

UQAR

Université du Québec
à Rimouski

Utilisation du bivalve *Portlandia arctica* comme indicateur de variations environnementales dans deux fjords du Nunatsiavut (Labrador, Canada)

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en Océanographie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© KATRINE CHALUT

Décembre 2014

Composition du jury :

Réjean Tremblay, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Philippe Archambault, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Christian Nozais, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Frédéric Olivier, examinateur externe, Muséum National d'Histoire Naturelle

Dépôt initial le 14 mars 2014

Dépôt final le 18 décembre 2014

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski 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 Rimouski 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.

‘As if we could not count, in the shells of cockles and snails, the years and months of their life, as we do in the horns of bulls and oxen and in the branches of plants...’

-Leonardo da Vinci

REMERCIEMENTS

En préambule à ce mémoire, j'aimerais remercier tous ceux et celles qui m'ont aidé à braver la tempête, contre vents et marées, sans jamais même songer à quitter le bateau. Leur soutien et leur ténacité m'ont permis de m'accrocher en espérant le retour de jours meilleurs.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Philippe Archambault, pour la confiance témoignée lors de la proposition de maîtrise originelle... et de toutes les subséquentes! Sa foi en mes capacités m'a encouragée à tenir bon, au même titre que son immuable optimisme. Merci également à mon co-directeur, Christian Nozais pour son soutien inconditionnel de même que sa générosité, ininterrompue malgré les nombreux changements de desseins.

Un merci tout spécial à Virginie Roy, sans qui ce projet n'aurait probablement jamais vu le jour. Conseillère inestimable, elle a su prendre le temps de répondre à mes nombreuses interrogations et calmer mes inquiétudes, nonobstant ses propres angoisses doctorales. Je dois en outre beaucoup à Blandine Gaillard et Frédéric Olivier qui m'ont donné un énorme coup de main, de par leur encadrement, offert lors d'une alphabétisation accélérée des techniques de base employées en sclérochronologie. Merci également à Annie Séguin, qui malgré la distance, m'a grandement aidée à surmonter maintes embûches statistiques. Mes plus sincères remerciements s'adressent en outre à Adrien Lambert et Paul Nicot, de même qu'à Dominic Arseneault.

Merci à Mariève Bouchard Marmen et Cindy Grant qui m'ont accompagnée jusqu'au pays des ours polaires pour m'aider sur le terrain. Leur présence m'a permis de garder le moral alors que s'amorçait insidieusement la décadence du projet. Merci également au capitaine et à l'équipage du *CCGS Henry Larsen 2012*, de même qu'à leur imposante sélection cinématographique, laquelle a su hisser à son paroxysme nos acquis filmiques. Mes plus sincères remerciements s'adressent pareillement à Heike Link et Bruno Cayouette, sans oublier Jonathan Gagnon qui, malgré son affiliation à l'Université Laval, m'est venu en aide plus d'une fois au cours de ma maîtrise.

Je tiens à remercier les regroupements scientifiques ArcticNet, CHONE (Canadian Healthy Ocean Network) et Québec-Océan qui, par leur support financier, m'ont notamment permis de présenter mon projet lors du congrès international ICES (International Council for the Exploration of the Sea) en Islande et ainsi d'échanger avec des chercheurs et des étudiants issus d'autres instituts de recherche et universités.

Un immense merci à tous mes amis et collègues pour leurs encouragements et leur support moral, notamment Èva, Florence, Stéphanie, Marilyne et Marie-Josée. Sorties, coups de téléphone et moments de pur délire: chacun des moyens mis de l'avant pour me changer les idées m'a permis de conserver un certain équilibre dans cette course au diplôme. Un merci tout particulier à Eliott, qui ne m'a jamais laissée tomber.

Ces remerciements seraient certes incomplets sans une pensée pour ma famille, sans laquelle l'aboutissement de ce projet se serait avéré inconcevable. Que ce soit par une bonne blague de mémé dans les orties, un solo exécuté sous forme de gigue de la joie, ou encore par un marathon d'anecdotes, soeurette et parents ont toujours su me redonner le sourire et l'énergie nécessaire pour traverser les moments difficiles. Nonobstant la distance, ils auront vécu, eux aussi, les aléas de cette maîtrise.

