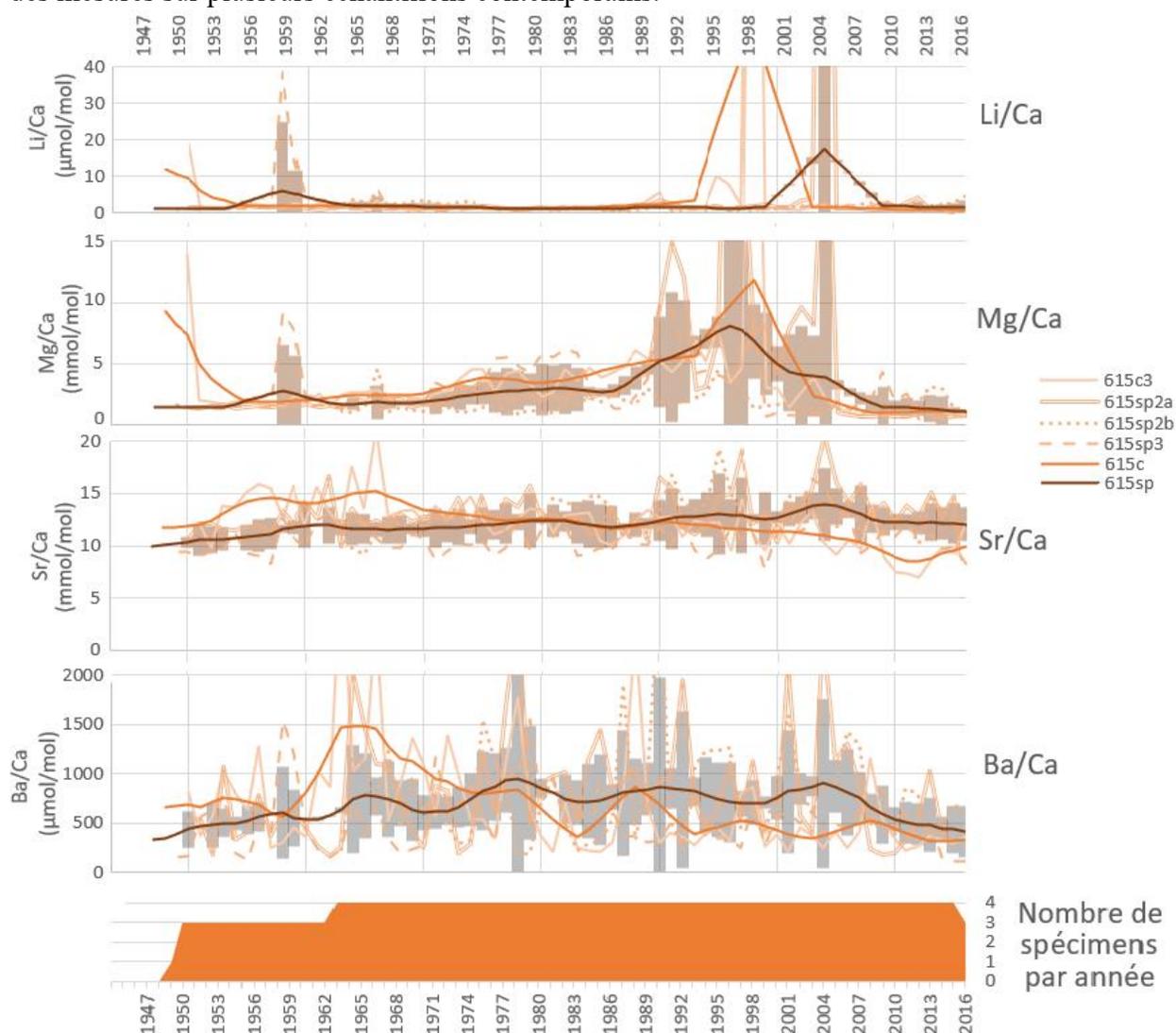


Figure 8. Résultats d'analyses élémentaires au site 615 par rapport à l'âge en année CE. (a) rapport Li/Ca, (b) rapport Mg/Ca, (c) Sr/Ca, (d) Ba/Ca, (e) nombre de spécimens analysés. La courbe en gras présente une moyenne mobile sur cinq ans des résultats et les traits fins représentent les valeurs annuelles dans chaque spécimen individuel. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les courbes 300c, 418c et 615c représentent les données des spécimens d'*Astarte crenata*. Les courbes 300sp, 507sp et 615sp représentent les données des spécimens d'*Astarte* sp.

À l'exception des années 1958, 1998 et 2004, les rapports Li/Ca sont peu variables et se maintiennent autour de 1,5 $\mu\text{mol/mol}$.

Les rapports Mg/Ca augmentent graduellement à partir de 1955, jusqu'à environ 1995. Après 1995, une baisse rapide ramène les valeurs moyennes au niveau de 1955 (environ 1,5 mmol/mol).

Les rapports Sr/Ca de 615c suivent une tendance à la baisse de 1965 à 2016, en opposition aux valeurs moyennes de 615sp qui suivent une tendance à la hausse de 1950 à 2005. Cependant, les deux courbes ont des valeurs très semblables (12 ± 1 mmol/mol).

Les rapports Ba/Ca montrent une variation qui pourrait être cyclique, mais les courbes 615c et 615sp ne sont pas parfaitement synchronisées.

4.3 Comparaison des résultats obtenus aux 4 sites

Les résultats obtenus sur l'ensemble des sites font ici l'objet de comparaison pour vérifier la cohérence des variations observées et leur caractère local ou régional.

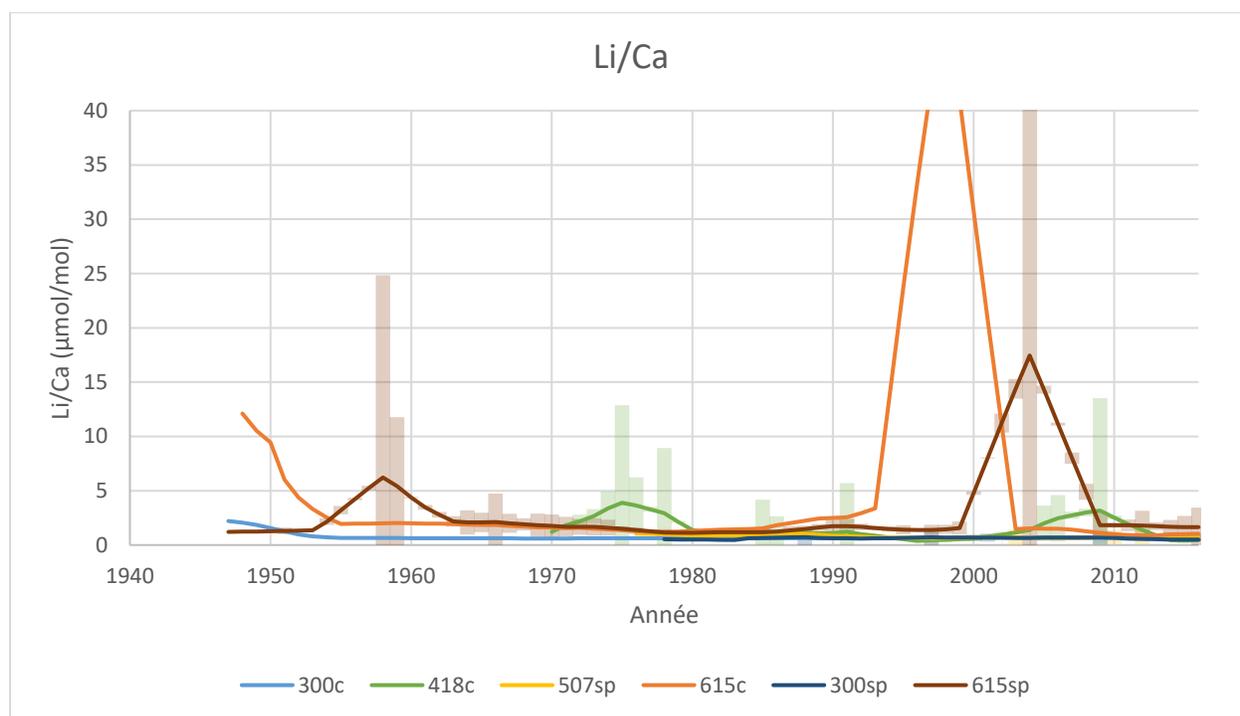


Figure 9. Rapport Li/Ca dans les coquilles des 4 sites échantillonnés. La courbe en gras est une moyenne mobile sur cinq ans. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les données de la figure sont présentées dans l'annexe (Tableau A).

Les rapports Li/Ca des échantillons aux sites 300 et 507 présentent peu de variations et sont très similaires. Le site 418 présente plusieurs pics, les deux plus importants se situant autour de 1975 et 2009. Ils représentent des signaux annuels isolés. En dehors de ces maxima, le rapport Li/Ca des échantillons au site 418 est semblable à celui des sites 300 et 507. Les coquilles du site 615 enregistrent 2 large pics avant et après 2000. Ces pics proviennent de deux échantillons différents et ne sont pas synchrones.

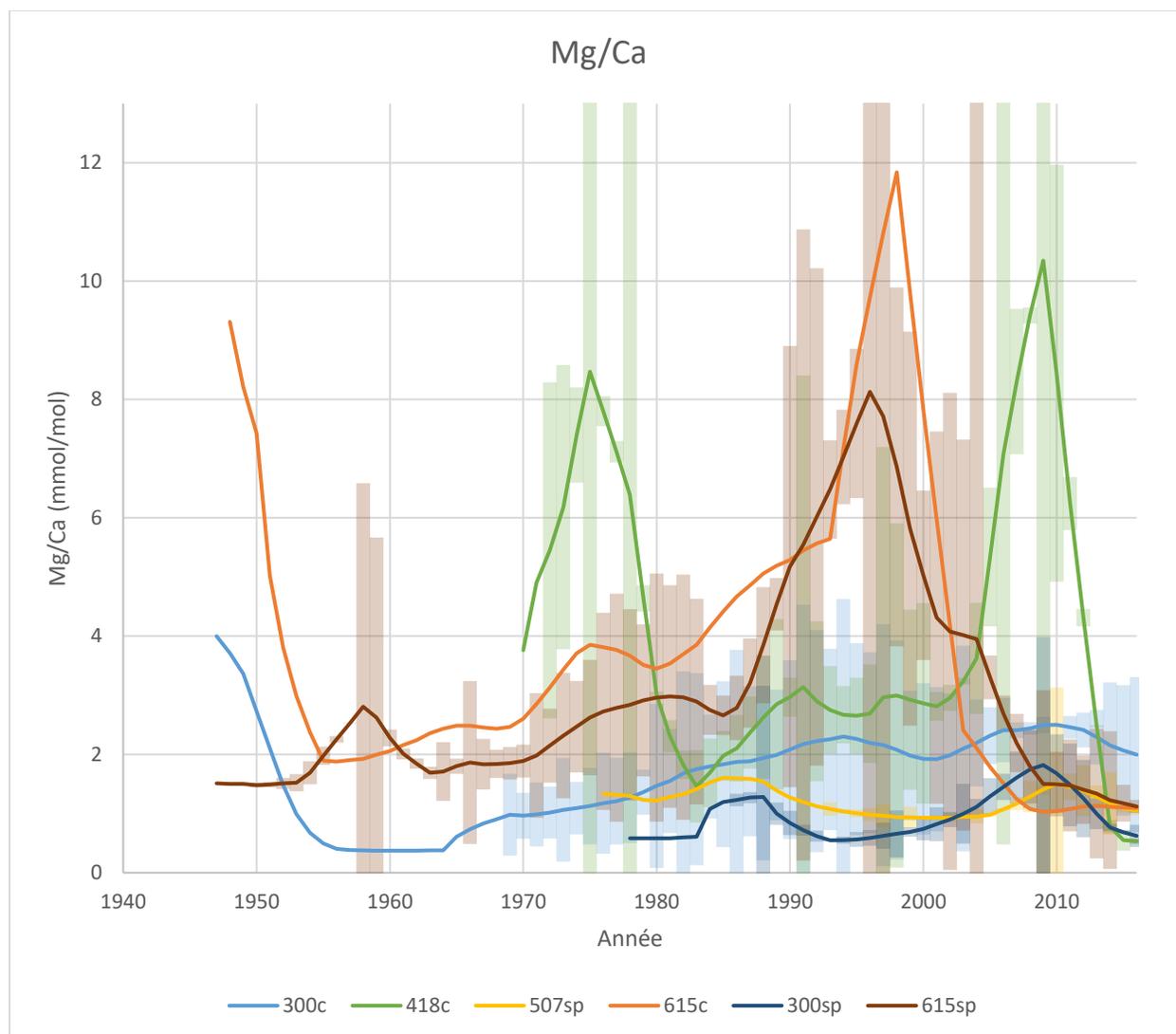


Figure 10. Rapport Mg/Ca dans les coquilles des 4 sites échantillonnés. La courbe en gras est une moyenne mobile sur cinq ans. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les données de la figure sont présentées dans l'annexe (Tableau B).

Les rapports Mg/Ca sont semblables dans les coquilles des sites 300 et 507 (0,5 à 4 mmol/mol), montrant des variations de faible amplitude et un maximum ténu autour de 2010. Aux sites 418 et 615, le rapport Mg/Ca est en moyenne plus élevé, de 1 et 0,5 mmol/mol, respectivement. Les échantillons du site 418 présentent en outre deux maxima, autour de 1975 et de 2009, dans les mêmes incréments que les pics du rapport Li/Ca. Les échantillons du site 615 enregistrent par ailleurs un maximum prononcé de 1990 à 2000 dans les différentes coquilles.

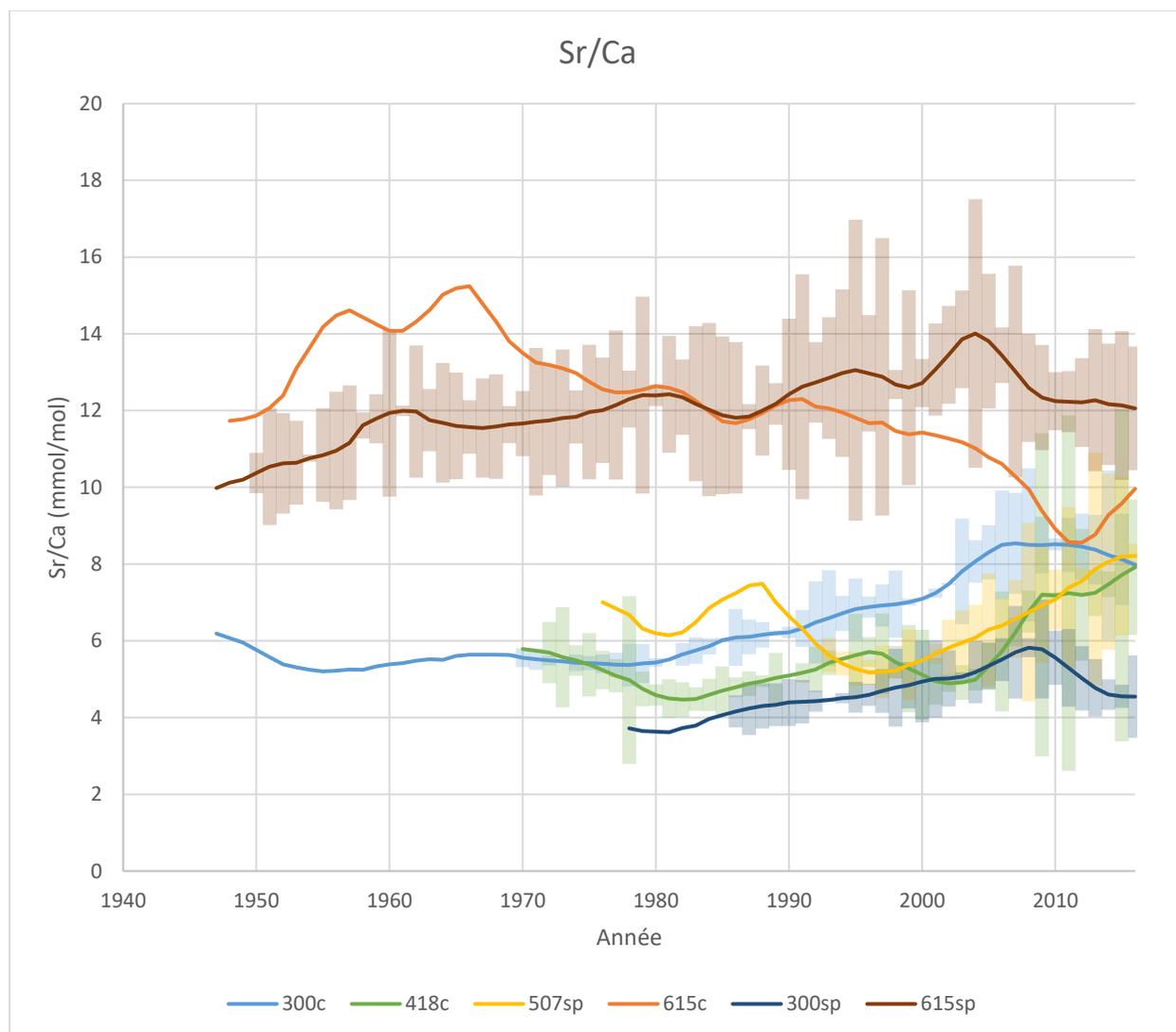


Figure 11. Rapport Sr/Ca dans les échantillons des 4 sites d'étude. La courbe en gras est une moyenne mobile sur cinq ans. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les données de la figure sont présentées dans l'annexe (Tableau C).

Les rapports Sr/Ca des sites 300, 418 et 507 sont très similaires, en termes de tendance et de valeurs. Les rapports augmentent entre 1980 et 2016, avec une exception au site 300 où les valeurs baissent autour de 2010. Le site 615 se démarque des trois autres sites avec des valeurs de rapport Sr/Ca plus élevées, autour de 12 mmol/mol, tandis que les valeurs aux sites 300, 418 et 507 se chevauchent entre 4 et 8 mmol/mol. Avant 2005, aucun des signaux individuels des sites 300, 418 et 507 n'atteint le même niveau qu'au site 615, mais il semble y avoir chevauchement après 2005, alors que les courbes du site 615 tendent à la baisse.

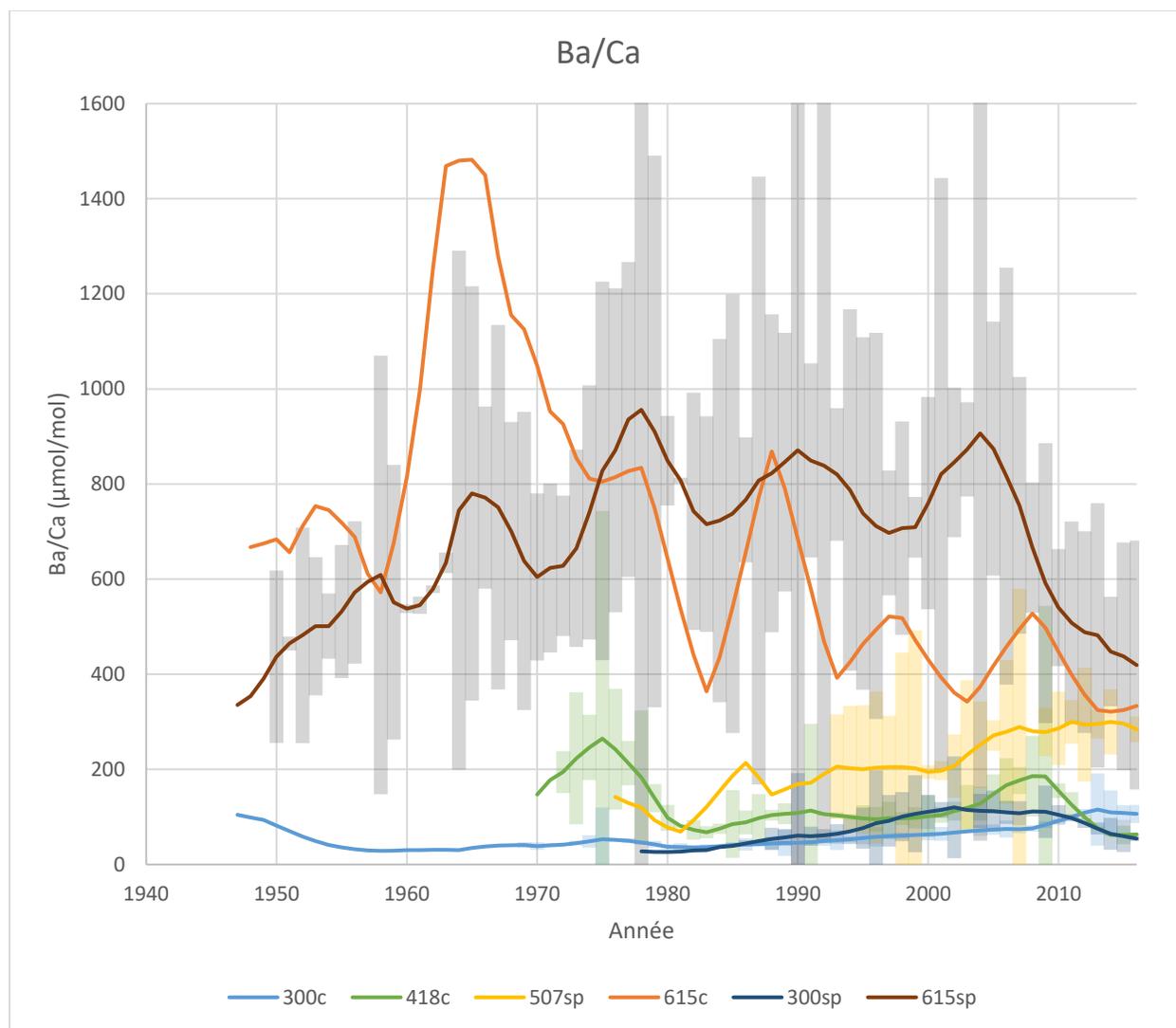


Figure 12. Rapport Ba/Ca dans les coquilles des 4 sites échantillonnés. La courbe en gras présente une moyenne mobile sur cinq ans. La zone ombragée correspond à l'écart-type (1 sigma). Les données de la figure sont présentes dans l'annexe (Tableau D).

Les rapports Ba/Ca des sites 300 et 418 sont similaires, autour de 60 à 100 µmol/mol. Cependant, la tendance au site 300 se rapproche davantage de celle du site 507. Les deux sites présentant en effet une augmentation graduelle après 1980, même si les rapports au site 507 sont plus élevés, se situant en moyenne au-dessus de 200 µmol/mol. Tous les sites montrent une tendance à la baisse ou neutre entre 2010 et 2016 (le site 507 atteint un plateau autour de 280 µmol/mol). Le site 615 se démarque des trois autres avec des valeurs moyennes de Ba/Ca plus élevées tout au long de la période analysée, généralement entre 300 et 900 µmol/mol. Les coquilles 615c et 615sp ne semblent pas complètement synchronisés, avec des pics opposés autour de 1958, 1998 et 2004. Les deux courbes de 615 semblent suivre une tendance à la baisse à partir de 1990 et ont des valeurs moyenne relativement basse en 2016. Le site 418 enregistre des pics ponctuels autour de 1975 et 2009.

5. Discussion

5.1 Vitesse de croissance et rapport strontium/calcium

De nombreux paramètres peuvent avoir influencé la vitesse de croissance des spécimens analysés, notamment les conditions physico-chimiques du milieu (température, salinité, courants) et les flux de matière organique. Les sites d'échantillonnages sont localisés dans un même secteur, mais à des profondeurs différentes. Les spécimens avec la vitesse de croissance la plus faible proviennent du site 615, qui est le plus profond. La profondeur de chaque site pourrait donc avoir une incidence sur les vitesses de croissance. La baie de Baffin est en effet caractérisée par une forte stratification des masses d'eaux avec des gradients prononcés de température et de salinité selon la profondeur (Azetsu-Scott et al., 2010), ainsi que par une faible profondeur de saturation de l'eau de mer vis-à-vis l'aragonite (200 à 500 m; e.g. Azetsu-Scott et al., 2010), soit le minéral composant la coquille du genre *Astarte*. Toutefois, même si le site 615 se démarque par de faibles vitesses de croissance, il ne semble pas y avoir de relation univoque entre la vitesse de croissance moyenne aux autres sites et la bathymétrie, tel qu'illustré sur la figure 13.

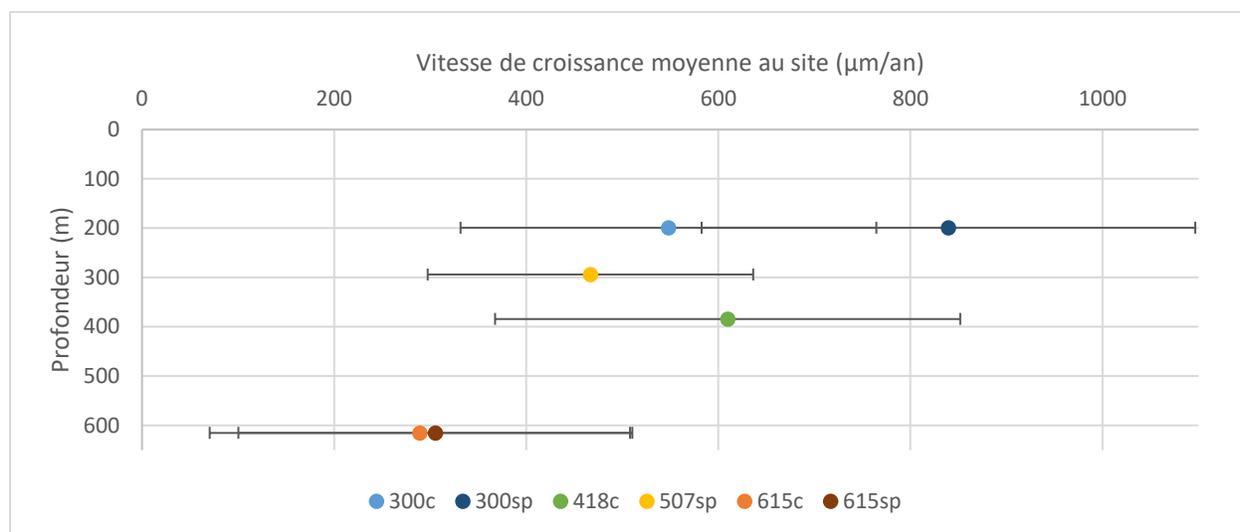


Figure 13. Vitesse de croissance moyenne et écart-type (1 sigma) par rapport à la profondeur de chaque site.

Le site 615, où sont enregistrés les plus faibles vitesses de croissance, est aussi le site le plus septentrional, qui se caractérise par un couvert de glace de mer particulièrement dense. Lorsqu'on examine la vitesse de croissance par rapport à la concentration moyenne annuelle du couvert de glace de mer (Figure 14), on observe une relation inverse. Ceci tend à indiquer une croissance d'autant plus faible que la saison de productivité estivale est courte. On pourrait donc inférer une relation entre l'étendue saisonnière de glace de mer, la productivité pélagique, les flux de carbone et les vitesses de croissance des bivalves. La relation est significative ($r^2 = 0,2167$, $n = 293$, $p\text{-value} = 3,68017E-17$) lorsque l'on considère l'ensemble des sites.

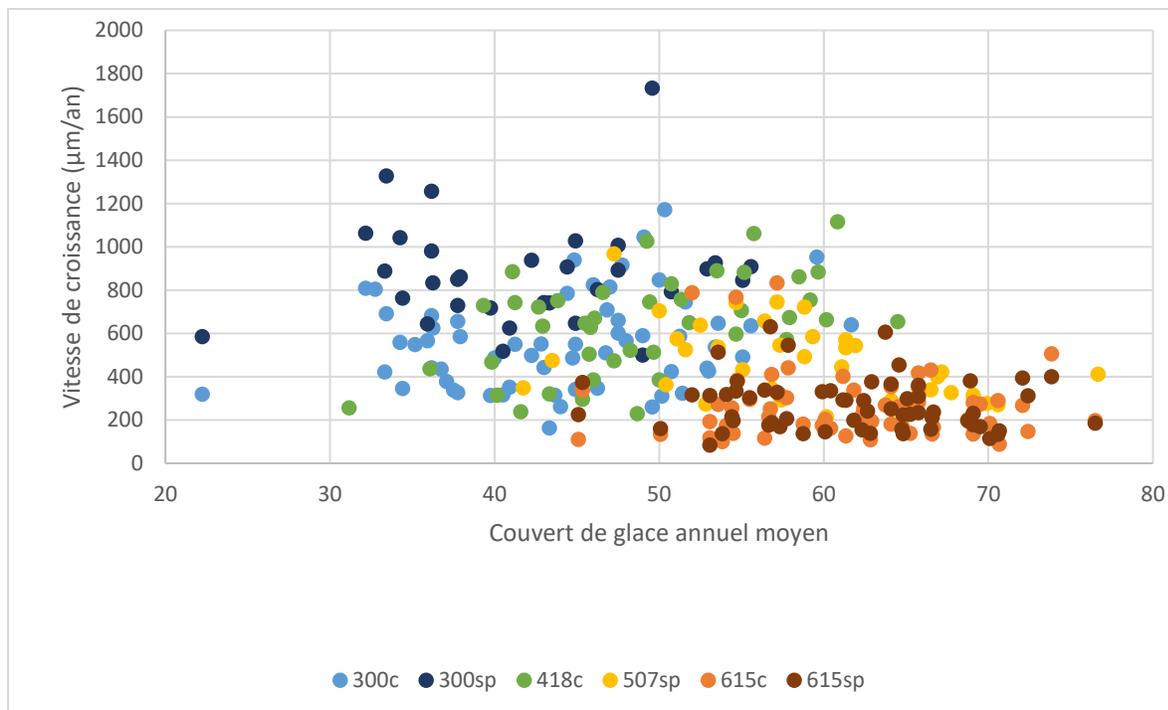


Figure 14. Vitesse de croissance par rapport à la concentration moyenne annuelle du couvert de glace de mer aux sites d'études ($n = 293$). La vitesse de croissance est issue de nos mesures et le couvert de glace annuel provient de données du *National Snow and Ice Data Center*, tel que compilé par Walsh et al. (2019). À noter qu'il n'y pas de relation pour les données de chaque site, mais qu'une relation inverse est perceptible lorsque les données de tous les sites sont prises en compte.

De manière générale, la vitesse de croissance des bivalves peut avoir un impact sur la composition géochimiques des coquilles (Stecher et al., 1996) ainsi que sur leur composition isotopique (Carroll et Romanek, 2008).

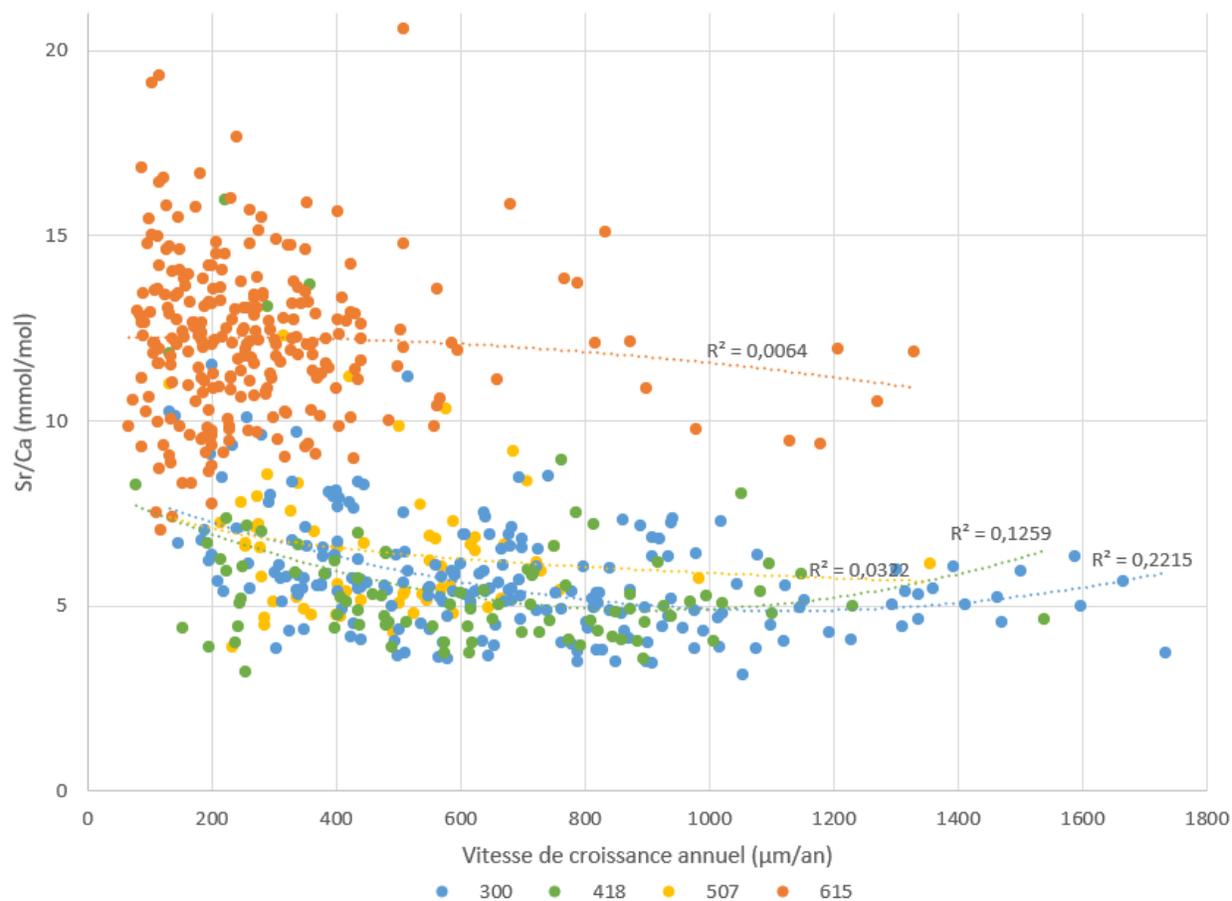


Figure 15. Rapports Sr/Ca (mmol/mol) dans les coquilles d'*Astarte* par rapport aux vitesses de croissance estimé à partir de la largeur des incréments. Les lignes pointillées représentent les meilleures relations pour chaque site et r^2 représente le coefficient de corrélation. Le nombre de points de mesure est de 213 pour le site 300, 90 pour le site 418, 63 pour le site 507 et 255 pour le site 615. Le coefficient de corrélation pour l'ensemble des points est 0,3608.

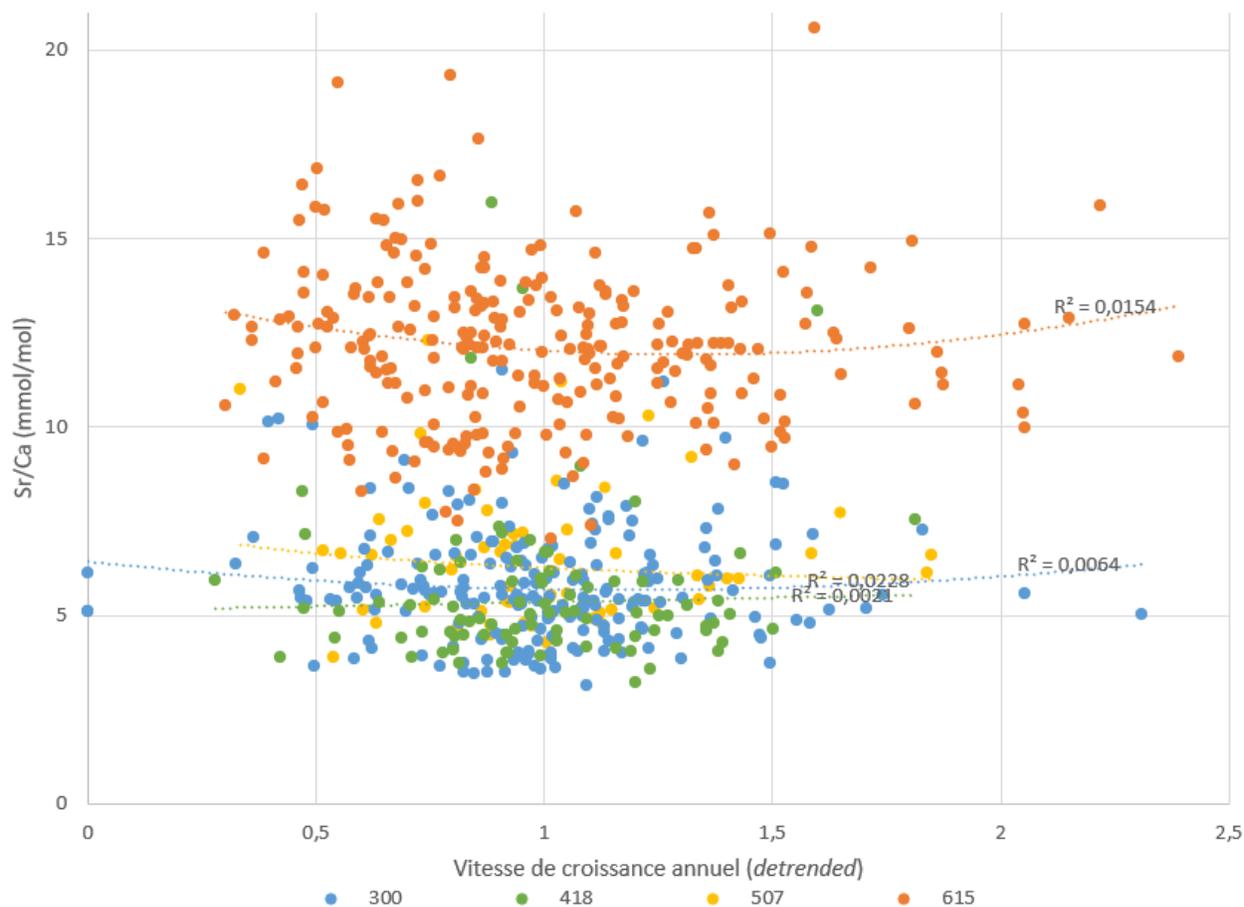


Figure 16. Rapports Sr/Ca dans les coquilles d'*Astarte* par rapport à la vitesse de croissance après l'élimination de la composante tendancielle avec le package dplR pour le logiciel de programmation R (Bunn, 2010). Les lignes pointillées représentent la meilleure relation pour chaque site et r^2 représente le coefficient de corrélation. Le nombre de points de mesure est de 213 pour le site 300, 90 pour le site 418, 63 pour le site 507 et 255 pour le site 615. Le coefficient de corrélation r^2 pour l'ensemble des points est 0,03.

Le rapport Sr/Ca a déjà été utilisé comme indicateur de la vitesse de croissance (Sinclair et al. 2011). Les résultats obtenus indiquent une corrélation significative entre le rapport Sr/Ca et l'épaisseur des incréments de croissance à deux des sites (300 : $n=213$, $p\text{-value}=4,76918\text{E}-09$; 418 : $n=90$, $p\text{-value}=0,0069$ et aucune corrélation aux deux autres sites (507 : $n=63$, $p\text{-value}=0,32$; 615 : $n=255$, $p\text{-value}=0,266$).

Les rapports Sr/Ca sont pour la plupart compris entre 3 et 9 mmol/mol sauf au site 615 où ils sont en moyenne entre 10 et 15 mmol/mol (voir Figure 4). Il s'agit aussi du site où les incréments de croissances sont les plus minces.

Lorsqu'on impose une courbe à l'ensemble des incréments de chaque coquille, plutôt qu'à chaque site d'échantillonnage, la relation devient encore plus significative ($n=621$, $p\text{-value}=1,1668\text{E}-49$) Cela suggère que sur un grand nombre de coquilles et à différents sites, il peut y avoir une relation entre le rapport Sr/Ca et la vitesse de croissance (Sinclair et al., 2011), même

si elle ne peut être utilisée de façon univoque pour un nombre restreint de coquille et à un site en particulier.

La figure 16 montre les vitesses de croissance après l'élimination de la composante tendancielle. Toutefois, le potentiel discriminant de la fonction *detrend* est peut-être diminué puisque les premiers incréments de croissance de la plupart de nos échantillons sont manquants, dû à l'érosion fréquente de l'umbo des spécimens (voir Planche 1 et 2).

Un autre facteur qui peut influencer la croissance des bivalves est la turbidité. Plusieurs études (e.g. Epplé et al. 2006; Stott et al. 2010) mentionnent l'impact direct que peut avoir la turbidité sur les bivalves vivant en eaux peu profondes (<20m). Les changements environnementaux comme la turbidité peuvent causer des perturbations dans la croissance des bivalves qui sont directement touchés par les flux de turbulence (Goewert & Surge, 2008). La turbidité peut également affecter les bivalves indirectement, via leur source d'alimentation. En effet, la turbidité a un impact direct sur les populations de phytoplancton dont se nourrissent les bivalves (Thompson et al. 2008).

5.2 Température et rapport magnésium/calcium

La sclérochronologie, et en particulier les rapports Mg/Ca ont souvent été utilisés comme traceurs des températures du milieu aquatique dans lequel l'organisme précipite le carbonate de calcium. Le rapport Mg/Ca des coraux, se développant dans des environnements stables et peu turbulents, fournit des informations sur les paléotempératures (e.g. Sinclair et al., 2011). Toutefois, la relation entre le rapport Mg/Ca et la température serait équivoque chez les bivalves. Des études illustrent une relation positive entre le rapport Mg/Ca de plusieurs espèces de bivalves et la température de calcification, notamment pour *Mytilus trossulus* (Klein et al., 1996a, b), *Pinna nobilis* (Freitas et al., 2005), *Mytilus edulis* (Vander Putten et al., 2000). Cependant, la relation chez les bivalves n'est pas toujours cohérente et peut varier d'une espèce à l'autre (Marali et al. 2017b) ou d'une période à une autre. Freitas et al. (2006), par exemple, ont étudié des bivalves de l'espèce *Pecten maximus* dans un détroit au large du Royaume-Uni, et ont observé un changement dans la relation entre la température et le rapport Mg/Ca, selon le moment de l'année : la relation serait proportionnelle entre mai et septembre, mais inversement proportionnelle entre octobre et avril. Selon Wanamaker et al. (2008b), la relation entre la température de l'eau et la composition élémentaire des coquilles de *Mytilus edulis* est très faible. Il y a aussi une incertitude considérable qui porte à croire que le rapport Mg/Ca pourrait être utile seulement si les changements de température sont très larges.

Lorens & Bender (1977) notent que le taux de magnésium dans la coquille de *Mytilus edulis* peut être affecté par l'activité physiologique. En effet, *M. edulis* tend à exclure physiologiquement le magnésium lors de la fabrication de sa coquille, mais lorsque l'environnement ambiant présente un taux anormalement élevé en magnésium, les systèmes régulateurs de l'organisme perdent de leur efficacité, causant une augmentation substantielle de magnésium dans la calcite de la coquille.

Plusieurs autres études concluent que le ratio Mg/Ca dans les coquilles de bivalves ne se corrèle pas avec la température ni avec d'autres facteurs environnementaux (Vander Putten et al.,

2000; Freitas et al., 2006 & 2008; Izumida et al., 2011; Marali et al., 2017b). En fait, beaucoup de facteurs autres que la température peuvent intervenir. Par exemple, dans les constructions biogéniques carbonatées, tels les coquilles de foraminifères, le rapport Mg/Ca serait influencé par le pH (Lea et al., 1999; Russell et al., 2004) et la salinité (Nurnberg et al. 1996a, b; Lea et al., 1999).

Ici, dans le cadre de notre étude, certaines données nous portent à croire que des relations peuvent être établies entre la température et le rapport Mg/Ca. On observe en effet les rapports Mg/Ca moyens plus élevés au site 615 qu'aux autres sites, ce qui est compatible avec la thermocline inversée qui caractérise souvent les milieux arctiques et la baie de Baffin en particulier (Tang et al., 2004; Figure 17).

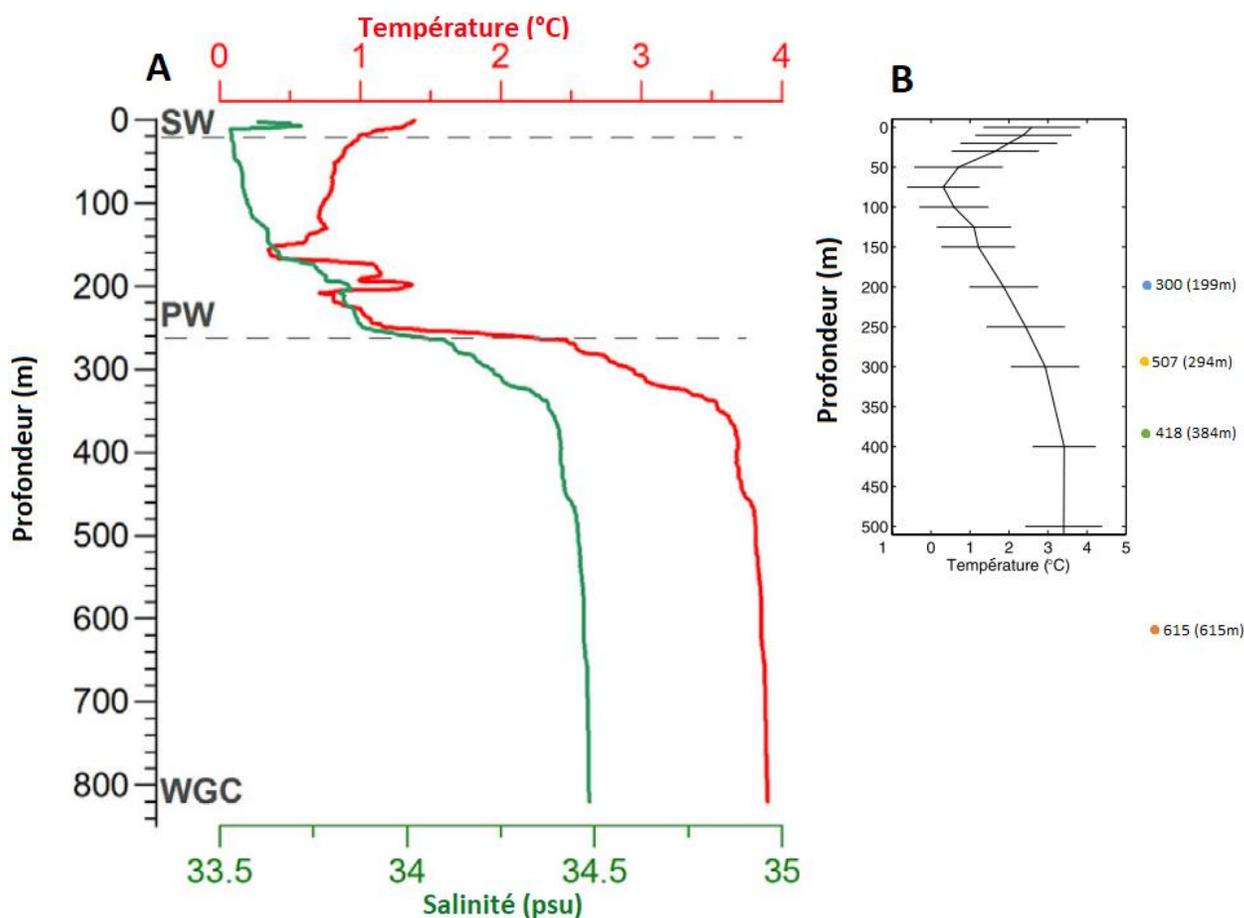


Figure 17. Profil de température moyenne selon la profondeur; A. À la sortie de la baie de Disko en juillet 2007. Les masses d'eau illustrées sont les eaux de surface (SW), les eaux polaires (PW) et le courant Ouest-Groenlandais (WGC) (Figure tirée de Moros et al. 2016); B. Dans la partie est du Détroit de Davis en juillet, de 1950 à 2000. Les données ont été prises dans une région de 50 km par 50 km, centrée à 66.67°N, 56.68°W (Figure tirée de Tang et al., 2004); Des points ont été rajouté à la droite de la figure pour indiquer la profondeur de nos sites d'échantillonnage.

Les données de la figure 17 proviennent d'une large région située juste au sud de nos sites d'échantillonnages et représentent une moyenne estivale sur 50 ans. Les eaux de surface, de faible

salinité et gelant en hiver sont très froides, tandis que la masse d'eau en deçà de 200 m est influencée par le courant Ouest Groenlandais qui véhicule des eaux relativement chaudes de l'Atlantique. Les masses d'eaux baignant les marges continentales présentent donc un gradient important de température ayant un impact sur la température de calcification de des mollusques.

Les températures mesurées par Azetsu-Scott et al. (2012) en 2004, dans le secteur du détroit de Davis, montrent certaines différences par rapport à la moyenne (Figure 18). La masse d'eau relativement chaude du courant Ouest Groenlandais y est en effet peu profonde par rapport à la moyenne de 1950 à 2000 (cf. Tang et al. 2004; Figure 17). Un mouvement vertical de la masse d'eau chaude associée au courant Ouest Groenlandais pourrait ainsi expliquer la diminution du rapport Mg/Ca au site 615 après 2000 (Figure 8, 10), qui présente un contraste en comparaison avec le maximum enregistré de 2005 à 2010 au site 418 (Figures 6, 10).

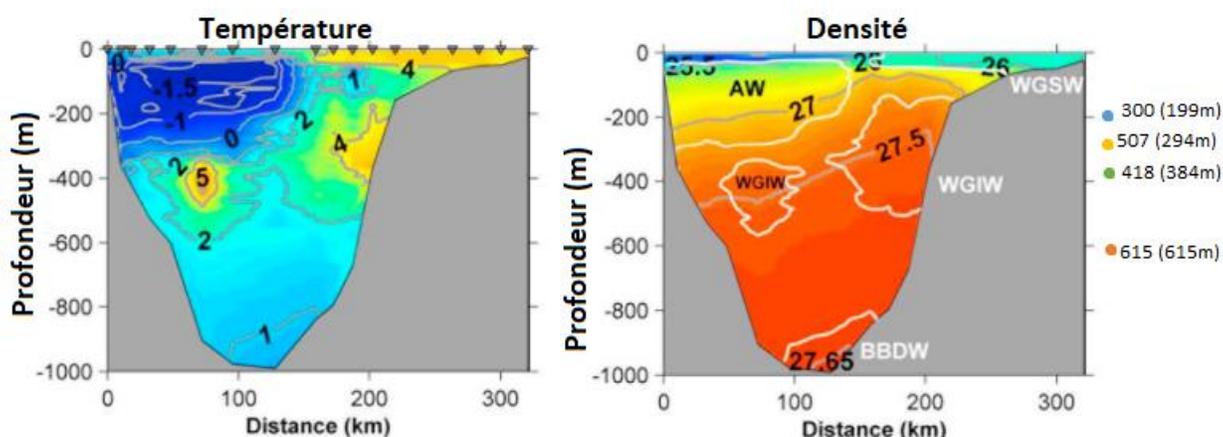


Figure 18. Profils de température et de densité potentielle de l'eau entre l'île de Baffin (gauche) et le Groenland (droite), à la hauteur du Détroit de Davis, pour les mois septembre-octobre en 2004. Le profil de densité montre la position des masses d'eaux : Eaux Arctiques (AW), Eaux de Surface Ouest-Groenlandaise (WGSW), Courant Ouest-Groenlandais/Irminger (WGIW) et Eaux Profondes de la Baie de Baffin (BBDW). La figure est tirée de Azetsu-Scott et al. (2012). Des points ont été rajoutés à la droite de la figure pour indiquer la profondeur de nos sites d'échantillonnage.

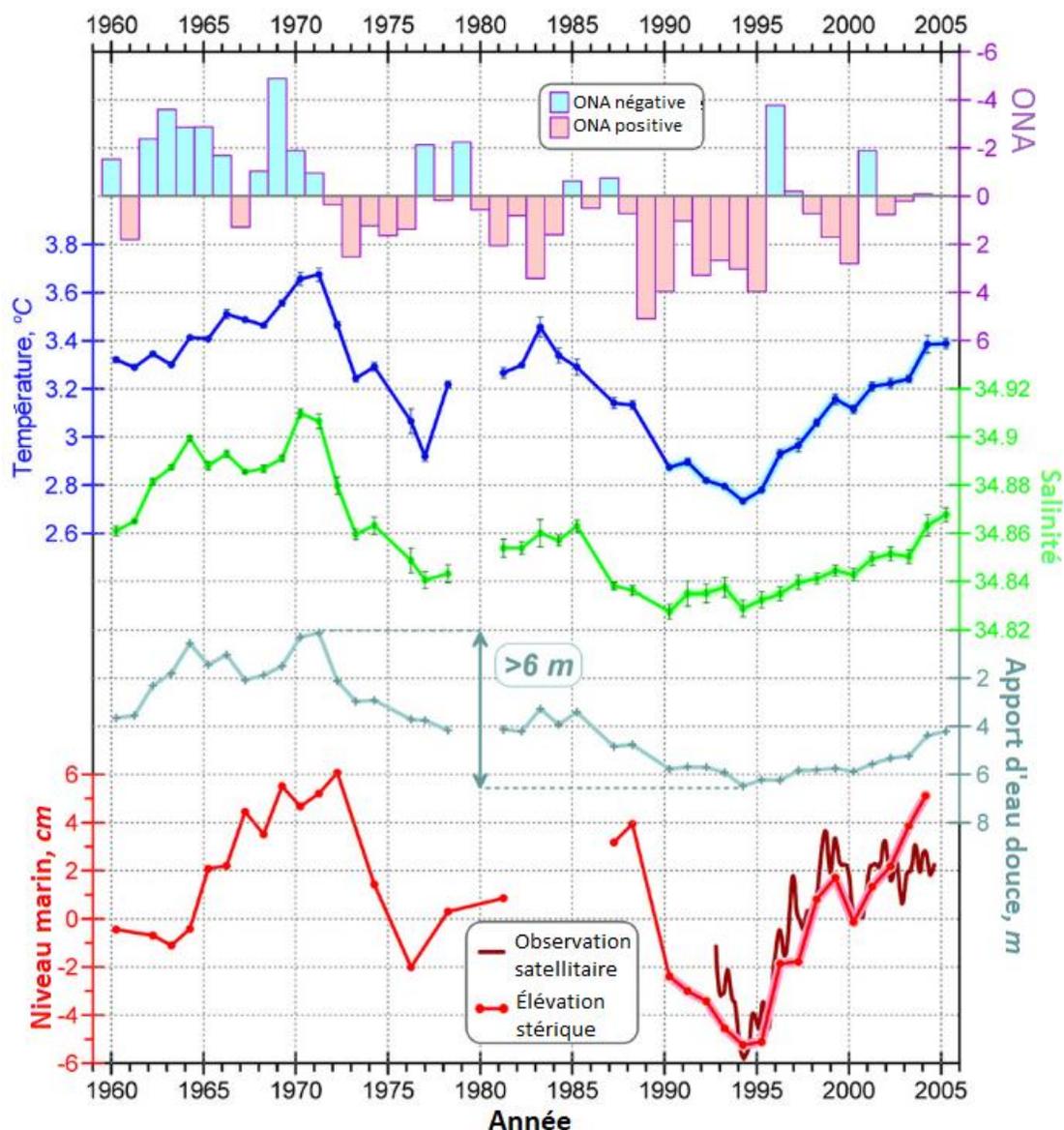


Figure 19. Index de l'Oscillation nord-atlantique (ONA), température, salinité, apport d'eau douce et niveau de la mer dans la Mer du Labrador de 1960 à 2005. Figure tirée de Yashayaev (2007).

Dans la Mer du Labrador, au sud de notre région d'échantillonnage, une diminution des températures a été enregistrée entre 1970 et 1995, suivi par une augmentation graduelle après 1995 (cf. Yashayaev, 2007; Figure 19). Cette tendance est similaire à ce qu'on observe dans le rapport Mg/Ca au site 418, mais contraire de celle observée au site 615 (cf. Figure 20). Le site 418 est localisé au sud de notre région d'étude; sa bathymétrie le positionne dans l'axe du courant Ouest Groenlandais circulant vers le nord de la Mer du Labrador vers la baie de Baffin. Le site 418 serait donc propice à l'enregistrement d'un signal de la Mer du Labrador via le courant Ouest Groenlandais.

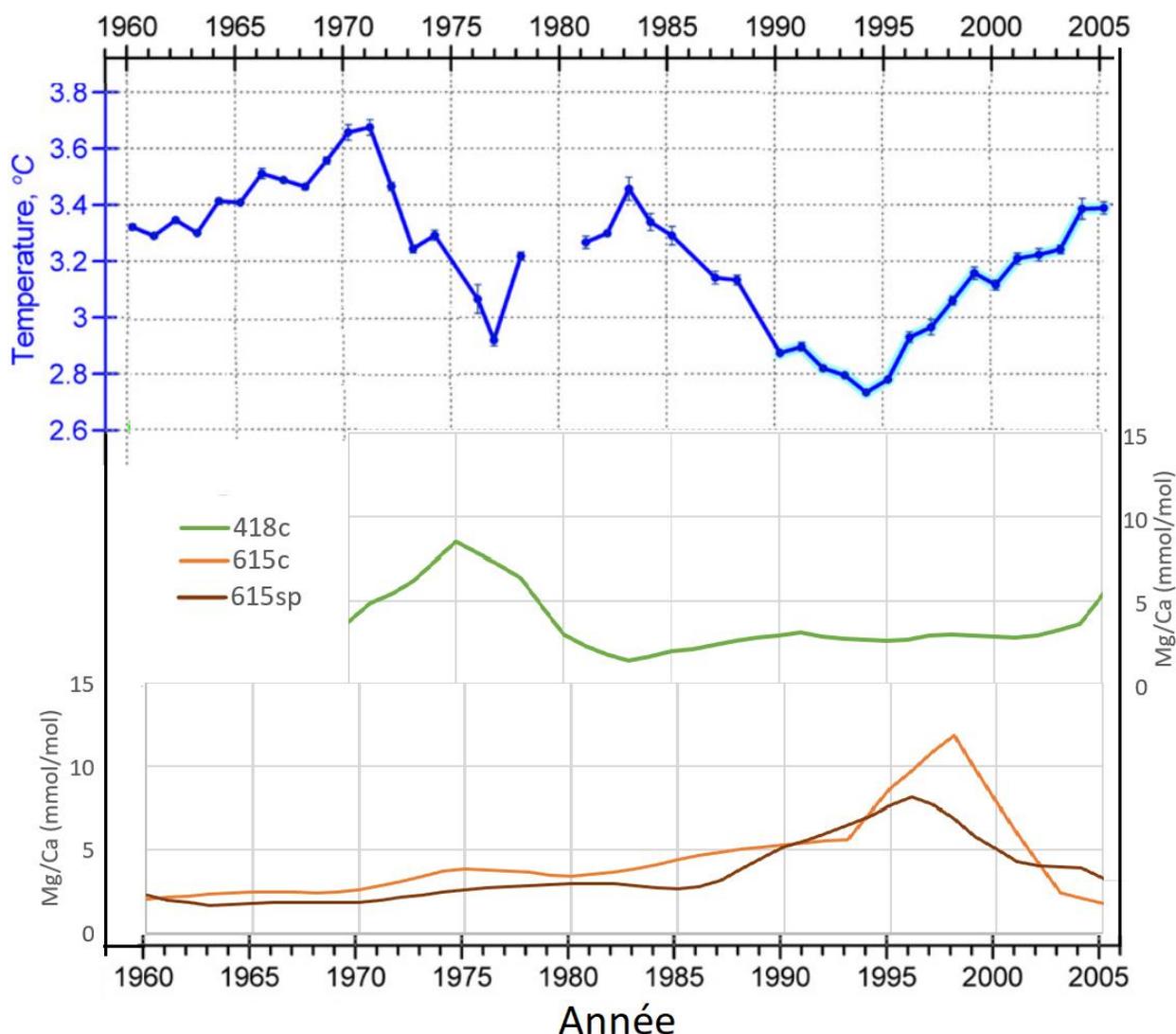


Figure 20. Température dans la Mer du Labrador de 1960 à 2005 (Yashayaev 2007) et rapports Mg/Ca des sites 418 et 615, de 1960 à 2005.

De manière générale, le rapport Mg/Ca du site 615 semble suivre la courbe de l'oscillation Nord Atlantique (ONA) (Figure 21), qui est fortement associée à la température (Yashayaev, 2007; Figure 20). Les gradients de pression lors de périodes d'ONA négative sembleraient être à l'origine de phénomènes de convection dans les eaux de la Mer du Labrador tel qu'illustré à la Figure 22, où la masse d'eau froide des eaux de la Mer du Labrador (LSW) était près de la surface entre 1988 et 1997, période durant laquelle la ONA était fortement positive. L'ONA influence fortement la structure des écosystèmes marins (Carroll et al., 2014). Notamment, Poitevin et al. (2019) notent une corrélation négative entre l'ONA et la croissance de spécimens d'*Arctica islandica* dans la région de Saint-Pierre et Miquelon. En effet, dans cette région, les anomalies négatives de l'ONA amènent des eaux plus chaudes en profondeur (Petrie, 2007), et ces bivalves connaissent donc une croissance plus rapide lorsque les températures ambiantes sont plus élevées. L'ONA a également une relation inversement proportionnelle avec le couvert de glace de mer dans le Nord de

l'Atlantique (Wanner et al., 2001), un facteur important dans la dynamique de production primaire de la baie de Baffin.

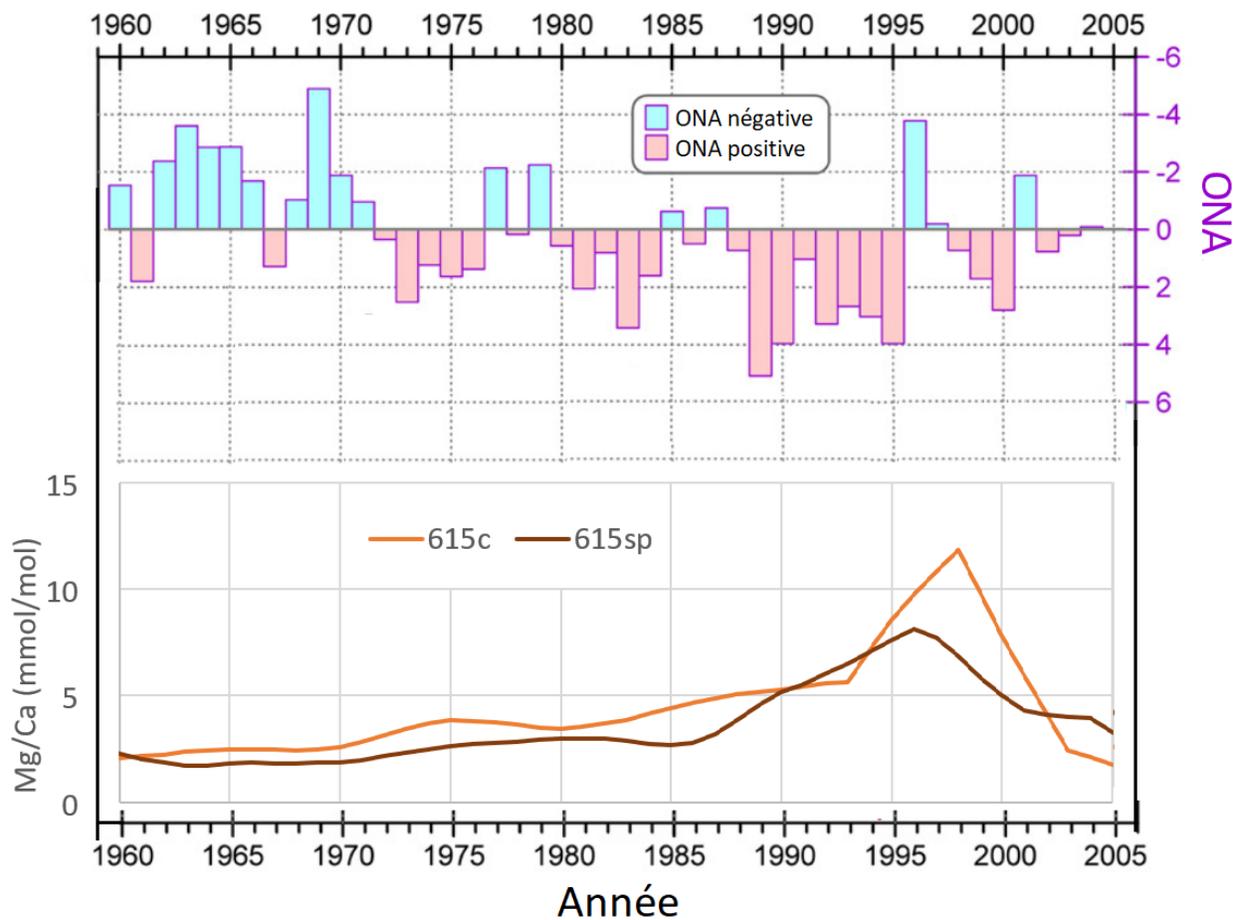


Figure 21. Oscillation Atlantique Nord (Yashayaev 2007) comparée aux rapports Mg/Ca du site 615, de 1960 à 2005.

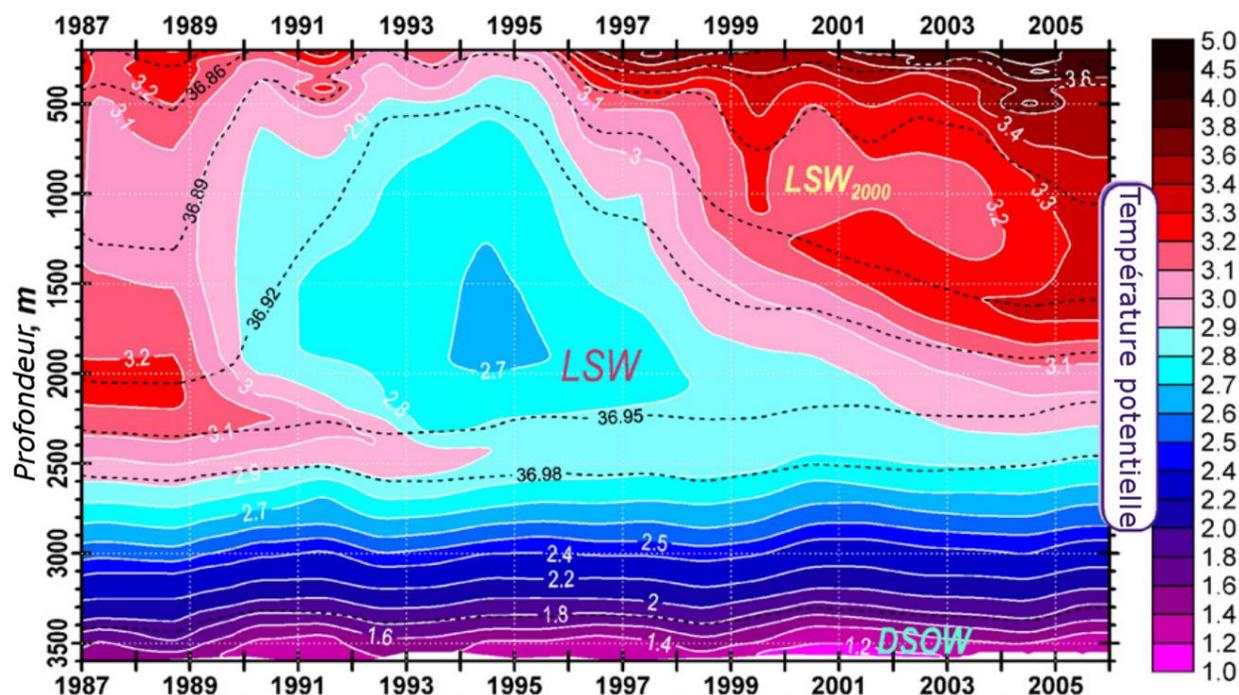


Figure 22. Températures potentielles au centre de la Mer du Labrador de 1987 à 2005. Sur la figure sont identifiées les masses d’eaux suivantes : Eaux de Débordement du Déroit de Danemark (DSOW), Eaux de la Mer du Labrador (LSW) et une nouvelle classe de LSW qui apparaît dans la Mer du Labrador en 2000 (LSW₂₀₀₀). Figure tirée de Yashayaev (2007).

Il y aurait eu une augmentation de la température dans la Mer du Labrador autour des années 2000 (Figures 19 et 22) d’après Yashayaev (2007). Cette augmentation se serait propagée dans la baie de Baffin (Zweng et Münchow, 2006), nous permettant de penser que l’augmentation graduelle du rapport Mg/Ca de nos échantillons peu avant 2000 serait liée à une augmentation de la température des eaux de subsurface (Figure 23), résultant d’une intensification du courant Ouest Groenlandais sous l’effet d’une anomalie positive de l’oscillation Nord Atlantique.

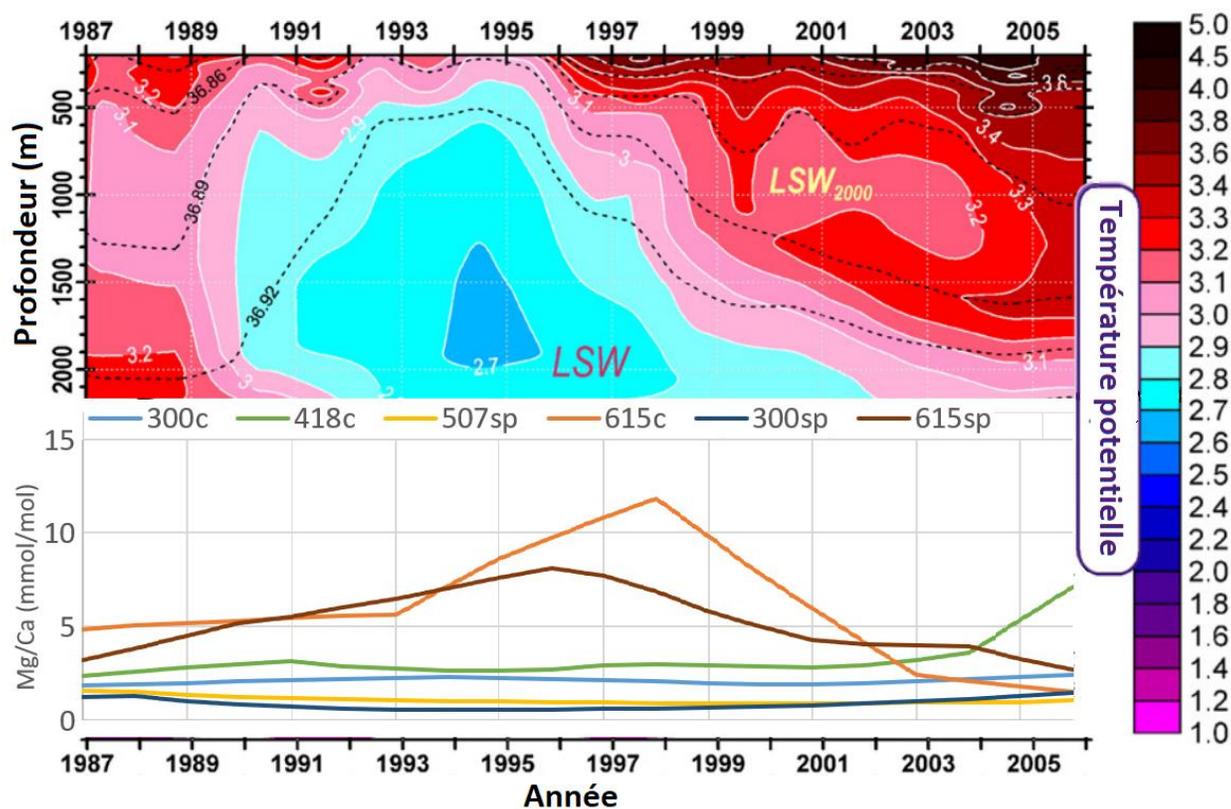


Figure 23. Températures potentielles au centre de la Mer du Labrador (Yashayaev, 2007) comparées aux rapports Mg/Ca des bivalves de la baie de Baffin entre 1987 et 2005.

5.3 Productivité, glace de mer et rapports baryum/calcium

Le rapport Ba/Ca dans les bivalves est souvent associé à la productivité primaire et aux activités métaboliques (Lea & Boyle, 1990; Vander Putten et al., 2000; Carré et al., 2006; Langlet et al., 2007; Carroll & Romanek, 2008; Hatch et al., 2012; Doré et al. 2020). Il est donc intéressant de constater que les spécimens du site 615 ont des rapports de Ba/Ca plus élevés que ceux des autres sites alors qu'ils ont en moyenne une vitesse de croissance plus faible (cf. Figure 24). Dans l'ensemble, il semble même y avoir une relation inverse entre la vitesse de croissance et le rapport Ba/Ca. Cette relation est similaire à ce qui a été observé dans l'étude de Zhao et al. (2017). Selon leur étude, cette relation serait due à l'efficacité de la filtration des éléments mineurs et traces dans le fluide extrapalléal. L'efficacité de sélection augmenterait en lien avec le taux métabolique de l'organisme, qui à son tour serait influencé par la température et la quantité de nourriture disponible. Donc, une plus grande quantité de baryum est incorporé dans la coquille lorsqu'il y a une grande productivité primaire et des basses températures, et une plus petite quantité de baryum est incorporé lorsque la température et le taux métabolique (donc, la vitesse de croissance) augmentent. D'autant plus, lors d'une croissance plus rapide, la quantité de baryum dans le fluide extrapalléal pouvant être incorporé dans la coquille est distribué sur une portion plus large de la coquille, menant à une concentration plus faible dans les sections liées à une formation rapide de coquille. Une hypothèse alternative (également de Zhao et al., 2017) suggère que lorsque le taux

métabolique est plus élevé, un type différent de macromolécules serait produit dans le fluide extrapalléal, excluant plus efficacement le baryum du biominéral.

Il existe aussi l'hypothèse d'un lien avec la salinité (e.g., Macdonald et Crook, 2010).

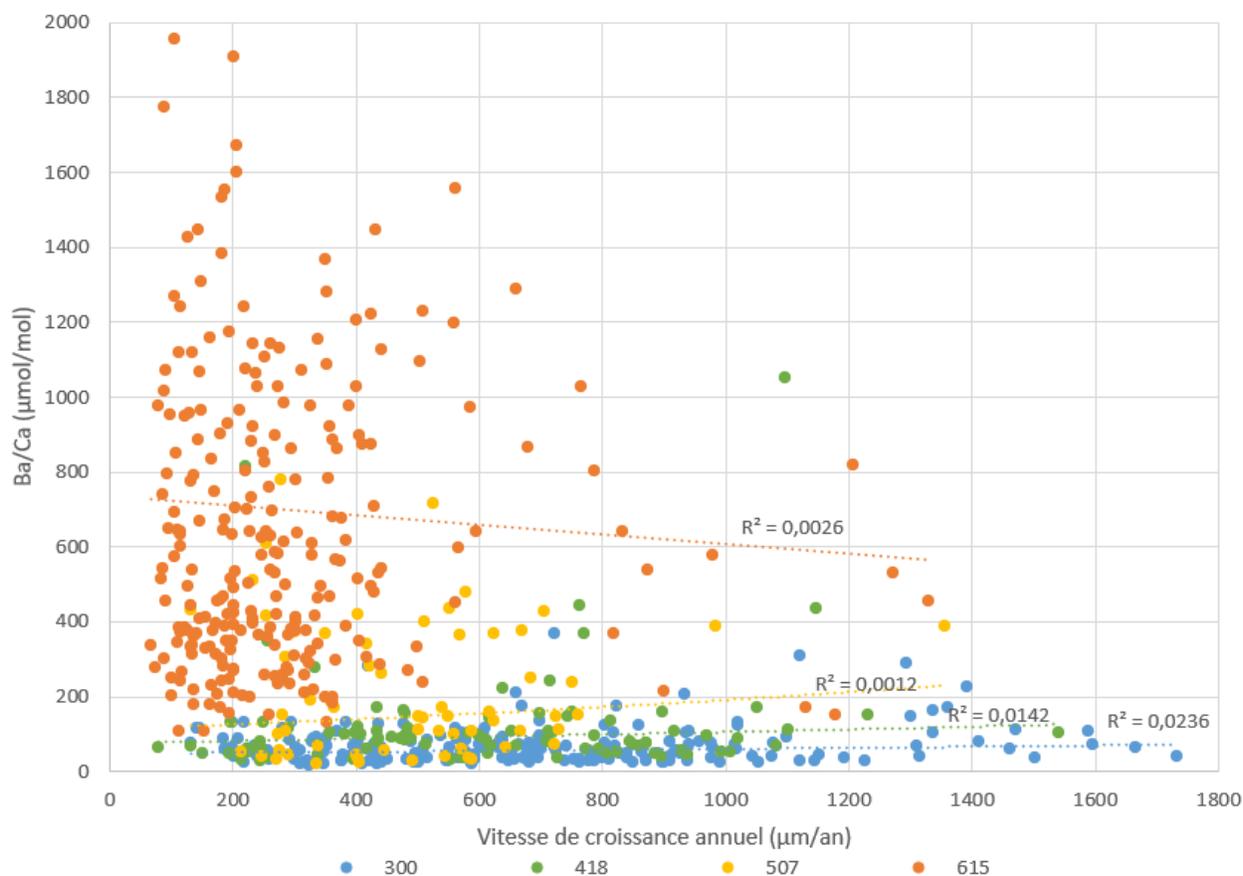


Figure 24. Rapports Ba/Ca dans les coquilles d'*Astarte* par rapport à la vitesse de croissance estimée par la largeur des incréments. Les lignes pointillées représentent la meilleure relation pour chaque site et r^2 représente le coefficient de corrélation. Le nombre de points de mesure est de 213 pour le site 300, 90 pour le site 418, 63 pour le site 507 et 255 pour le site 615. Le coefficient de corrélation pour l'ensemble des points est 0,1688.

En comparant les rapports Ba/Ca avec la concentration annuelle de glace de mer pour l'ensemble des points de mesures aux quatre sites étudiés (Figure 25), on observe une relation inverse. Des rapports Ba/Ca plus élevés semblent ainsi caractériser les incréments correspondant aux sites marqués par un dense couvert de glace de mer. Toutefois, lorsque l'on examine les résultats, site par site, les relations semblent distinctes (Figures 25, 26, 27, 28). Aux sites 300 (Figure 26), 418 (Figure 27) et 507 (Figure 28), situés au sud de la baie de Baffin, il existe une relation faible mais inverse entre le rapport Ba/Ca et la glace de mer qui permet de suggérer un rapport Ba/Ca d'autant plus élevé que la saison libre de glace, favorable à la productivité pélagique, est longue.

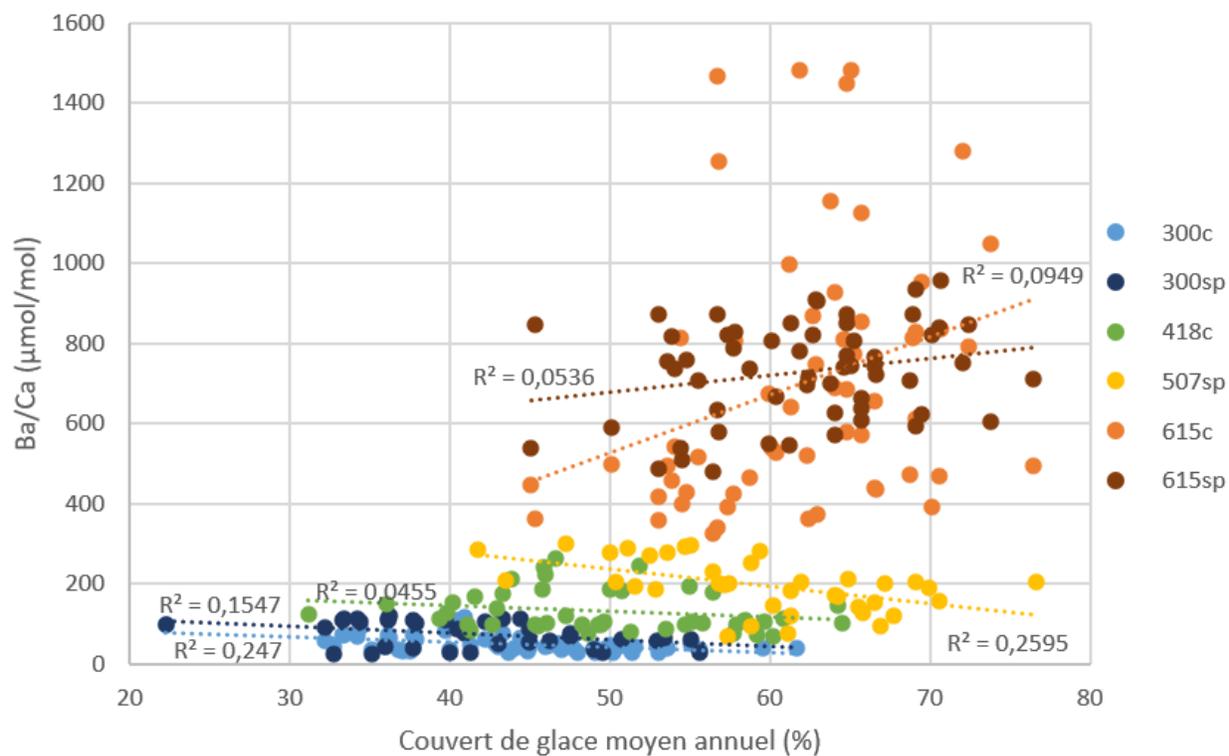


Figure 25. Rapport annuel Ba/Ca (moyenne mobile sur 5 ans) de chaque site et couvert de glace moyen annuel (Walsh et al. 2019). Corrélations : 615c ; $n=61$; $p\text{-value}=0,023$ 615sp : $n=61$, $p\text{-value}=0,020$.

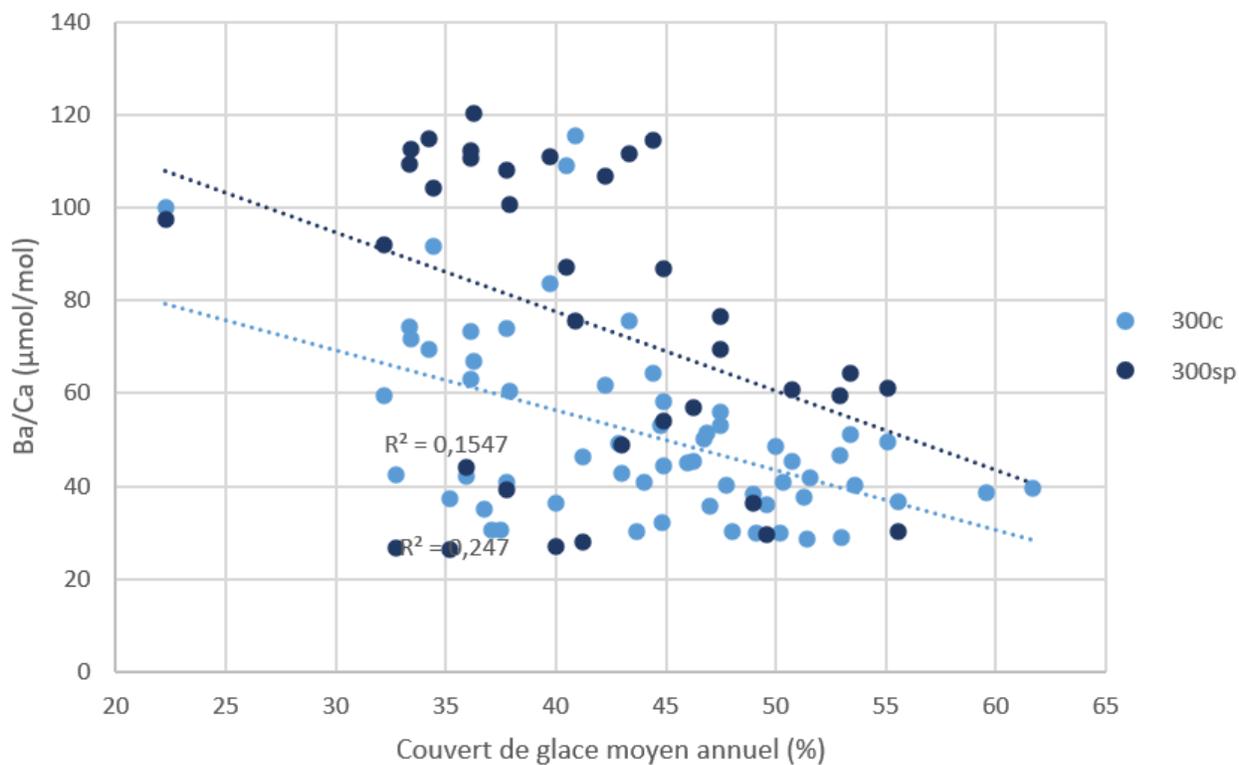


Figure 26. Rapport annuel Ba/Ca (moyenne mobile sur 5 ans) du site 300 et couvert de glace moyen annuel (Walsh et al. 2019). Corrélations : 300c: $n=61$, $p\text{-value}=4,61E-05$; 300sp : $n=36$, $p\text{-value}=0,018$.

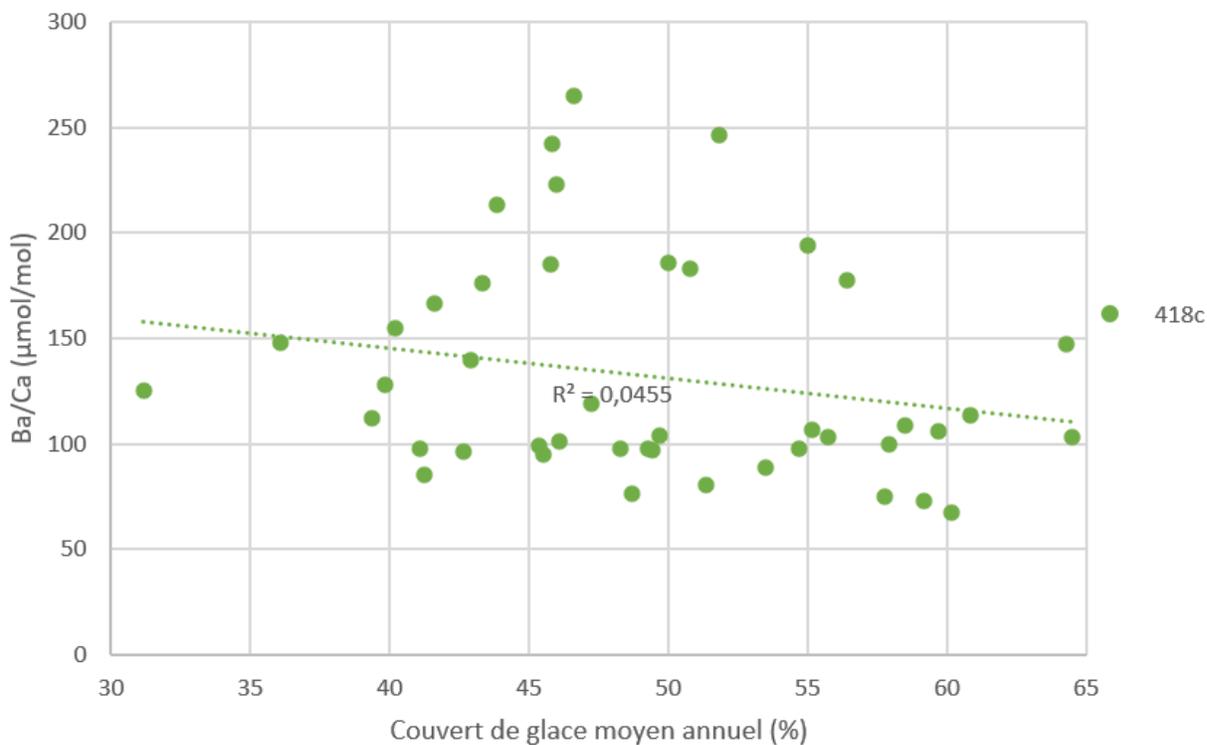


Figure 27. Rapport annuel Ba/Ca (moyenne mobile sur 5 ans) du site 418 et couvert de glace moyen annuel (Walsh et al. 2019). Corrélation : 418c : n=44 p-value=0,164.

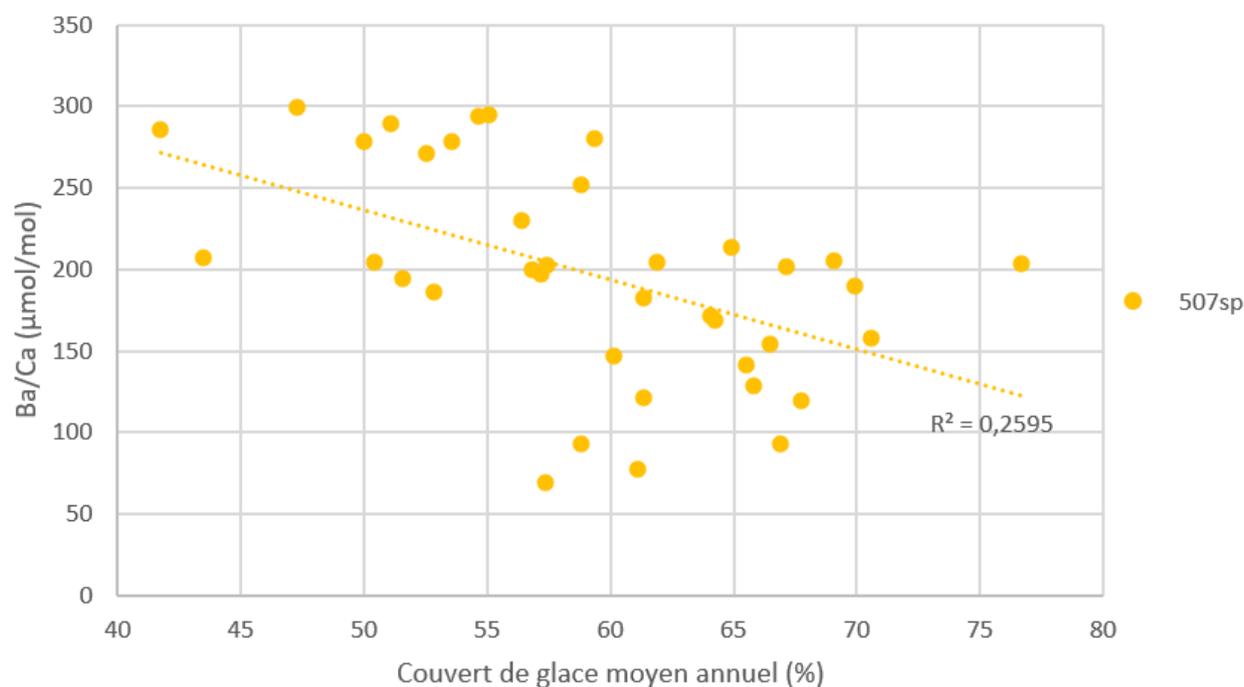


Figure 28. Rapport annuel Ba/Ca (moyenne mobile sur 5 ans) du site 507 et couvert de glace moyen annuel (Walsh et al. 2019). Corrélation : 507sp : n=38, p-value=0,0011.

Le site 615, plus au nord, se démarque par un fort couvert de glace de mer, de faibles vitesses de croissance et un rapport Ba/Ca élevé. Un examen attentif du rapport Ba/Ca dans les échantillons du site 615 semble même indiquer des variations quasi-cycliques, semblables à celles de la concentration de glace de mer, et qui suivrait une période de 5 à 10 ans, distincte du signal Mg/Ca (Figure 29). Il est possible que cette cyclicité soit affectée directement par les mouvements de masses d'eau engendrés par l'ONA, alternant les périodes plus chaudes et plus froides dans les eaux profondes de la baie de Baffin. Toutefois, compte-tenu du fait que le site 615 se situe à forte profondeur dans l'axe du courant Ouest Groenlandais, il est possible que le signal Ba/Ca soit distal, à l'instar du signal Mg/Ca, qui semble porter l'empreinte des températures du courant Ouest Groenlandais.

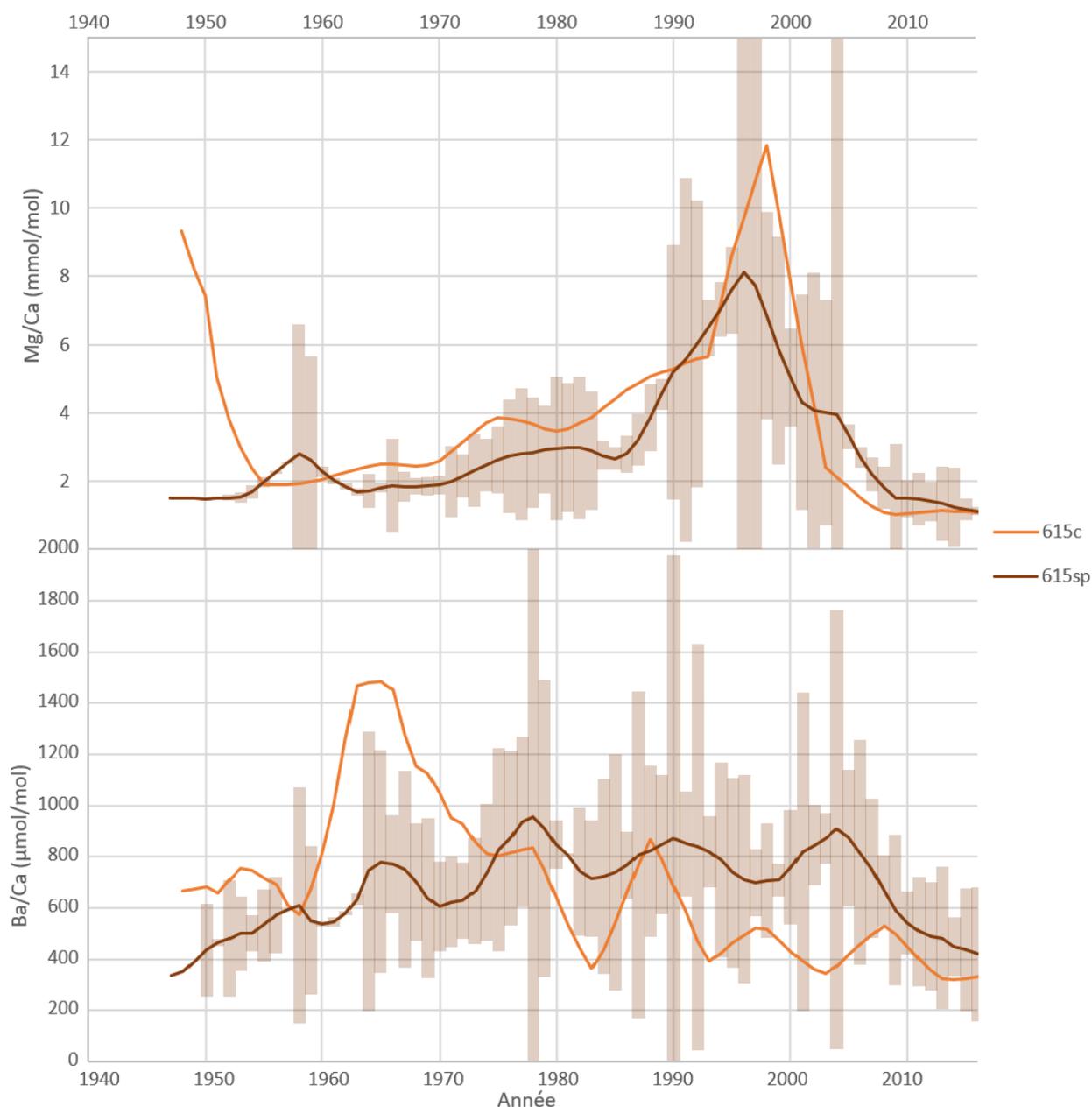


Figure 29. Rapports annuels Mg/Ca et Ba/Ca (moyenne mobile sur 5 ans) du site 615.

Olivier et al. (2020) ont également étudié des *Astarte* provenant de la baie de Baffin, spécifiquement dans le nord de la baie, à un site d'échantillonnage à une profondeur de 568m. Leurs spécimens indiquent que la salinité et la température sont demeurées très stable au courant de leur vie, un résultat attendu pour une profondeur d'environ 600m. Leur hypothèse suggère que l'apport en nutriment serait le facteur principal qui affecte les patrons de croissance des bivalves à cette profondeur. Il serait donc plausible que la croissance des bivalves de la baie de Baffin soit principalement régulée par l'impact de la glace de mer sur la production de phytoplancton, en faisant donc un bon proxy pour étudier les variations de couvert de glace de mer.

6. Conclusion : Portée paléoenvironnementale de la sclérochronologie et des rapports élémentaires dans le contexte de la baie de Baffin

On observe des grandes différences de composition chimique d'*Astarte* sp. et d'*Astarte crenata*. Bien que les mesures dans les spécimens analysés présentent certaines concordances indiquant l'influence de paramètres environnementaux, les rapports mesurés diffèrent suffisamment pour conclure que les espèces devraient être utilisées séparément lors des études sclérochronologiques et que les variations sont spécifiques à chaque site.

Les rapports Mg/Ca montrent une relation potentielle avec la température dans les masses d'eau. L'utilisation de bivalves du genre *Astarte* comme proxy des paléotempératures est donc une option intéressante en sclérochronologie, mais il faudrait étudier des spécimens échantillonnés à un endroit où les températures sont connues durant la vie de l'organisme si l'on veut définir la relation exacte entre le rapport Mg/Ca pour les *Astarte* et la température.

Les rapports Sr/Ca ne semblent pas illustrer de relation concluante avec la vitesse de croissance de nos spécimens et les rapports Ba/Ca ne semblent pas enregistrer de variations univoques avec les vitesses de croissance ou avec la productivité. Toutefois, une relation semble se dessiner entre la vitesse de croissance et la glace de mer ainsi qu'entre le rapport Ba/Ca et la glace de mer. Il existe une relation inverse significative entre la glace de mer et la vitesse de croissance. Une relation inverse semble également caractériser les rapports Ba/Ca et la glace de mer aux sites du sud de la baie de Baffin, mais pas à celui du nord qui se singularise par un fort couvert de glace et des rapports Ba/Ca élevés. Au site du nord (qui est également le plus profond), la relation entre la glace de mer et les rapports Ba/Ca n'est pas significative.

La relation la plus significative semble être celle entre la vitesse de croissance et la glace de mer. Cette relation est logique considérant que les bivalves sont des consommateurs primaires et que la glace de mer affecte directement la production de phytoplancton. La relation significative entre Ba/Ca et la glace de mer à certain des sites laisse supposer que l'incorporation du baryum dans la coquille des *Astarte* est également associé à la productivité primaire, et que cette relation se renforce lorsque l'on se rapproche de la surface (la relation entre glace de mer et baryum est significative dans les deux sites les moins profonds).

Des études ciblées seraient nécessaires pour comprendre les mécanismes qui lient la glace de mer, la productivité primaire, la vitesse de croissance des bivalves et l'incorporation du baryum dans la coquille, afin de pouvoir utiliser la sclérochronologie des *Astarte* à son plein potentiel. Particulièrement, il serait utile de mieux comprendre comment la physiologie de ces animaux benthiques réagissent aux changements dans la productivité selon leur profondeur. En effet, la position des bivalves en tant que consommateurs primaires, leur longévité et les données géochimiques que peuvent enregistrer leur coquille en font des bons proxys pour étudier les changements climatiques et environnementaux, un outil d'autant plus important considérant la

gravité des changements climatiques actuels et futurs qui risquent de modifier considérablement les dynamiques de glace de mer dans les mers et océans du nord.

7. Références Bibliographiques

- Azetsu-Scott, K., Allyn, C., Falkner, K., Hamilton, J., Jones, E. P., Lee, C., Petrie, B., Prinsenberg, S., Starr, M. & Yeats, P. 2010. Calcium carbonate saturation states in the waters of the Canadian Arctic Archipelago and the Labrador Sea. *Journal of Geophysical Research* 115: C11021, doi:10.1029/2009JC005917.
- Azetsu-Scott, K., Petrie, B., Yeats, P. & Lee, C. 2012. Composition and fluxes of freshwater through Davis Strait using multiple chemical tracers. *Journal of Geophysical Research* 117: C12011, doi:10.1029/2012JC008172.
- Averyt, K. B. & Paytan, A. 2004. A comparison of multiple proxies for export production in the equatorial Pacific. *Paleoceanography* 19: PA4003, doi :1029/2004PA001005.
- Barats, A., Amouroux, D., Pécheyran, C., Chauvaud, L. & Donard, O. F. X. 2010. Spring molybdenum enrichment in scallop shells: a potential tracer of diatom productivity in temperate coastal environments (Brittany, NW France). *Biogeosciences* 7:233-245.
- Beyer, J., Green, N. W., Brooks, S., Allan, I. J., Ruus, A., Gomes, T., Bråte, I. L. N. & Schøyen, M. 2017. Blue mussels (*Mytilus edulis* spp.) as sentinel organisms in coastal pollution monitoring: A review. *Marine Environmental Research* 130 :338-365.
- Björk, S. 1962. Investigations on *Margaritifera margaritifera* and *Unio crassus*. Limnologic studies in rivers in South Sweden. *Acta Limnologica* 4:1–109.
- Black, B. A., Dunham, J. B., Blundon, B. W., Brim-Box, J. & Tepley, A. J. 2015. Long-term growth-increment chronologies reveal diverse influences of climate forcing on freshwater and forest biota in the Pacific Northwest. *Global Change Biology* 21:594-604.
- Bourgeois, L., de Rafélis, M., Reichart, G. J., de Nooijer, L. J., Nicollin, F. & Dupont-Nivet, G. 2014. A high resolution study of trace elements and stable isotopes in oyster shells to estimate Central Asian Middle Eocene seasonality. *Chem. Geol.* 363:200-212.
- Boutron, C. F., Candelone, J.-P. & Hong S. 1994. Past and recent changes in the large-scale tropospheric cycles of lead and other heavy metals as documented in Antarctic and Greenland snow and ice: a review. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58:3217-3225.
- Buat-Menard, P. 1979. Influence de la retombée atmosphérique sur la chimie des métaux en trace dans la matière en suspension dans l'Atlantique Nord, Thèse d'État, Université Paris VII.
- Buat-Menard, P. & Chesselet, R. 1979. Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter, *Earth Planet Sci. Letters.* 42:399-441.
- Buch, E. 2000. A monograph on the physical oceanography of the Greenland waters. Danish Meteorological Institute Sci. Rep. No. 00-12.
- Buch, E. & Nielsen, M.H., 2001. Oceanographic Investigations off West Greenland 2000. NAFO Scr. Doc 01/02.

Buch, E., Pedersen, S. A. & Ribergaard, M. H. 2004. Ecosystem Variability in West Greenland Waters. *J. Northw. Atl. Fish. Sci.* 34:13-28.

Bunn, A. G. (2010). "Statistical and visual crossdating in R using the dplR library." *Dendrochronologia*, **28**:251–258. ISSN 1125-7865, doi: 10.1016/j.dendro.2009.12.001.

Butler, P. G., Richardson, C. A., Scourse, J. D., Wanamaker Jr., A. D., Shammon, T. M. & Bennell, J. D. 2010. Marine climate in the Irish Sea: analysis of a 489-year marine master chronology derived from growth increments in the shell of the clam *Arctica islandica*. *Quaternary Science Reviews* 29:1614-1632.

Butler, P. G., Wanamaker Jr., A. D., Scourse, J. D., Richardson, C. A. & Reynolds, D. J. 2013. Variability of marine climate on the North Icelandic Shelf in a 1357-year proxy archive based on growth increments in the bivalve *Arctica islandica*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 373:141-151.

Carpenter, S. & Lohmann, K. 1992. Sr/Mg ratios of modern marine calcite: empirical indicators of ocean chemistry and precipitation rate. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56:1837–1849.

Carré, M., Bentaleb, I., Bruguier, O., Ordinola, E., Barrett, N. T. & Fontugne, M. 2006. Calcification rate influence on trace element concentrations in aragonitic bivalve shells: Evidences and mechanisms. *Geochim, Cosmochim, Acta* 70:4906-4920.

Carroll, M. L., Johnson, B. J., Henkes, G. A., McMahon, K. W., Voronkov, A., Ambrose Jr., W. G. & Denisenko, S. G. 2009. Bivalves as indicators of environmental variation and potential anthropogenic impacts in the southern Barents Sea. *Marine Pollution Bulletin* 59:193-206.

Carroll, M. & Romanek, C. S. 2008. Shell layer variation in trace element concentration for the freshwater bivalve *Elliptio complanate*. *Geo-Mar Lett* 28:369-381.

Carroll, M. L., Ambrose, W. G. Jr., Locke, W. L., Ryan, S. K. & Johnson, B. J. 2014. Bivalve growth rate and isotopic variability across the Barents Sea Polar Front. *J. Mar. Syst.* 130:167-180.

Chalut, K. 2014. Utilisation du bivalve *Portlandia arctica* comme indicateur de variations environnementales dans deux fjords du Nunatsiavut (Labrador, Canada). (Master). Université du Québec à Rimouski.

Clark II, G. R. 1975. Periodic growth and biological rhythms in experimentally grown bivalves. Dans: Rosenberg, G. D. & Runcorn, S. K. (Eds.), *Growth Rhythms and the History of the Earth's Rotation*. Wiley, London, pp. 103-117.

Cummins, R. H. 1994. Taphonomic processes in modern freshwater molluscan death assemblages: Implications for the freshwater fossil record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 108:55–73.

Delaney, M. L., Bé, A. W. H. & Boyle, E. A. 1985. Li, Sr, Mg and Na in foraminiferal calcite shells from laboratory culture, sediment traps, and sediment cores, *Geochm, Cosmochim, Acta* 49:1327-1341.

- Dodd, J. R. 1965. Environmental control of strontium and magnesium in *Mytilus*. *Geochim. Cosmochim. Acta* 29:385-398.
- Doré, J., Chaillou, G., Poitevin, P., Lazure, P., Poirier, A., Chauvaud, L., Archambault, P. & Thébault, J. 2020. Assessment of Ba/Ca in *Arctica islandica* shells as a proxy for phytoplankton dynamics in the Northwestern Atlantic Ocean. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 237:106628.
- Epplé, V.M., Brey, T., Witbaard, R., Kuhnert, K., Pätzold, J., 2006. Sclerochronological records of *Arctica islandica* from the inner German Bight. *Holocene* 16:763–769.
- Franklin, M & Morse, J. 1983. The interaction of manganese (II) with the surface of calcite in dilute solutions and seawater. *Marine Chemistry* 12:241-254.
- Freitas, P., Clarke, L., Kennedy, H., Richardson, C.A. & Abrantes, F. 2005. Mg/Ca, Sr/Ca and stable-isotope ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$) ratio profiles from the fan mussel *Pinna nobilis*: seasonal records and temperature relationships. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 6 (4), Q04D14. doi:10.1029/2004GC000872.
- Freitas, P. S., Clarke, L. J., Kennedy, H., Richardson, C. A. & Abrantes, F. 2006. Environmental and biological controls on elemental (Mg/Ca, Sr/Ca and Mn/Ca) ratios in shells of the king scallop *Pecten maximus*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70:5119-5133.
- Freitas, P. S., Clark, L. J., Kennedy, H. A. & Richardson, C. A. 2008. Inter- and intra-specimen variability masks reliable temperature control on shell Mg/Ca ratios in laboratory- and field-cultured *Mytilus edulis* and *Pecten maximus* (bivalvia). *Biogeosciences* 5:1245-1258.
- Füllenbach, C. S., Schöne, B. R. & Mertz-Kraus, R. 2015. Strontium/lithium ratio in aragonitic shells of *Cerastoderma edule* (bivalvia) - a new potential temperature proxy for brackish environments. *Chem. Geol.* 417:341-355.
- Gillikin, D. P., Lorrain, A., Navez, J., Taylor, J. W., André, L., Keppens, E., Baeyens, W. & Dehairs, F. 2005. Strong biological controls on Sr/Ca ratios in aragonitic marine bivalve shells. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 6, Q05009. <http://dx.doi.org/10.1029/2004GC000874>.
- Gillikin, D. P., Dehairs, F., Lorrain, A., Steenmans, D., Baeyens, W. & André, L. 2006. Barium uptake into the shells of the common mussel (*Mytilus edulis*) and the potential for estuarine paleo-chemistry reconstruction. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70:395-407.
- Gillikin, D. P., Lorrain, A., Paulet, Y. M., André, L. & Dehairs, F. 2008. Synchronous barium peaks in high-resolution profiles of calcite and aragonite marine bivalve shells. *Geo-Mar. Lett.* 28:351-358.
- Gillikin, D. P. & Dehairs, F. 2013. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 373:60-65.
- Goewert, A. E. & Surge, D. 2008. Seasonality and growth patterns using isotope sclerochronology in shells of the Pliocene scallop *Chesapecten madisonius*. *Geo-Mar Lett.* 28:327-338.

- Hatch, M. B. A., Schellenberg, S. A. & Carter, M. L. 2012. Ba/Ca variations in the modern intertidal bean clam *Donax gouldii*: An upwelling proxy? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 373:98-107.
- Hathorne, E. C. & James, R. H. 2006. Temporal record of lithium in seawater: A tracer for silicate weathering? *Earth Planet. Sci. Lett.* 246:393-406.
- Heide-Jørgensen, M. P. & Laidre, K. L. 2004. Declining Extent of Open-Water Refugia for Top Predators in Baffin Bay and Adjacent Waters. *Ambio* 33:487-494.
- Heide-Jørgensen, M. P., Laidre, K. L., Logsdon, M. L. & Nielsen, T. G. 2007. Springtime coupling between chlorophyll *a*, sea ice and sea surface temperature in Disko By, West Greenland. *Progress in Oceanography* 73:79-95.
- Helama, S. & Valovirta, I. 2007. Shell morphometry, pre-mortal taphonomy and ontogeny-related growth characteristics of freshwater pearl mussel in norther Finland. *Annales Zoologici Fennici* 44:285-302.
- Helama, S., Schöne, B. R., Kirchhefer, A. J., Nielsen, J. K., Rodland, D. L. & Janssen, R. 2007. Compound response of marine and terrestrial ecosystems to varying climate: Pre-anthropogenic perspective from bivalve shell growth increments and tree-rings. *Marine Environmental Research* 63: 185-199.
- Helama, S., Nielsen, J. K., Macias Fauria, M. & Valovirta, I. 2009. A fistful of shells : amplifying sclerochronological and palaeoclimate signals from molluscan death assemblages. *Geol. Mag.* 146:917-930.
- Hellstrom, J., Paton, C., Woodhead, J., Hergt, J., 2008. Iolite: software for spatially resolved LA-(quad and MC) ICPMS analysis. *Mineral. Assoc. Canada Short Course Ser.* 40, 343–348.
- Holland, H. A., Schöne, B. R., Marali, S. & Jochum, K. P. 2014. History of bioavailable lead and iron in the Greater North Sea and Iceland during the last millenium – a bivalve sclerochronological reconstruction. *Mar. Pollut. Bull.* 87:104-116.
- Izumida, H., Yoshimura, T., Suzuki, A., Nakashima, R., Ishimura, T., Yasuhara, M., Inamura, A., Shikazono, N. & Kawahata, H. 2011. Biological and water chemistry controls on Sr/Ca, Ba/Ca, Mg/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ profiles in freshwater pearl mussel *Hyriopsis* sp. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 309:298-308.
- Jochum, K.P., Weis, U., Stoll, B., Kuzmin, D., Yang, Q., Raczek, I., Jacob, D.E., Stracke, A., Birbaum, K., Frick, D.A., Günther, D. & Enzweiler, J., 2011. Determination of reference values for NIST SRM 610-617 glasses following ISO guidelines. *Geostand. Geoanal. Res.* 35:397–429.
- Jørgensen, O. A., Hvingel, C., Møller, P. R. & Treble, M. A. 2005. Identification and mapping of bottom fish assemblages in Davis Strait and southern Baffin Bay. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 62:1833-1852.
- Kaufman, A., Ghaleb, B., Wehmiller, J. F. & Hillaire-Marcel, C. 1996. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60:3735-3746.

- Kennish, M. J. & Olsson, R. K. 1975. Effects of thermal discharges on the microstructural growth of *Mercenaria mercenaria*. *Environ. Geol. (Springer)* 1:41-64.
- Killingley, J. S. & Berger, W. H. 1979. Stable isotopes in a mollusk shell: detection of upwelling events. *Science* 205:186-188.
- Klein, R., Lohmann, K. & Thayer, C. 1996a. Bivalve skeletons record seasurface temperatures and $\delta^{18}\text{O}$ via Mg/Ca and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios. *Geology* 24:415–418.
- Klein, R., Lohmann, K. & Thayer, C. 1996b. Sr/Ca and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in skeletal calcite of *Mytilus trossulus*: covariation with metabolic rate, salinity and carbon isotopic composition of seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60:4207–4221.
- Landy, J. C., Ehn, J. K., Babb, D. G., Thériault, N. & Barber, D. G. 2017. Sea ice thickness in the Eastern Canadian Arctic: Hudson Bay Complex & Baffin Bay. *Remote Sensing of Environment* 200:281-294.
- Langlet, D., Alleman, L.Y., Plisnier, P.-D., Hughes, H. & André, L. 2007. Manganese content records seasonal upwelling in Lake Tanganyika mussels. *Biogeosciences* 4:195–203.
- Lazareth, C. E., Willenez, P., Navez, J., Keppens, E., Dehairs, F. & André, L. 2000. Sclerosponges as a new potential recorder of environmental changes: lead in *Ceratoporella nicholsoni*. *Geology* 28:515–518.
- Lazareth, C. E., Vander Putten, E., Andre, L. & Dehairs, F. 2003. High-resolution trace element profiles in shells of the mangrove bivalve *Isognomon ehippium*: a record of environmental spatio-temporal variations? *Estuarine Coastal Shelf Science* 57:1103-1114.
- Lazareth, C. E., Le Cornec, F. Candaudap, F. & Freydier, R. 2013. Trace element heterogeneity along isochronous growth layers in bivalve shell: Consequences for environmental reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 373:39-49.
- Lea, D. W. & Boyle, E. A. 1989. Barium content of benthic foraminifera controlled by bottom-water composition. *Nature* 338:751-753.
- Lea, D. W. & Boyle, E. A. 1990. Foraminiferal reconstruction of barium distributions in water masses of the global oceans. *Paleoceanography* 5:719-742.
- Lea, D. W., Mashiotto, T. & Spero, H. 1999. Controls on magnesium and strontium uptake in planktonic foraminifera determined by live culturing. *Geochim, Cosmochim. Acta* 63 :2369-2379.
- Linné, C. 1806. A general system of nature through the three grand kingdoms of animals, vegetables, and minerals, systematically divided into their several classes, orders, genera, species, and varieties, with their habitations, manners, economy, structure, and peculiarities: vol. 4, Worms. Translated and extended edition by W. Turton from Caroli Linnaei Systema Naturae per Regna Tria Naturae, Secundum Classes, Ordines, Genera, Species, cum Characteribus, Differentiis, Synonymis, Locis. Editio decima tertia, aucta, reformata (ed. J. F. Gmelin, 1791). Lackington: Allen and Co., London.

- Lorens, R. B. & Bender, M. L. 1977. Physiological exclusion of magnesium from *Mytilus edulis* calcite. 269:793-794.
- Lorrain, A., Gillikin, D. P., Paulet, Y.-M., Chauvaud, L., Le Mercier, A., Navez, J. & André, L. 2005. Strong kinetic effects on Sr/Ca ratios in the calcitic bivalve *Pecten maximus*. *Geology* 33:965-968.
- Macdonald, J.I. & Crook, D. 2010. Variability in Sr: Ca and Ba: Ca ratios in water fish otoliths across an estuarine salinity gradient. *Marine Ecology Progress Series* 413:147-161.
- Marali, S. & Schöne, B. R. 2015. Oceanographic control on shell growth of *Arctica islandica* (Bivalvia) in surface waters of Northeast Iceland – Implications for paleoclimate reconstructions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 420:138-149.
- Marali, S., Schöne, B. R., Mertz-Kraus, R., Griffin, S. M., Wanamaker, A. D., Matras, U. & Butler, P. G. 2017a. Ba/Ca ratios in shells of *Arctica islandica* – Potential environmental proxy and crossdating tool. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 465:347-361
- Marali, S., Schöne, B. R., Mertz-Kraus, R., Griffin, S. M., Wanamaker, A. D., Butler P. G., Holland, H. A. & Jochum, K. P. 2017b. Reproducibility of trace element time-series (Na/Ca, Mg/Ca, Mn/Ca, Sr/Ca, and Ba/Ca) within and between specimens of the bivalves *Arctica islandica* – A LA-ICP-MS line scan study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 484:109-128.
- Mauritzen, C., Rudels, B. & Toole, J. 2013. « The Arctic and Subarctic Oceans/Seas » Dans *Ocean Circulation and Climate « A 21st Century Perspective »*, sous la direction de Siedler, G., Griffies, S. M., Gould, J. & Church, J. A., p. 443-470. Amsterdam: Academic Press.
- Min, G. R., Edwards, R. L., Taylor, F. W., Recy, J., Gallup, C. D. & Beck, J. W. 1995. Annual cycles of U/Ca in coral skeletons and U/Ca thermometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59:2025-2042.
- Møller, E. F. & Nielsen, T. G. 2020. Borealization of Arctic zooplankton-smaller and less fat zooplankton species in Disko Bay, Western Greenland. *Limnology and Oceanography* 65:1175-1188.
- Moore, W. S. & Shaw, T. J. 1998. Chemical signals from submarine fluid advection onto the continental shelf. *J. Geophys. Res.* 103:21543-21552.
- Moss, D. K., Surge, D. & Khaitov, V. 2018. Lifespan and growth of *Astarte borealis* (Bivalvia) from Kandalaksha Gulf, White Sea, Russia. *Polar Biology* 41:1359-1369.
- Moros, M., Lloyd, J. M., Perner, K., Krawczyk, D., Blanz, T., de Vernal, A., Ouellet-Bernier, M.-M., Kuijpers, A., Jennings, A. E., Witkowski, A., Schneider, R. & Jansen, E. 2016. Surface and sub-surface multi-proxy reconstruction of middle to late Holocene palaeoceanographic changes in Disko Bugt, West Greenland. *Quaternary Science Reviews* 132:146-160.

- Morse, J. & Bender, M. 1990. Partition coefficients in calcite: examination of factors influencing the validity of experimental results and their application to natural systems. *Chem. Geol.* 82:265–277.
- Mucci, A. & Morse, J. 1983. The incorporation of Mg^{2+} and Sr^{2+} into calcite overgrowths: influences of growth rate and solution composition. *Geochim. Cosmochim. Acta* 47:217–233.
- Murozumi, M., Chow, T. J. & Patterson, C. 1969. Chemical concentrations of pollutant lead aerosols, terrestrial dusts and sea salts in Greenland and Antarctic snow strata. *Geochim. Cosmochim. Acta* 33:1247–1294.
- Nielsen, J. K., Helama, S. & Schöne, B. 2008. Shell Growth History of Geoduck Clam (*Panopea abrupta*) in Parry Passage, British Columbia, Canada: Temporal Variation in Annuli and the Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanography* 64:951-960.
- Nurnberg, D., Bijma, J. & Hemleben, C. 1996a. Assessing the reliability of magnesium in foraminiferal calcite as a proxy for water mass temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60:803–814.
- Nurnberg, D., Bijma, J. & Hemleben, C. 1996b. Erratum: assessing the reliability of magnesium in foraminiferal calcite as a proxy for water mass temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60:2483–2484.
- Ohde, S. & Kitano, Y. 1984. Coprecipitation of strontium with marine Ca–Mg carbonates. *Geochem. J.* 18 :143–146.
- Olivier, F., Gaillard, B., Thébault, J., Meziane, T., Tremblay, R., Dumont, D., Bélanger, S., Gosselin, M., Jolivet, A., Chauvaud, L., Martel, A. L., Rysgaard, S., Olivier, A.-H., Pettré, J., Mars, J., Gerber, S. & Archambault, P. 2020. Shells of the bivalve *Astarte moerchi* give new evidence of a strong pelagic-benthic coupling shift occurring since the late 1970s in the North Water polynya. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378:20190353.
- Pannella, G. & MacClintock, C. 1968. Biological and environmental rhythms reflected in molluscan shell growth. *Paleontol. Soc. Mem.* 42:64-81.
- Parkinson, C. L. & Cavalieri, D. J. 2008. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2006. *Journal of geophysical research* 113, C07003, doi:10.1029/2007JC004558
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J. & Hergt, J. 2011. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *J. Anal. At. Spectrom.* 26, 2508–2518.
- Petrie, B. 2007. Does the North Atlantic oscillation affect hydrographic properties on the Canadian Atlantic continental shelf? *Atmos. Ocean* 45:121-151.
- Poitevin, P., Thébault, J., Siebert, V., Donnet, S., Archambault, P., Doré, J., Chauvaud, L. & Lazure, P. 2019. Growth Response of *Arctica islandica* to North Atlantic Oceanographic Conditions Since 1850. *Front. Mar. Sci.* 6:483. doi: 10.3389/fmars.2019.00483

Poulain, C., Gillikin, D. P., Thébault, J., Munaron, J. M., Bohn, M., Robert, R., Paulet, Y.-M. & Lorrain, A. 2015. An evaluation of Mg/Ca, Sr/Ca, and Ba/Ca ratios as environmental proxies in aragonite bivalve shells. *Chemical Geology* 396:42-50.

Protasowicki, M., Dural, M. & Jaremek, J. 2008. Trace metals in the shells of blue mussels (*Mytilus edulis*) from the Poland coast of Baltic Sea. *Environmental Monitoring and Assessment* 141:329-337.

Richard, M. 2009. Analyse de la composition élémentaire de *Pecten maximus* par HR-ICP-MS Element 2 : développements méthodologiques et interprétations écologiques. Institut Universitaire Européen de la Mer, Université de Bretagne Occidentale, Plouzané. 264p.

Román-González, A., Scourse, J. D., Butler, P. G., Reynolds, D. J., Richardson, C. A., Peck, L. S., Brey, T. & Hall, I. R. 2016. Analysis of ontogenetic growth trends in two marine Antarctic bivalves *Yoldia eightsi* and *Laternula elliptica*: Implications for sclerochronology. *Palaeogeography Palaeoclimatology, Palaeoecology* 465:300-306.

Rosenberg, G. D. & Hughes, W. W. 1991. A metabolic model for the determination of shell composition in the bivalve mollusk, *Mytilus edulis*. *Lethaia* 24:83–96.

Russell, A., Honisch, B., Spero, H. & Lea, D. 2004. Effects of seawater carbonate ion concentration and temperature on shell U, Mg and Sr in cultured planktonic foraminifera. *Geochim. Cosmochim. Acta* 68:4347–4361.

Saleuddin A (1965) The mode of life and functional anatomy of *Astarte spp.* (Eulamellibranchia). *J Molluscan Stud* 36:229–257

Schöne, B. R., Freyre Castro, A. D., Fiebig, J., Houk, S. D., Oschmann, W. & Kröncke, I. 2004. Sea surface water temperatures over the period 1884-1983 reconstructed from oxygen isotope ratios of a bivalve mollusk shell (*Arctica islandica*, southern North Sea). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 212:215-232.

Schöne, B. R., Dunca, E., Fiebig, J. & Pfeiffer, M. 2005. Mutvei's solution: An ideal agent for resolving microgrowth structures of biogenic carbonates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 228:149-166.

Schöne B. R., Radermacher, P., Zhang, Z. & Jacob D. E. 2013. Crystal fabrics and element impurities (Sr/Ca, Mg/Ca and Ba/Ca) in shells of *Arctica islandica* – Implications for paleoclimate reconstructions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 373:50-59.

Shaw, T. J., Moore, W. S., Kloepfer, J. & Sochaski, M. A. 1998. The flux of barium to the coastal waters of the southern USA: the importance of submarine groundwater discharge. *Geochim. Cosmochim. Acta* 62:3047-3054.

Shen, G. T. & Boyle, E. A. 1987. Lead in corals: reconstruction of historical industrial fluxes to the surface ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.* 82:289–304.

Shen, G. T. & Dunbar, R. B. 1995. Environmental controls on uranium in reef corals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59:2009-2024.

- Sherwood, O. A., Heikoop, J. M., Sinclair, D. J., Scott, D. B., Risk, M. J., Shearer, C. & Azetsu-Scott, K. 2005. Skeletal Mg/Ca in *Primnoa resedaeformis*: relationship to temperature? Dans *Cold Water Corals and Ecosystems – Selected Papers from the Second International Symposium on Deep Sea Corals* (eds. Freiwald, A. & Roberts, J. M.). Springer-Verlag, pp. 1061-1079.
- Shiller A. M. (1997) Manganese in surface waters of the Atlantic Ocean. *Geophys. Res. Lett.* 24(12):1495–1498.
- Sinclair, D. J. 1999. High spatial-resolution analysis of trace elements in corals using laser ablation ICP-MS. Doctoral, Australian National University.
- Sinclair, D. J. & McCulloch, M. T. 2004. Corals record low mobile barium concentrations in the Burdekin River during the 1974 flood: evidence for limited Ba supply to rivers? *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 214:155-174.
- Sinclair, D. J., Williams, B., Allard, G., Ghaleb, B., Fallon, S., Ross, S. W. & Risk, M. 2011. Reproducibility of trace element profiles in a specimen of the deep-water bamboo coral *Keratoisis* sp. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75:5101-5121.
- Stecher, H. A., Krantz, D. E., Lord, C. J., Luther, G. W. & Bock, K. W. 1996. Profiles of strontium and barium in *Mercenaria mercenaria* and *Spisula solidissima* shells. *Geochim Cosmochim Acta* 60:3445–3456.
- Stern, H. L. & Heide-Jørgensen, M. P. 2003. Trends and variability of sea ice in Baffin Bay and Davis Strait, 1953-2001. *Polar Research* 22:11-18.
- Stott, K. J., Austin, W. E. N., Sayer, M. D. J., Weidman, C. R., Cage, A. G. & Wilson, R. J. S. 2010. The potential of *Arctica islandica* growth records to reconstruct coastal climate in north west Scotland, UK. *Quaternary Science Reviews* 29:1602-1613.
- Surge, D. & Lohmann, K. C. 2008. Evaluating Mg/Ca ratios as a temperature proxy in the estuarine oyster, *Crassostrea virginica*. *J. Geophys. Res.* 113, G02001. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JG000623>.
- Tabouret, H., Pomerleau, S., Jolivet, A., Pécheyran, C., Riso, R., Thébault, J., Chauvaud, L. & Amouroux, D. 2012. Specific pathways for the incorporation of dissolved barium and molybdenum into the bivalve shell: An isotopic tracer approach in the juvenile Great Scallop (*Pecten maximus*). *Marine Environmental Research* 78:15-25.
- Tang, C. C. L., Ross, C. K., Yao, T., Petrie, B., DeTracey, B. M. & Dunlap, E. 2004. The circulation, water masses and sea-ice of Baffin Bay. *Progress in Oceanography* 63:183-228.
- Tevesz, M. J. S. & Carter, J. G. 1980. Environmental relationships of shell form and structure of Unionacean bivalves. In: Rhoads DC, Lutz R (eds) *Skeletal growth of aquatic organisms. Topics in geobiology*. Plenum, New York, pp 295–322.
- Thébault, J. & Chauvaud, L. 2013. Li/Ca enrichments in great scallop shells (*Pecten maximus*) and their relationship with phytoplankton blooms. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 373:108-122.

- Thébault, J., Schöne, B. R., Hallmann, N., Barth, M. & Nunn, E. V. 2009a. Investigation of Li/Ca variations in aragonitic shells of the ocean quahog *Arctica islandica*, northeast Iceland. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 10, Q12008 doi:10.1029/2009GC002789.
- Thébault, J., Chauvaud, L., L'helguen, S., Clavier, J., Barats, A., Jacquet, S., Pécheyran, C., Amouroux, D. 2009b. Barium and molybdenum records in bivalve shells: Geochemical proxies for phytoplankton dynamics in coastal environments? *Limnology and Oceanography*, 54-3:1002-1014, doi: 10.4319/lo.2009.54.3.1002
- Thompson, J. K., Koseff, J. R., Monismith, S. G. & Lucas, L. V. 2008. Shallow water processes govern system-wide phytoplankton bloom dynamics: A field study. *Journal of Marine Systems* 74:153-166.
- Thresher, R. E., Neil, H., Adkins, J. F., MacRae, C., Wilson, N., Gurney, R. & Tracey, D. 2005. Temperature-dependence of Mg/Ca deposition in *Keratoisis* spp.: evidence and application to reconstruction of deep-water oceanography and climatology in the Australian/New Zealand region. Dans *Third International Symposium on Deep Sea Corals*, p. 69.
- Thresher, R. E., Rintoul, S. R., Koslow, A. J., Weidman, C., Adkins, J. F. & Proctor, C. 2004. Oceanic evidence of climate change in southern Australia over the last three centuries. *Geophys. Res. Lett.* 31, L07212. doi:10.1029/2003GL018869.
- Thresher, R. E., Wilson, N. C., MacRae, C. M. & Neil, H. 2010. Temperature effects on the calcite skeletal composition of deep-water gorgonians (Isididae) *Geochim. Cosmochim. Acta* 74:4655-4670.
- Toland, H., Perkins, B., Pearce, N., Keenan, F. & Leng, M. J. 2000. A study of sclerochronology by laser ablation ICP-MS. *J. Anal. At. Spectrom.* 15:1143-1148.
- Ullman, C. V., Bohm, F., Rickaby, R. E. M. & Korte, C. 2013. The Giant Pacific Oyster (*Crassostrea gigas*) as a modern analog for fossil ostreoids: Isotopic (Ca, O, C) and elemental (Mg/Ca, Sr/Ca, Mn/Ca) proxies. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 14:4109-4120.
- Vander Putten, E., Dehairs, F., Keppens, E. & Baeyens, W. 2000. High resolution distribution of trace elements in the calcite shell layer of modern *Mytilus edulis*: environmental and biological controls. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64:997-1011.
- Vihtakari, M., Ambrose Jr, W. G., Renaud, P. E., Locke V, W. L., Carroll, M. L., Berge, J., Clarke, L. J., Cottier, F. & Hop, H. 2016. A key to the past? Element ratios as environmental proxies in two Arctic bivalves. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 465:316-332.
- Walsh, J. E., W. L. Chapman, F. Fetterer, and J. S. Stewart. 2019. *Gridded Monthly Sea Ice Extent and Concentration, 1850 Onward, Version 2*. 1953-1978 and November 1978-latest update. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. doi: <https://doi.org/10.7265/jj4s-tq79>. Accessed 21/07/2021.

- Wanamaker Jr, A. D., Kreutz, K. J., Wilson, T., Borns Jr, H. W., Introne, D. S. & Feindel, S. 2008. Experimentally determined Mg/Ca and Sr/Ca ratios in juvenile bivalve calcite for *Mytilus edulis*: implications for paleotemperature reconstructions. *Geo-Mar Lett* 28:359-368
- Wanamaker Jr., A. D., Baker, A., Butler, P. G., Richardson, C. A., Scourse, J. D., Ridgway, I. & Reynolds, D. J. 2009. A novel method for imaging internal growth patterns in marine mollusks: A fluorescence case study on the aragonitic shell of the marine bivalve *Arctica islandica* (Linnaeus). *Limnology and Oceanography: Methods* 7:673-681.
- Wanner, H., Brönnimann, S., Casty, C., Gyalistra, D., Luterbacher, J., Schmutz, C., Stephenson, D. B. & Xoplaki, E. 2001. North Atlantic Oscillation – Concepts and Studies. *Survivors in Geophysics* 22:321-382.
- Weinbauer, M. G., Brandstätter, F. & Velimirov, B. 2000. On the potential use of magnesium and strontium concentrations as ecological indicators in the calcite skeleton of the red coral (*Corallium rubrum*). *Mar. Biol.* 137:801-809.
- Weinbauer, M. G. & Velimirov, B. 1995. Calcium, magnesium and strontium concentrations in the calcite sclerites of Mediterranean gorgonians (Coelenterata: Octocorallia). *Estuar. Coast. Shelf sci.* 40:87-104.
- Yashayaev, I. 2007. Hydrographic changes in the Labrador Sea, 1960-2005. *Progress in Oceanography* 73:242:276.
- Yan, H., Shao, D., Wang, Y. & Sun, L. 2013. Sr/Ca profile of long-lived *Tridacna gigas* bivalves from South China Sea: A new high-resolution SST proxy. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 112:52-65.
- Youssef, M., El-Sorogy, A., El-Sabrouty, M. & Al-Otaibi, N. 2016. Invertebrate shells as pollution bio-indicators, Gebel El-Seit area, Gulf of Suez, Egypt. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences* 45:687-695.
- Zhao, L., Schöne, B. R. & Mertz-Kraus, R. 2017. Controls on strontium and barium incorporation into freshwater bivalve shells (*Corbicula fluminea*). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 465:386-394.
- Zhong, S. & Mucci, A. 1989. Calcite and aragonite precipitation from seawater solutions of various salinities: precipitation rates and overgrowth compositions. *Chem. Geol.* 78:283-299.
- Zweng, M. M. & Münchow, A. 2006. Warming and freshening of Baffin Bay, 1916-2003. *Journal of Geophysical Research* 111 C07016, doi:10.1029/2005JC003093

8. Annexe.

Moyennes annuelles des rapports entre isotopes mesurés pour chaque spécimen.

Tableau A. Li/Ca ($\mu\text{mol/mol}$)

Année	300c2	300c3	300sp1	300sp2	300sp3	418c1	418c2
2016	0,628	1,104	0,387	0,557	0,722	0,348	0,518
2015	0,570	0,932	0,384	0,474	0,571	0,301	0,782
2014	0,545	1,213	0,450	0,467	0,555	0,376	0,465
2013	0,767	1,010	0,359	0,395	0,585	0,393	0,308
2012	0,710	0,880	0,370	0,491	0,850	0,287	0,265
2011	0,666	1,043	0,376	0,495	0,870	0,204	0,284
2010	0,655	1,027	0,431	0,614	0,838	1,734	1,385
2009	0,625	0,694	0,455	0,502	1,688	0,716	21,403
2008	0,492	0,809	0,761	0,590	0,654	0,983	1,679
2007	0,565	0,485	0,876	0,483	0,424	1,152	0,496
2006	0,647	0,825	0,751	0,463	0,866	0,637	4,928
2005	0,511	0,737	0,483	0,890	0,599	1,355	4,614
2004	0,615	0,864	0,671	0,656	0,642	0,879	0,961
2003	0,531	0,820	0,759	0,525	0,652	0,694	0,413
2002	0,560	0,938	0,719	0,433	0,992	0,953	0,449
2001	0,443	0,785	0,435	0,410	1,201	1,341	0,828
2000	0,644	0,903	0,456	0,396	1,023	0,701	0,214
1999	0,638	0,760	0,593	0,492	0,928	0,466	0,136
1998	0,545	0,683	0,525	0,474	0,777	0,572	0,200
1997	0,596	0,735	0,502	0,448	2,005	0,899	0,381
1996	0,613	0,772	0,412	0,522	0,775	0,407	0,329
1995	0,562	0,524	0,480	0,666	0,950	0,269	0,224
1994	0,479	0,720	0,462	0,658	0,766	0,362	0,371
1993	0,559	0,731	0,456	0,500	0,782	0,293	0,170
1992	0,520	0,755	0,452	0,329	0,727	0,350	0,213
1991	0,586	0,637	0,466	0,675	0,668	0,301	9,314
1990	0,564	0,524	0,536	0,701	0,673	0,320	0,335
1989	0,512	0,693	0,468	0,502	0,461	0,150	0,215
1988	0,691	0,692	0,485	0,371	2,002	0,339	0,353
1987	0,526	0,747	0,439	0,389		0,258	0,635
1986	0,508	0,739	0,497	0,338		0,401	3,366
1985	0,560	0,643	0,523			0,463	6,344
1984	0,643	0,584	0,631			0,530	0,314
1983	0,597	0,757	0,423			0,480	0,231
1982	0,487	0,541	0,520			0,458	0,469
1981	0,601	0,751				0,752	0,360
1980	0,600	0,839				0,655	0,423

1979	0,614	0,521			0,523	0,655
1978	0,640	0,495			0,647	12,628
1977	0,560	0,614			0,566	1,012
1976	0,725	0,633			0,572	5,776
1975	0,652	0,592			0,773	18,735
1974	0,561	0,604			1,055	4,181
1973	0,526	0,631			1,806	0,508
1972	0,672	0,702			1,624	0,345
1971	0,606	0,597				
1970	0,556	0,465				
1969	0,698	0,585				
1968	0,644					
1967	0,640					
1966	0,692					
1965	0,662					
1964	0,543					
1963	0,574					
1962	0,780					
1961	0,455					
1960	0,597					
1959	0,735					
1958	0,593					
1957	0,857					
1956	0,605					
1955	0,561					
1954	0,690					
1953	0,580					
1952	0,510					
1951	1,326					
1950	1,484					
1949	1,186					
1948	3,661					
1947	2,424					
Année	507sp2	507sp3	615c3	615sp2a	615sp2b	615sp3
2016	0,571	0,750	1,166	N/A	4,569	0,953
2015	0,900	0,490	0,899	0,189	2,708	1,265
2014	1,202	0,282	1,292	0,921	2,229	0,807
2013	0,717	0,352	0,834	1,267	1,992	1,203
2012	1,754	0,418	0,438	4,129	1,489	1,073
2011	0,693	0,253	0,898	2,747	1,792	1,493
2010	1,732	0,497	0,928	1,309	1,696	1,819
2009	0,668	0,648	0,780	0,778	1,690	3,722
2008	0,670	0,433	1,686	0,993	2,750	1,518
2007	0,558	0,537	1,207	1,118	2,386	1,908
2006	0,610	0,535	2,322	1,285	1,591	1,320

2005	0,549	0,591	0,713	1,210	1,874	2,080
2004	0,607	0,598	2,226	235,166	2,240	1,365
2003	2,002	0,603	1,615	3,844	1,964	1,882
2002	0,488	0,461	0,998	3,498	1,889	1,467
2001	0,658	0,457	1,055	1,712	1,600	1,662
2000	0,745	0,577	1,409	1,588	1,252	1,610
1999	0,879	0,570	1,777	2,356	1,357	0,914
1998	0,678	0,559	243,365	1,810	0,809	1,158
1997	0,862	0,391	2,359	1,672	0,698	1,720
1996	0,639	0,424	7,780	1,056	1,059	1,368
1995	0,740	0,963	10,270	1,942	2,251	1,266
1994	0,729	0,474	1,708	1,331	0,907	1,472
1993	0,632	0,480	1,295	1,448	1,244	0,950
1992	1,319		1,253	1,694	1,061	1,702
1991	1,108		0,710	2,655	1,025	1,878
1990	0,921		5,849	3,471	2,100	3,354
1989	1,027		3,570	1,903	1,153	1,701
1988	0,990		1,202	1,516	0,843	1,427
1987	1,009		1,318	1,459	0,538	0,854
1986	1,131		2,083	1,009	0,706	1,079
1985	1,066		1,162	1,173	0,833	1,895
1984	1,210		1,406	1,183	1,328	0,999
1983	0,779		1,231	1,119	1,570	1,133
1982	0,562		1,665	1,511	0,775	1,507
1981	0,551		1,700	1,355	0,853	0,784
1980	0,881		1,386	1,433	1,173	1,270
1979	1,216		0,882	1,170	1,242	1,010
1978	1,010		0,783	1,037	0,336	0,597
1977			1,206	1,388	1,152	1,127
1976			1,471	1,475	1,006	1,454
1975			1,364	1,816	1,699	1,285
1974			1,350	1,500	3,012	1,428
1973			1,134	1,655	2,941	1,029
1972			2,368	1,249	2,305	0,523
1971			1,719	1,318	2,774	0,591
1970			1,476	1,255	3,475	1,254
1969			0,917	0,572	3,124	1,217
1968			1,733	1,519	2,456	1,105
1967			1,481	1,084	2,767	0,778
1966			3,330	1,235	2,042	7,169
1965			1,169	0,771	2,793	1,036
1964			1,712	2,168	3,864	1,172
1963			1,847	1,446	2,453	1,421
1962			1,648	1,791		1,263
1961			2,684	1,001		1,434

1960	1,759	1,184	1,079
1959	2,747	1,725	14,437
1958	1,234	1,456	38,689
1957	1,638	1,799	1,373
1956	2,248	1,717	1,491
1955	2,515	1,878	1,115
1954	1,932	1,807	1,192
1953	1,444	1,191	1,207
1952	1,715	1,240	1,193
1951	1,245	1,654	1,030
1950	18,934	1,460	1,195
1949			0,919

Tableau B. Mg/Ca (mmol/mol)

Année	300c2	300c3	300sp1	300sp2	300sp3	418c1	418c2
2016	0,682	3,302	0,905	0,452	0,740	0,452	0,551
2015	0,726	2,931	0,489	0,425	0,426	0,424	0,778
2014	0,827	2,957	0,556	0,414	0,451	0,649	0,425
2013	1,640	2,565	0,586	0,643	1,163	0,486	0,449
2012	2,558	3,148	0,740	0,769	2,142	0,367	0,659
2011	2,545	2,926	0,939	0,854	2,379	0,448	1,344
2010	2,854	2,860	1,411	0,840	2,438	9,601	2,555
2009	2,589	2,309	2,541	1,521	6,529	2,997	71,467
2008	2,009	1,796	2,672	1,195	1,371	3,633	3,905
2007	1,993	1,727	1,762	1,094	0,691	4,073	1,614
2006	2,881	3,965	1,348	0,832	1,236	1,571	14,763
2005	2,222	3,182	1,556	1,688	0,984	2,913	5,257
2004	0,946	2,417	1,383	1,090	1,091	2,206	4,082
2003	0,654	4,130	1,704	0,465	1,042	2,364	2,254
2002	0,583	2,666	0,798	0,495	0,724	2,200	2,640
2001	0,522	2,959	1,128	0,452	0,954	2,911	2,426
2000	0,533	3,088	0,809	0,418	0,852	4,444	1,054
1999	0,579	2,773	0,582	0,437	0,621	3,714	0,668
1998	0,550	4,254	1,339	0,428	0,592	6,413	0,593
1997	0,421	4,512	0,873	0,337	0,658	9,694	1,229
1996	0,426	3,485	0,712	0,421	0,691	2,795	1,128
1995	0,493	3,737	0,585	0,373	0,668	2,285	0,995
1994	0,389	5,037	0,429	0,427	0,554	2,136	1,164
1993	0,473	3,540	0,492	0,524	0,532	2,729	1,248
1992	0,413	4,166	0,458	0,346	0,574	3,779	1,075
1991	0,402	5,113	0,499	0,631	0,724	1,984	12,521
1990	0,407	3,428	0,456	0,855	0,919	2,243	1,583
1989	0,369	2,578	0,561	0,446	0,893	4,142	1,265

1988	0,348	3,811	0,529	0,965	4,712	3,065	0,985
1987	0,391	2,926	0,511	0,700		2,336	1,117
1986	0,468	4,255	0,488	0,699		2,941	1,818
1985	0,460	3,264	0,550			2,981	3,821
1984	0,336	2,093	0,599			1,759	0,596
1983	0,396	3,642	0,582			1,866	0,643
1982	0,427	3,875	0,582			0,983	0,501
1981	0,402	2,164				1,288	0,744
1980	0,392	3,167				0,880	0,759
1979	0,471	1,232				0,985	1,430
1978	0,496	2,030				1,233	29,255
1977	0,479	1,946				2,926	2,562
1976	0,506	2,214				5,159	4,652
1975	0,444	1,739				3,133	40,481
1974	0,408	1,293				3,342	4,953
1973	0,462	2,217				5,963	1,158
1972	0,469	1,345				6,622	0,942
1971	0,476	1,557					
1970	0,400	1,176					
1969	0,369	1,753					
1968	0,370						
1967	0,412						
1966	0,407						
1965	0,353						
1964	0,378						
1963	0,404						
1962	0,383						
1961	0,332						
1960	0,389						
1959	0,375						
1958	0,379						
1957	0,364						
1956	0,361						
1955	0,383						
1954	0,505						
1953	0,421						
1952	0,736						
1951	2,110						
1950	2,511						
1949	4,140						
1948	4,749						
Année	507sp2	507sp3	615c3	615sp2a	615sp2b	615sp3	
2016	0,780	0,950	1,033	N/A	0,891	0,666	
2015	1,041	1,172	0,840	0,674	1,327	0,663	
2014	1,582	0,529	1,138	0,589	3,068	0,609	

2013	1,313	0,927	1,432	1,076	3,146	0,631
2012	1,930	1,068	1,361	0,975	1,904	0,513
2011	1,277	0,826	0,954	0,707	1,613	2,610
2010	4,472	1,210	0,852	0,694	1,412	2,026
2009	1,449	1,258	0,877	0,803	1,079	4,298
2008	1,302	0,765	1,185	0,736	1,095	2,206
2007	1,046	0,825	0,864	0,711	1,111	1,897
2006	0,908	0,942	1,078	0,776	1,503	1,274
2005	1,100	1,035	1,412	0,988	1,367	1,890
2004	1,000	0,757	2,184	27,850	1,416	0,860
2003	1,009	1,000	3,954	8,244	1,478	1,013
2002	0,834	0,981	2,707	9,610	1,298	0,831
2001	0,951	0,863	1,491	7,939	1,798	0,835
2000	0,951	0,879	3,058	4,368	1,745	1,040
1999	1,137	0,775	3,044	8,203	1,629	0,734
1998	0,792	0,723	43,728	7,428	1,398	8,174
1997	1,322	0,940	4,701	24,550	2,917	5,136
1996	1,138	0,919	3,416	45,781	4,349	3,630
1995	0,850	0,982	8,027	6,971	4,440	4,167
1994	0,917	0,996	5,211	3,080	2,537	4,436
1993	1,183	0,958	6,900	2,856	2,259	4,245
1992	1,323		5,355	12,101	1,867	6,003
1991	1,442		4,325	14,871	1,854	9,333
1990	1,431		5,188	9,687	1,911	9,949
1989	1,402		5,411	4,081	3,022	3,763
1988	1,482		6,056	4,002	1,645	2,407
1987	1,647		4,828	3,234	2,050	1,415
1986	1,362		4,367	2,461	2,630	1,401
1985	2,361		3,938	2,607	1,890	2,589
1984	1,658		4,619	2,234	2,248	3,135
1983	1,206		3,635	2,875	1,767	5,881
1982	0,924		4,557	2,101	1,663	6,262
1981	1,444		2,666	2,397	1,074	5,559
1980	1,057		2,368	2,012	1,014	5,875
1979	1,134		3,402	2,357	1,272	4,374
1978	1,470		4,440	2,249	0,909	4,809
1977			4,278	2,045	1,122	5,594
1976			2,736	2,217	1,609	5,409
1975			4,523	3,673	1,515	3,481
1974			4,514	3,020	1,130	1,981
1973			3,804	3,209	0,987	3,261
1972			2,783	2,169	1,447	2,977
1971			2,595	1,612	1,019	3,492
1970			2,117	1,731	1,187	1,815
1969			2,281	1,476	1,247	1,909

1968	2,424	2,097	1,512	1,818
1967	2,137	2,153	1,129	1,449
1966	2,913	2,463	4,580	1,248
1965	2,670	1,888	1,581	1,795
1964	2,649	2,272	1,056	1,675
1963	2,425	1,335	1,129	1,358
1962	1,574	1,568		1,742
1961	2,577	1,488		1,673
1960	1,884	1,681		1,398
1959	2,451	1,565		7,650
1958	1,444	1,631		9,183
1957	1,734	1,450		1,460
1956	1,861	1,624		1,514
1955	2,127	1,450		1,759
1954	1,966	1,392		1,782
1953	1,668	1,657		1,365
1952	1,926	1,606		1,417
1951	2,020	1,399		1,490
1950	13,972	1,430		1,351
1949				1,684

Tableau C. Sr/Ca (mmol/mol)

Année	300c2	300c3	300sp1	300sp2	300sp3	418c1	418c2
2016	6,686	6,770	4,030	6,619	4,918	11,812	8,278
2015	6,105	8,481	3,983	4,720	4,341	4,422	13,084
2014	7,078	11,484	3,837	3,555	4,504	7,353	6,684
2013	7,803	9,612	3,613	5,349	4,986	6,267	5,065
2012	7,978	9,697	3,658	5,304	5,545	6,662	3,227
2011	7,900	9,313	3,712	5,449	6,109	13,673	4,407
2010	8,109	7,795	4,408	5,616	6,086	5,872	6,050
2009	7,617	9,091	5,248	7,277	8,348	7,521	15,942
2008	6,229	10,221	6,941	6,333	6,597	6,977	5,877
2007	7,500	10,133	5,520	7,341	4,414	4,740	4,010
2006	8,351	11,184	4,098	5,464	4,783	3,879	7,003
2005	7,058	8,473	4,553	5,965	5,644	4,483	5,721
2004	7,405	8,511	5,003	6,377	4,446	4,727	5,294
2003	7,309	10,063	4,858	4,712	4,571	4,269	5,176
2002	6,804	6,753	5,446	3,813	5,285	5,022	4,574
2001	6,917	7,158	5,545	3,905	6,311	5,213	3,990
2000	6,518	6,585	6,045	3,799	6,063	6,439	4,099
1999	6,926	7,106	5,101	3,784	5,024	6,204	3,930
1998	6,511	8,262	6,127	3,659	4,642	4,872	4,025
1997	6,427	7,529	5,084	3,854	5,044	5,913	8,009

1996	6,366	6,918	4,798	4,115	4,296	6,411	7,190
1995	6,063	7,661	4,474	3,960	4,935	3,992	6,162
1994	6,327	7,242	4,655	4,927	4,948	5,262	5,316
1993	5,432	7,933	4,436	4,324	4,334	5,966	5,326
1992	5,910	8,054	3,825	4,470	3,992	5,266	4,077
1991	5,415	6,374	4,023	5,203	3,985	5,368	5,865
1990	5,940	5,643	3,900	5,368	4,885	4,897	4,833
1989	6,123	6,268	4,100	5,247	4,037	5,942	4,644
1988	5,915	6,578	3,507	4,157	4,947	4,774	5,075
1987	5,534	6,440	3,141	4,518		4,327	4,970
1986	5,625	7,107	3,502	4,337		4,590	5,108
1985	6,738	6,854	3,503			4,169	5,432
1984	5,310	4,888	3,630			5,113	4,270
1983	5,148	5,840	3,431			4,994	4,378
1982	5,767	6,356	3,722			3,551	4,452
1981	5,369	5,361				3,717	4,720
1980	5,389	5,606				3,883	4,438
1979	5,876	4,863				3,718	4,626
1978	5,474	4,356				4,570	8,938
1977	5,740	5,113				4,036	4,904
1976	5,832	5,348				4,549	5,547
1975	5,758	5,387				4,485	6,134
1974	5,546	5,115				5,041	5,835
1973	5,395	5,412				7,155	4,545
1972	5,420	5,158				6,621	5,026
1971	5,927	5,370					
1970	5,700	5,216					
1969	6,024	5,951					
1968	5,465						
1967	5,370						
1966	5,918						
1965	5,475						
1964	5,241						
1963	5,565						
1962	5,819						
1961	5,118						
1960	5,569						
1959	5,742						
1958	4,324						
1957	5,730						
1956	5,179						
1955	4,930						
1954	5,446						
1953	5,492						
1952	4,622						

1951	5,645
1950	5,695
1949	5,851
1948	6,814
1947	6,332

Année	507sp2	507sp3	615c3	615sp2a	615sp2b	615sp3
2016	7,263	6,644	12,225	N/A	11,544	8,322
2015	6,874	10,991	9,287	14,687	12,090	9,949
2014	6,586	11,184	9,855	12,739	13,352	9,730
2013	6,213	12,286	8,685	15,136	14,911	11,101
2012	5,754	5,055	7,024	12,832	10,228	10,555
2011	6,113	10,300	7,380	13,830	12,093	12,192
2010	5,136	6,695	7,502	12,245	12,545	10,809
2009	6,172	9,170	8,875	14,034	10,842	11,543
2008	9,825	5,175	13,952	13,049	13,181	10,135
2007	6,829	4,794	9,687	15,856	11,102	9,326
2006	6,799	5,386	10,638	14,084	14,609	12,881
2005	8,385	5,448	9,136	15,981	11,762	13,169
2004	6,492	4,770	10,263	20,598	12,057	15,693
2003	6,645	4,966	13,257	15,471	13,378	16,425
2002	6,993	5,537	12,241	13,165	11,159	14,234
2001	5,946	5,430	10,222	13,839	14,834	11,937
2000	5,317	5,319	12,199	10,383	11,906	11,338
1999	6,619	4,795	9,588	13,154	13,094	7,737
1998	3,874	4,275	11,130	12,163	11,928	11,268
1997	6,599	5,223	14,496	19,128	12,651	10,655
1996	5,364	4,704	9,546	14,972	15,019	11,778
1995	4,679	5,564	12,293	14,786	19,324	9,719
1994	4,477	5,102	12,165	12,036	14,078	8,775
1993	5,776	4,895	12,359	11,149	13,448	9,587
1992	7,198		10,880	11,809	14,195	12,174
1991	8,550		12,740	15,460	16,833	10,045
1990	7,774		12,628	16,540	13,593	11,756
1989	7,131		13,424	10,644	11,418	10,096
1988	7,232		12,402	12,988	10,963	10,205
1987	7,738		11,042	11,142	10,864	11,646
1986	6,571		10,042	13,760	13,568	9,480
1985	7,960		10,523	11,387	14,725	9,793
1984	8,317		13,192	11,082	14,745	9,327
1983	6,044		13,053	12,735	13,759	9,054
1982	4,739		12,863	12,294	14,197	11,972
1981	5,153		11,249	12,963	14,620	10,897
1980	6,687		13,410	12,343	12,188	11,686
1979	5,970		13,515	15,820	12,934	9,543

1978	7,536	12,648	13,647	11,859	13,033
1977		11,487	14,516	11,428	9,835
1976		11,072	11,541	12,216	9,021
1975		12,608	14,782	13,565	10,607
1974		14,793	11,624	11,450	10,076
1973		13,424	14,614	12,877	10,261
1972		12,432	12,498	12,425	9,443
1971		13,866	12,736	12,658	8,620
1970		12,466	12,775	11,876	10,701
1969		13,489	12,247	12,099	11,159
1968		13,317	13,060	11,848	9,764
1967		12,825	12,065	12,936	9,862
1966		21,242	12,390	11,194	10,738
1965		13,589	12,056	9,137	12,112
1964		17,644	13,533	9,831	12,489
1963		11,754	9,983	10,859	11,969
1962		13,325	16,655		13,208
1961		15,652	12,704		12,432
1960		12,037	14,200		9,833
1959		15,762	12,131		10,850
1958		12,672	13,346		12,663
1957		15,496	11,283		8,295
1956		15,896	12,055		8,989
1955		15,083	11,745		9,307
1954		13,730	11,543		11,357
1953		13,819	11,569		9,387
1952		9,757	12,101		9,483
1951		12,086	12,141		9,101
1950		11,928	10,498		9,445
1949					9,372

Tableau D. Ba/Ca ($\mu\text{mol/mol}$)

Year	300c2	300c3	300sp1	300sp2	300sp3	418c1	418c2
2016	116,28	78,23	35,92	38,60	26,52	68,58	64,25
2015	56,14	87,79	24,95	93,13	19,39	78,56	117,40
2014	41,37	132,71	103,98	54,14	22,63	51,15	48,08
2013	282,76	131,05	63,89	82,18	94,19	32,96	27,27
2012	131,14	116,17	86,41	103,18	78,20	44,31	35,54
2011	80,43	93,16	90,99	105,69	105,68	102,96	49,37
2010	75,49	68,99	68,20	74,76	114,35	100,29	131,15
2009	70,14	83,87	81,48	211,69	176,60	95,00	812,69
2008	51,63	64,85	137,07	133,11	129,30	106,28	275,97
2007	58,23	75,20	115,83	103,49	57,30	121,35	64,83

2006	79,97	115,46	46,82	106,03	77,68	132,46	246,24
2005	62,00	83,46	64,88	169,60	124,29	89,40	172,18
2004	83,68	60,75	125,28	147,25	62,73	163,26	91,90
2003	69,82	69,13	71,84	74,91	66,70	155,50	59,89
2002	57,89	56,45	369,13	206,67	109,72	108,30	148,10
2001	57,25	86,06	83,16	63,78	104,48	99,23	66,52
2000	72,37	47,96	126,12	42,35	106,32	155,44	67,38
1999	56,30	61,27	63,83	47,52	226,82	104,73	60,24
1998	54,74	67,95	155,72	29,96	81,33	81,30	54,11
1997	62,94	50,18	70,88	36,09	164,27	102,26	170,45
1996	50,01	91,01	68,86	39,60	289,01	84,31	135,73
1995	37,91	64,68	125,05	31,44	35,82	52,26	107,02
1994	44,54	56,88	91,55	57,32	26,67	88,80	76,77
1993	30,86	72,34	72,21	32,18	26,36	81,90	95,06
1992	46,08	66,25	49,17	53,46	23,30	53,33	58,91
1991	32,29	41,54	76,80	34,09	34,50	69,41	433,93
1990	37,23	35,05	307,39	32,82	24,01	74,31	71,61
1989	32,95	87,77	59,19	68,74	27,29	60,99	104,85
1988	31,29	58,53	30,06	28,41	78,63	112,28	89,67
1987	26,67	37,81	24,43	28,61		51,52	152,07
1986	31,02	57,10	25,95	39,51		47,14	97,22
1985	56,38	45,27	41,94			79,21	221,52
1984	40,74	38,95	26,48			59,68	38,19
1983	25,35	36,43	22,71			57,79	32,31
1982	29,92	32,28	27,82			41,54	82,96
1981	24,67	41,21				37,44	44,62
1980	21,76	31,33				88,07	33,71
1979	63,07	49,27				50,24	109,53
1978	28,33	36,77				160,27	442,07
1977	53,31	63,97				49,34	142,55
1976	31,38	38,38				114,32	368,60
1975	39,40	172,96				94,80	1052,16
1974	29,21	55,09				103,37	240,89
1973	27,32	36,93				349,18	71,43
1972	25,74	27,86				158,13	69,84
1971	36,58	44,20					
1970	26,26	42,03					
1969	47,03	59,11					
1968	26,81						
1967	35,03						
1966	28,32						
1965	22,38						
1964	36,28						
1963	27,32						
1962	33,75						

1961	26,43					
1960	41,54					
1959	29,29					
1958	16,49					
1957	22,45					
1956	30,38					
1955	44,32					
1954	34,57					
1953	46,63					
1952	37,80					
1951	68,88					
1950	77,46					
1949	129,55					
1948	95,86					
Year	507sp2	507sp3	615c3	615sp2a	615sp2b	615sp3
2016	105,66	159,95	360,06	N/A	631,99	108,46
2015	435,36	431,60	299,16	331,86	690,78	109,26
2014	420,46	283,10	336,12	415,16	368,75	151,16
2013	147,75	208,56	373,99	1027,84	376,72	529,99
2012	386,57	146,59	264,22	514,80	794,97	276,01
2011	386,67	478,88	218,21	329,05	849,86	610,38
2010	261,64	415,99	343,93	202,21	394,42	499,46
2009	148,36	250,34	539,67	179,34	880,45	384,83
2008	110,71	107,00	1159,94	234,59	465,70	560,86
2007	133,34	714,45	417,76	865,29	1286,71	634,66
2006	97,99	400,20	248,06	1308,69	1425,75	442,88
2005	429,21	364,83	418,34	1144,02	885,76	494,27
2004	369,50	187,07	246,90	2409,31	919,44	385,55
2003	378,05	64,07	374,88	407,61	587,09	639,08
2002	168,86	35,28	461,80	576,57	861,39	494,82
2001	110,08	149,81	209,12	2100,78	1599,03	601,84
2000	170,01	141,78	389,04	452,12	975,72	577,66
1999	611,12	30,92	268,47	422,63	389,37	273,67
1998	511,10	29,28	863,38	1131,88	639,69	674,34
1997	238,14	22,54	803,92	571,66	456,54	254,09
1996	342,39	22,80	325,26	1118,40	1267,10	341,08
1995	305,68	36,08	459,82	649,43	1240,86	348,54
1994	108,71	371,19	401,22	390,89	1242,69	491,27
1993	149,52	369,18	280,61	740,72	1071,89	834,09
1992	54,54		365,23	1954,20	243,73	299,29
1991	43,78		406,96	953,95	542,07	502,29
1990	38,98		312,14	948,38	2926,97	337,44
1989	31,10		668,15	625,88	975,44	309,44
1988	53,28		2436,44	1061,51	332,00	374,77
1987	106,01		790,03	922,52	1909,12	363,10

1986	778,01	311,73	850,75	533,58	643,41
1985	100,53	207,55	1448,38	320,14	928,45
1984	67,92	229,03	1143,32	289,86	384,87
1983	58,38	257,76	512,59	219,16	774,38
1982	46,13	708,85	1016,96	512,94	465,70
1981	42,10	211,52	976,12	963,39	963,65
1980	58,08	375,20	899,10	704,67	694,24
1979	72,33	644,56	493,30	203,01	1552,74
1978	188,88	1772,91	2678,82	179,09	955,84
1977		1119,35	1670,86	900,76	1065,51
1976		350,17	618,43	1127,62	300,38
1975		543,43	1229,53	1556,36	597,44
1974		538,34	285,82	333,83	875,45
1973		985,00	197,19	295,85	678,40
1972		1385,13	827,94	466,15	642,66
1971		581,53	884,40	748,98	1174,74
1970		1093,89	258,32	640,96	279,16
1969		1366,65	411,79	974,30	240,21
1968		897,49	760,18	454,86	198,68
1967		530,90	1085,50	1221,92	349,37
1966		2545,16	1105,10	733,18	671,58
1965		1152,88	1447,49	1074,32	395,17
1964		1028,21	2023,90	1196,70	700,81
1963		3154,25	268,44	215,91	237,96
1962		874,51	172,16		156,06
1961		1026,61	269,57		233,34
1960		358,95	445,10		427,45
1959		453,63	628,53		1206,06
1958		306,20	611,79		1534,23
1957		257,22	378,13		376,44
1956		1282,04	779,37		479,83
1955		638,90	412,33		132,41
1954		800,77	335,62		198,58
1953		1029,25	1071,95		781,39
1952		575,81	183,24		636,72
1951		369,86	537,32		566,36
1950		818,79	531,81		169,55
1949					152,90

Annexe 2. Couvert de glace de mer aux localisations de nos sites d'échantillonnage (Walsh et al. 2019).

time	69.00, -56.788 (300)	68.12, -57.76 (418)	70.01, -59.12 (507)	70.5, -59.51 (615)
------	-------------------------	------------------------	------------------------	-----------------------

1953-01-15	94	93	100	100
1953-02-15	95	89	100	100
1953-03-15	97	93	98	98
1953-04-15	86	92	93	93
1953-05-15	57	81	84	88
1953-06-15	28	53	58	67
1953-07-15	7	19	26	35
1953-08-15	0	0	7	11
1953-09-15	0	0	0	0
1953-10-15	0	0	0	0
1953-11-15	0	0	6	7
1953-12-15	50	51	56	57
1954-01-15	100	99	100	100
1954-02-15	100	100	100	100
1954-03-15	100	99	100	100
1954-04-15	88	92	90	90
1954-05-15	59	75	76	79
1954-06-15	26	49	61	69
1954-07-15	5	17	27	34
1954-08-15	0	0	0	0
1954-09-15	0	0	0	0
1954-10-15	0	0	0	0
1954-11-15	0	0	0	0
1954-12-15	50	51	52	52
1955-01-15	100	100	100	100
1955-02-15	100	99	100	100
1955-03-15	100	99	100	100
1955-04-15	92	97	97	98
1955-05-15	82	87	92	92
1955-06-15	42	49	60	63
1955-07-15	12	34	29	31
1955-08-15	11	31	15	13
1955-09-15	0	6	0	0
1955-10-15	0	0	0	0
1955-11-15	8	18	22	25
1955-12-15	17	38	56	64
1956-01-15	59	71	84	90
1956-02-15	100	100	100	100
1956-03-15	98	99	100	100
1956-04-15	75	92	95	98
1956-05-15	55	78	92	96
1956-06-15	35	62	72	79
1956-07-15	10	46	28	36
1956-08-15	6	29	11	15
1956-09-15	0	10	8	9

1956-10-15	0	0	0	0
1956-11-15	25	38	46	48
1956-12-15	75	87	96	98
1957-01-15	100	100	100	100
1957-02-15	96	98	99	99
1957-03-15	91	97	98	99
1957-04-15	81	87	96	98
1957-05-15	52	67	89	94
1957-06-15	28	60	77	85
1957-07-15	31	55	68	73
1957-08-15	18	25	32	33
1957-09-15	0	0	0	0
1957-10-15	0	11	0	0
1957-11-15	29	51	46	50
1957-12-15	76	88	95	98
1958-01-15	100	97	100	100
1958-02-15	100	99	100	100
1958-03-15	100	100	100	100
1958-04-15	95	93	100	100
1958-05-15	63	61	90	93
1958-06-15	24	32	72	81
1958-07-15	9	17	42	50
1958-08-15	0	0	10	12
1958-09-15	0	0	0	0
1958-10-15	0	7	0	0
1958-11-15	39	46	51	53
1958-12-15	87	87	100	100
1959-01-15	100	98	100	100
1959-02-15	100	100	100	100
1959-03-15	93	98	95	95
1959-04-15	73	86	87	89
1959-05-15	68	81	87	88
1959-06-15	66	73	85	83
1959-07-15	55	66	71	63
1959-08-15	28	40	38	33
1959-09-15	0	0	7	8
1959-10-15	0	0	0	0
1959-11-15	0	19	0	5
1959-12-15	53	67	55	55
1960-01-15	94	89	100	100
1960-02-15	95	90	100	100
1960-03-15	96	96	97	98
1960-04-15	84	91	97	97
1960-05-15	74	84	91	92
1960-06-15	75	79	78	78

1960-07-15	42	58	38	36
1960-08-15	0	20	0	0
1960-09-15	0	0	0	0
1960-10-15	0	0	0	0
1960-11-15	0	0	0	0
1960-12-15	29	28	50	52
1961-01-15	79	78	99	100
1961-02-15	100	98	100	100
1961-03-15	100	98	100	100
1961-04-15	83	96	93	95
1961-05-15	45	77	73	79
1961-06-15	19	48	56	62
1961-07-15	8	20	27	29
1961-08-15	0	0	0	0
1961-09-15	0	0	0	0
1961-10-15	0	0	11	13
1961-11-15	22	12	52	60
1961-12-15	68	55	91	96
1962-01-15	89	91	100	100
1962-02-15	83	95	98	99
1962-03-15	80	97	97	99
1962-04-15	78	92	97	99
1962-05-15	53	75	79	83
1962-06-15	23	54	66	73
1962-07-15	12	37	47	54
1962-08-15	0	18	14	17
1962-09-15	0	0	0	0
1962-10-15	0	0	0	0
1962-11-15	0	5	0	6
1962-12-15	32	39	49	52
1963-01-15	49	66	88	94
1963-02-15	59	70	93	97
1963-03-15	89	88	100	100
1963-04-15	72	84	79	80
1963-05-15	53	69	75	77
1963-06-15	46	70	76	81
1963-07-15	24	63	41	44
1963-08-15	12	49	21	24
1963-09-15	0	25	15	21
1963-10-15	0	5	7	8
1963-11-15	0	11	0	0
1963-12-15	41	54	53	55
1964-01-15	90	97	100	100
1964-02-15	96	98	98	98
1964-03-15	61	85	86	92

1964-04-15	65	87	89	95
1964-05-15	95	94	95	95
1964-06-15	64	67	84	85
1964-07-15	28	35	54	55
1964-08-15	18	27	22	16
1964-09-15	9	14	7	0
1964-10-15	11	22	24	24
1964-11-15	20	37	50	51
1964-12-15	19	32	61	70
1965-01-15	61	67	85	92
1965-02-15	100	99	100	100
1965-03-15	98	99	100	100
1965-04-15	61	77	88	93
1965-05-15	35	59	82	88
1965-06-15	32	50	64	67
1965-07-15	10	25	33	40
1965-08-15	0	7	16	25
1965-09-15	0	0	5	11
1965-10-15	0	16	11	16
1965-11-15	9	39	28	36
1965-12-15	35	64	66	74
1966-01-15	73	88	90	91
1966-02-15	89	95	92	91
1966-03-15	95	97	100	100
1966-04-15	93	94	100	100
1966-05-15	75	78	92	93
1966-06-15	71	68	87	90
1966-07-15	46	49	67	68
1966-08-15	9	20	27	27
1966-09-15	0	5	6	6
1966-10-15	0	0	0	0
1966-11-15	7	22	27	31
1966-12-15	57	72	77	81
1967-01-15	97	98	100	100
1967-02-15	96	98	98	98
1967-03-15	96	98	93	93
1967-04-15	97	98	96	96
1967-05-15	96	92	100	100
1967-06-15	65	66	87	89
1967-07-15	24	34	58	65
1967-08-15	5	10	21	25
1967-09-15	0	0	0	0
1967-10-15	9	19	24	25
1967-11-15	57	62	74	74
1967-12-15	98	93	100	100

1968-01-15	100	100	100	100
1968-02-15	100	100	100	100
1968-03-15	100	100	100	100
1968-04-15	94	94	99	99
1968-05-15	84	86	96	97
1968-06-15	58	73	84	86
1968-07-15	21	32	52	55
1968-08-15	0	0	16	16
1968-09-15	0	0	0	0
1968-10-15	0	0	0	0
1968-11-15	23	18	32	31
1968-12-15	63	63	82	81
1969-01-15	90	95	100	100
1969-02-15	96	97	100	100
1969-03-15	93	95	95	95
1969-04-15	87	83	89	90
1969-05-15	64	65	87	90
1969-06-15	45	51	68	72
1969-07-15	24	34	33	35
1969-08-15	10	25	22	21
1969-09-15	8	26	16	14
1969-10-15	0	15	15	19
1969-11-15	19	28	54	60
1969-12-15	68	77	91	93
1970-01-15	100	100	100	100
1970-02-15	100	97	100	100
1970-03-15	93	92	95	95
1970-04-15	90	90	90	90
1970-05-15	87	84	91	92
1970-06-15	82	78	90	92
1970-07-15	50	57	79	86
1970-08-15	10	18	38	45
1970-09-15	0	0	0	0
1970-10-15	9	17	24	25
1970-11-15	30	55	63	68
1970-12-15	64	83	89	93
1971-01-15	93	95	100	100
1971-02-15	100	100	100	100
1971-03-15	94	94	95	95
1971-04-15	79	78	88	89
1971-05-15	61	71	84	89
1971-06-15	41	59	72	79
1971-07-15	22	35	54	58
1971-08-15	9	23	34	40
1971-09-15	0	10	12	16

1971-10-15	0	0	21	25
1971-11-15	14	32	51	59
1971-12-15	60	80	80	84
1972-01-15	100	100	100	100
1972-02-15	100	99	100	100
1972-03-15	100	97	100	100
1972-04-15	93	90	100	100
1972-05-15	76	80	94	95
1972-06-15	48	58	79	80
1972-07-15	19	23	52	57
1972-08-15	0	0	18	22
1972-09-15	0	0	0	0
1972-10-15	0	0	0	0
1972-11-15	20	35	35	35
1972-12-15	63	78	78	80
1973-01-15	86	89	90	90
1973-02-15	90	92	95	95
1973-03-15	96	95	100	100
1973-04-15	92	93	100	100
1973-05-15	73	79	100	100
1973-06-15	42	39	82	85
1973-07-15	17	16	55	64
1973-08-15	0	11	24	31
1973-09-15	0	0	0	0
1973-10-15	0	0	0	0
1973-11-15	13	0	33	38
1973-12-15	43	38	79	86
1974-01-15	80	85	96	98
1974-02-15	100	99	100	100
1974-03-15	96	96	100	100
1974-04-15	90	95	100	100
1974-05-15	79	85	100	100
1974-06-15	54	54	87	89
1974-07-15	19	18	46	50
1974-08-15	0	0	8	10
1974-09-15	0	0	0	0
1974-10-15	0	0	0	0
1974-11-15	16	20	35	39
1974-12-15	66	70	85	89
1975-01-15	100	100	100	100
1975-02-15	100	96	100	100
1975-03-15	91	91	100	100
1975-04-15	86	90	99	100
1975-05-15	71	77	94	94
1975-06-15	30	35	59	62

1975-07-15	0	7	16	21
1975-08-15	0	0	0	0
1975-09-15	0	0	0	0
1975-10-15	0	0	0	0
1975-11-15	7	7	27	34
1975-12-15	52	56	77	83
1976-01-15	89	91	95	95
1976-02-15	94	92	95	95
1976-03-15	100	100	100	100
1976-04-15	95	94	100	100
1976-05-15	77	78	100	100
1976-06-15	43	36	81	85
1976-07-15	13	14	48	54
1976-08-15	6	21	18	21
1976-09-15	0	10	0	0
1976-10-15	0	0	15	22
1976-11-15	9	0	51	64
1976-12-15	36	14	83	91
1977-01-15	76	57	97	100
1977-02-15	94	91	95	95
1977-03-15	91	91	95	95
1977-04-15	89	89	100	100
1977-05-15	73	77	94	95
1977-06-15	55	57	88	89
1977-07-15	25	24	62	70
1977-08-15	0	0	19	27
1977-09-15	0	0	0	0
1977-10-15	0	0	16	20
1977-11-15	10	0	44	53
1977-12-15	48	40	80	85
1978-01-15	87	88	100	100
1978-02-15	97	95	100	100
1978-03-15	96	92	100	100
1978-04-15	89	93	100	100
1978-05-15	73	78	94	95
1978-06-15	34	41	67	74
1978-07-15	0	9	33	45
1978-08-15	0	0	11	17
1978-09-15	0	0	0	0
1978-10-15	0	0	15	19
1978-11-15	10	26	96	99
1978-12-15	9	87	97	99
1979-01-15	100	98	97	97
1979-02-15	84	96	94	96
1979-03-15	95	97	100	100

1979-04-15	33	100	95	96
1979-05-15	69	85	100	100
1979-06-15	0	0	92	97
1979-07-15	0	0	43	49
1979-08-15	0	0	0	0
1979-09-15	0	0	0	0
1979-10-15	0	0	0	0
1979-11-15	0	0	0	24
1979-12-15	12	39	85	95
1980-01-15	49	93	97	94
1980-02-15	94	97	100	100
1980-03-15	95	100	97	98
1980-04-15	93	100	98	100
1980-05-15	76	99	100	98
1980-06-15	5	52	97	100
1980-07-15	0	0	50	47
1980-08-15	0	0	0	0
1980-09-15	0	0	0	0
1980-10-15	0	0	0	0
1980-11-15	0	0	0	0
1980-12-15	10	38	94	99
1981-01-15	96	100	98	100
1981-02-15	98	94	99	100
1981-03-15	100	100	94	96
1981-04-15	99	100	99	100
1981-05-15	48	99	98	96
1981-06-15	0	40	67	65
1981-07-15	0	0	0	0
1981-08-15	0	0	0	0
1981-09-15	0	0	0	0
1981-10-15	0	0	0	0
1981-11-15	0	0	40	65
1981-12-15	39	83	93	99
1982-01-15	95	100	100	99
1982-02-15	100	100	100	100
1982-03-15	100	100	100	100
1982-04-15	98	95	100	100
1982-05-15	97	99	100	99
1982-06-15	0	72	99	98
1982-07-15	0	0	41	23
1982-08-15	0	0	0	0
1982-09-15	0	0	0	0
1982-10-15	0	0	0	0
1982-11-15	7	44	67	81
1982-12-15	98	100	96	98

1983-01-15	100	98	99	100
1983-02-15	99	100	98	99
1983-03-15	99	100	100	100
1983-04-15	100	100	100	100
1983-05-15	95	99	99	99
1983-06-15	76	99	83	83
1983-07-15	0	0	41	11
1983-08-15	0	0	0	0
1983-09-15	0	0	0	0
1983-10-15	0	0	0	0
1983-11-15	0	28	19	61
1983-12-15	98	98	97	96
1984-01-15	100	100	100	100
1984-02-15	100	100	100	100
1984-03-15	100	99	100	100
1984-04-15	97	100	99	99
1984-05-15	85	96	100	100
1984-06-15	38	81	100	100
1984-07-15	0	17	73	67
1984-08-15	0	0	0	0
1984-09-15	0	0	0	0
1984-10-15	0	0	0	0
1984-11-15	0	0	28	35
1984-12-15	68	100	98	99
1985-01-15	97	95	100	100
1985-02-15	98	99	100	99
1985-03-15	100	100	100	100
1985-04-15	100	100	100	100
1985-05-15	53	82	90	92
1985-06-15	0	13	49	50
1985-07-15	0	0	0	0
1985-08-15	0	0	0	0
1985-09-15	0	0	0	0
1985-10-15	0	0	0	0
1985-11-15	5	0	10	12
1985-12-15	0	6	85	96
1986-01-15	64	99	98	100
1986-02-15	32	96	99	98
1986-03-15	100	100	98	98
1986-04-15	96	100	100	99
1986-05-15	47	97	100	97
1986-06-15	0	37	80	87
1986-07-15	0	0	27	31
1986-08-15	0	0	0	0
1986-09-15	0	0	0	0

1986-10-15	0	0	0	0
1986-11-15	0	14	78	89
1986-12-15	92	99	99	100
1987-01-15	97	99	97	98
1987-02-15	99	100	99	100
1987-03-15	100	97	98	99
1987-04-15	97	99	100	100
1987-05-15	97	100	99	100
1987-06-15	22	53	75	79
1987-07-15	0	0	19	33
1987-08-15	0	0	0	0
1987-09-15	0	0	0	0
1987-10-15	0	0	0	0
1987-11-15	0	0	54	76
1987-12-15	4	43	95	98
1988-01-15	100	100	100	100
1988-02-15	98	100	99	100
1988-03-15	100	100	99	100
1988-04-15	95	99	100	100
1988-05-15	97	100	100	100
1988-06-15	5	39	82	80
1988-07-15	0	0	0	20
1988-08-15	0	0	0	0
1988-09-15	0	0	0	0
1988-10-15	0	0	0	0
1988-11-15	0	37	44	55
1988-12-15	44	94	98	97
1989-01-15	100	100	100	100
1989-02-15	100	100	100	100
1989-03-15	100	100	100	100
1989-04-15	100	100	100	100
1989-05-15	86	95	97	99
1989-06-15	23	73	98	100
1989-07-15	0	0	71	75
1989-08-15	0	0	0	0
1989-09-15	0	0	0	0
1989-10-15	0	0	0	0
1989-11-15	0	0	83	96
1989-12-15	46	94	98	99
1990-01-15	93	97	97	93
1990-02-15	100	100	100	100
1990-03-15	97	99	100	100
1990-04-15	98	94	97	98
1990-05-15	90	92	97	97
1990-06-15	33	65	95	97

1990-07-15	0	0	0	0
1990-08-15	0	0	0	0
1990-09-15	0	0	0	0
1990-10-15	0	0	0	0
1990-11-15	0	56	88	95
1990-12-15	98	99	97	97
1991-01-15	97	96	99	100
1991-02-15	98	98	100	99
1991-03-15	100	100	100	100
1991-04-15	100	100	100	100
1991-05-15	99	97	93	93
1991-06-15	86	96	94	93
1991-07-15	0	0	0	0
1991-08-15	0	0	0	0
1991-09-15	0	0	0	0
1991-10-15	0	0	0	0
1991-11-15	0	46	83	93
1991-12-15	55	97	100	100
1992-01-15	100	100	100	100
1992-02-15	100	100	100	100
1992-03-15	100	100	100	100
1992-04-15	96	99	100	100
1992-05-15	90	97	100	100
1992-06-15	78	98	99	98
1992-07-15	7	22	82	78
1992-08-15	0	0	0	0
1992-09-15	0	0	0	0
1992-10-15	0	0	0	0
1992-11-15	0	0	58	71
1992-12-15	90	100	100	100
1993-01-15	100	100	100	100
1993-02-15	99	100	100	100
1993-03-15	100	100	100	100
1993-04-15	100	97	100	100
1993-05-15	96	100	95	96
1993-06-15	12	86	100	100
1993-07-15	0	0	41	51
1993-08-15	0	0	0	0
1993-09-15	0	0	0	0
1993-10-15	0	0	0	0
1993-11-15	38	96	99	98
1993-12-15	96	95	94	96
1994-01-15	97	96	97	99
1994-02-15	100	99	100	100
1994-03-15	100	100	100	100

1994-04-15	98	96	100	100
1994-05-15	100	100	100	100
1994-06-15	18	79	96	97
1994-07-15	0	32	0	0
1994-08-15	0	0	0	0
1994-09-15	0	0	0	0
1994-10-15	0	0	0	0
1994-11-15	0	0	0	0
1994-12-15	57	93	96	97
1995-01-15	99	99	99	100
1995-02-15	99	100	100	100
1995-03-15	97	98	99	100
1995-04-15	96	97	99	99
1995-05-15	85	65	100	100
1995-06-15	0	13	82	81
1995-07-15	0	21	0	0
1995-08-15	0	0	0	0
1995-09-15	0	0	0	0
1995-10-15	0	0	0	0
1995-11-15	0	0	3	25
1995-12-15	94	100	100	100
1996-01-15	95	96	99	100
1996-02-15	100	100	100	100
1996-03-15	98	96	100	100
1996-04-15	99	96	100	100
1996-05-15	100	100	100	100
1996-06-15	46	58	96	100
1996-07-15	0	0	82	76
1996-08-15	0	0	52	46
1996-09-15	0	0	0	0
1996-10-15	0	0	0	0
1996-11-15	1	0	96	99
1996-12-15	0	0	95	97
1997-01-15	11	60	99	100
1997-02-15	100	96	100	100
1997-03-15	98	97	100	100
1997-04-15	98	98	100	100
1997-05-15	70	98	100	100
1997-06-15	0	0	91	72
1997-07-15	0	0	31	24
1997-08-15	0	0	0	0
1997-09-15	0	0	0	0
1997-10-15	0	0	0	0
1997-11-15	0	0	27	59
1997-12-15	9	44	95	93

1998-01-15	100	100	100	100
1998-02-15	97	97	97	98
1998-03-15	99	99	100	100
1998-04-15	98	100	99	100
1998-05-15	61	85	95	100
1998-06-15	0	31	55	74
1998-07-15	0	0	0	0
1998-08-15	0	0	0	0
1998-09-15	0	0	0	0
1998-10-15	0	0	0	0
1998-11-15	0	0	0	0
1998-12-15	0	0	59	94
1999-01-15	52	97	100	100
1999-02-15	100	100	100	100
1999-03-15	100	100	100	100
1999-04-15	92	95	100	100
1999-05-15	95	97	100	100
1999-06-15	14	80	100	96
1999-07-15	0	0	36	36
1999-08-15	0	0	0	0
1999-09-15	0	0	0	0
1999-10-15	0	0	0	0
1999-11-15	0	0	75	96
1999-12-15	54	87	95	97
2000-01-15	88	93	96	96
2000-02-15	96	100	100	100
2000-03-15	100	100	100	100
2000-04-15	97	100	98	96
2000-05-15	53	95	97	100
2000-06-15	0	51	60	91
2000-07-15	0	0	0	0
2000-08-15	0	0	0	0
2000-09-15	0	0	0	0
2000-10-15	0	0	0	0
2000-11-15	0	0	2	26
2000-12-15	0	14	66	48
2001-01-15	94	99	100	100
2001-02-15	100	100	100	100
2001-03-15	100	100	100	100
2001-04-15	95	100	97	97
2001-05-15	91	100	96	98
2001-06-15	0	0	98	95
2001-07-15	0	0	0	0
2001-08-15	0	0	0	0
2001-09-15	0	0	0	0

2001-10-15	0	0	0	0
2001-11-15	0	0	0	0
2001-12-15	53	97	95	98
2002-01-15	81	96	97	100
2002-02-15	95	96	98	98
2002-03-15	100	100	100	100
2002-04-15	97	100	100	100
2002-05-15	62	80	96	96
2002-06-15	0	0	0	0
2002-07-15	0	0	0	0
2002-08-15	0	0	0	0
2002-09-15	0	0	0	0
2002-10-15	0	0	0	0
2002-11-15	0	0	0	0
2002-12-15	0	0	31	50
2003-01-15	6	66	92	96
2003-02-15	100	93	100	100
2003-03-15	95	99	100	100
2003-04-15	99	100	100	100
2003-05-15	93	100	100	100
2003-06-15	9	60	91	87
2003-07-15	0	0	0	0
2003-08-15	0	0	0	0
2003-09-15	0	0	0	0
2003-10-15	0	0	0	0
2003-11-15	0	0	0	0
2003-12-15	9	49	94	97
2004-01-15	53	94	100	100
2004-02-15	93	96	95	95
2004-03-15	100	100	100	100
2004-04-15	94	97	100	100
2004-05-15	61	59	94	99
2004-06-15	0	0	94	90
2004-07-15	0	0	0	0
2004-08-15	0	0	0	0
2004-09-15	0	0	0	0
2004-10-15	0	0	0	0
2004-11-15	0	0	24	72
2004-12-15	0	32	99	99
2005-01-15	99	100	100	100
2005-02-15	93	95	100	100
2005-03-15	62	37	100	100
2005-04-15	96	97	100	95
2005-05-15	84	92	100	100
2005-06-15	0	0	68	71

2005-07-15	0	0	0	0
2005-08-15	0	0	0	0
2005-09-15	0	0	0	0
2005-10-15	0	0	0	0
2005-11-15	0	0	0	0
2005-12-15	0	12	62	71
2006-01-15	90	100	100	100
2006-02-15	91	99	95	95
2006-03-15	90	100	100	100
2006-04-15	92	97	100	100
2006-05-15	37	48	88	94
2006-06-15	0	0	68	62
2006-07-15	0	0	0	0
2006-08-15	0	0	0	0
2006-09-15	0	0	0	0
2006-10-15	0	0	0	0
2006-11-15	0	0	0	0
2006-12-15	0	55	92	95
2007-01-15	99	100	100	100
2007-02-15	100	100	98	100
2007-03-15	100	100	100	100
2007-04-15	100	100	100	100
2007-05-15	46	97	100	100
2007-06-15	8	23	67	67
2007-07-15	0	0	0	0
2007-08-15	0	0	0	0
2007-09-15	0	0	0	0
2007-10-15	0	0	0	0
2007-11-15	0	0	0	0
2007-12-15	0	0	48	76
2008-01-15	99	100	100	100
2008-02-15	96	100	100	100
2008-03-15	97	99	100	100
2008-04-15	100	100	100	100
2008-05-15	67	87	100	100
2008-06-15	0	34	66	59
2008-07-15	0	0	13	0
2008-08-15	0	0	0	0
2008-09-15	0	0	0	0
2008-10-15	0	0	0	0
2008-11-15	0	0	38	68
2008-12-15	61	80	95	98
2009-01-15	97	100	98	94
2009-02-15	97	94	100	94
2009-03-15	100	93	100	97

2009-04-15	97	100	95	97
2009-05-15	86	92	96	95
2009-06-15	0	24	50	42
2009-07-15	0	0	0	0
2009-08-15	0	0	0	0
2009-09-15	0	0	0	0
2009-10-15	0	0	0	0
2009-11-15	0	0	0	0
2009-12-15	0	46	61	82
2010-01-15	30	84	95	98
2010-02-15	100	100	100	100
2010-03-15	100	99	100	100
2010-04-15	97	99	99	100
2010-05-15	86	100	84	86
2010-06-15	0	0	0	0
2010-07-15	0	0	0	0
2010-08-15	0	0	0	0
2010-09-15	0	0	0	0
2010-10-15	0	0	0	0
2010-11-15	0	0	0	0
2010-12-15	0	0	23	57
2011-01-15	0	0	23	67
2011-02-15	0	0	77	94
2011-03-15	85	91	93	100
2011-04-15	97	100	100	100
2011-05-15	67	83	98	98
2011-06-15	9	44	63	63
2011-07-15	0	0	22	0
2011-08-15	0	0	0	0
2011-09-15	0	0	0	0
2011-10-15	0	0	0	0
2011-11-15	0	0	3	40
2011-12-15	9	56	88	92
2012-01-15	95	100	99	97
2012-02-15	96	100	100	100
2012-03-15	96	99	100	100
2012-04-15	98	97	99	100
2012-05-15	91	100	100	100
2012-06-15	0	22	76	67
2012-07-15	0	0	0	0
2012-08-15	0	0	0	0
2012-09-15	0	0	0	0
2012-10-15	0	0	0	0
2012-11-15	0	0	0	0
2012-12-15	10	26	82	73

2013-01-15	97	100	99	99
2013-02-15	96	100	98	98
2013-03-15	97	96	100	100
2013-04-15	100	100	93	96
2013-05-15	92	100	99	94
2013-06-15	9	51	95	93
2013-07-15	0	0	0	0
2013-08-15	0	0	0	0
2013-09-15	0	0	0	0
2013-10-15	0	0	0	0
2013-11-15	0	0	0	12
2013-12-15	0	37	77	85