AVANT-PROPOS

C'est malheureux de s'égarer; outre le déséquilibre qu'engendre la perte d'objectifs consciencieusement élaborés, c'est la remise en question concernant notre implication personnelle qui étouffe le dynamisme originel, nous poussant à douter de notre raison d'avancer. Les aléas de la maîtrise, je les ai pleinement vécus.

Débuté à l'automne 2011, ce projet de maîtrise devait initialement porter sur la variabilité des communautés benthiques et de la minéralisation de la matière organique du détroit de Davis à la Baie de Baffin, dans l'Arctique canadien. Toutefois, compte tenu des importants travaux effectués sur le navire de la Garde Côtière canadienne *Hudson*, à bord duquel devait être effectué l'échantillonnage au cours de l'été (solution envisagée étant donné la mise en cale sèche du *NGCC Amundsen*), le projet a dû être repensé afin de s'harmoniser avec le nouveau plan de mission émis. Un plan d'échantillonnage a ainsi été élaboré, le nouveau projet visant à étudier l'impact des différentes densités de coraux d'eau froide sur le fonctionnement de l'écosystème benthique arctique. Matière organique et particulaire en suspension, pigments sédimentaires, granulométrie, isotopes sur la méiofaune et la macrofaune, incubations à partir de carottiers à boîte, ammonium et nutriments: tout a été méticuleusement planifié pour l'échantillonnage d'une trentaine de stations. Au mois de juin 2012, la mobilisation du brise-glace *Henry Larsen* a été réalisée et la campagne d'échantillonnage à bord du navire s'est tenue au cœur de la Baie de Baffin aux mois de septembre et d'octobre. La campagne n'a toutefois pu être menée à terme, compte tenu des nombreux imprévus et intempéries survenus au cours de la mission. Au mois de novembre, un nouveau projet a ainsi été créé, inspiré des échantillons récoltés en 2010 à bord de l'*Amundsen*, portant sur l'étude de la mégafaune des fjords subarctiques.

Contraint par le nombre limité d'échantillons, ce projet a par la suite été mis de côté au mois de janvier 2013 pour faire place à un dessein novateur, soit l'utilisation du bivalve *Portlandia arctica* comme indicateur de variations environnementales au cœur des fjords du Nunatsiavut (Labrador, Canada). C'est sur ce dernier projet, concrètement entamé au mois de mars 2013, que porte ce mémoire.

À tous ceux qui doutent du bien-fondé de la loi de Murphy: ne prenez rien pour acquis.

RÉSUMÉ

À l'ère des changements environnementaux globaux, peu d'outils permettent d'évaluer l'ampleur des perturbations subies par le compartiment benthique des hautes latitudes et ce, sur une période s'échelonnant de la décennie au siècle. Dès lors, certains indicateurs biologiques tels que les bivalves constituent une ressource inestimable lors des reconstructions rétrospectives des conditions environnementales. Cette étude évalue l'impact des variations environnementales sur la dynamique de croissance annuelle de mollusques bivalves au moyen de la sclérochronologie. Des coquilles du mollusque dépositivore *Portlandia arctica* provenant de deux fjords du Nunatsiavut, exposés ou non à un glacier, ont ainsi été étudiées. Compte tenu des perturbations anticipées au sein d'un fjord soumis à l'influence d'une masse glaciaire, l'hypothèse générale soutenue était que *P. arctica* devrait présenter une dynamique de croissance variable, voire ralentie, lorsqu'évoluant au coeur d'un tel environnement, comparativement à un fjord dépourvu de glacier. Des coquilles ont été ainsi récoltées en octobre 2010 au sein des fjords subarctiques Nachvak (avec masse glaciaire) ($n = 31$) et Saglek (sans masse glaciaire) ($n = 30$) (Nord du Labrador), puis leurs stries de croissance ont été analysées. Les taux de croissance annuels établis révèlent une différence significative entre les fjords ($F_{1,21} = 5,59$; $p = 0,028$). Cette disparité est potentiellement imputable aux apports en nourriture (phytodétritus), lesquels s'avèrent significativement plus élevés au coeur de Saglek, malgré des caractéristiques environnementales similaires entre les fjords. Par ailleurs, alors que les indices de croissance standardisés semblent être expliqués par diverses combinaisons de facteurs environnementaux à l'échelle locale, les patrons de croissance ne sont pas corrélés à l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA) à l'échelle régionale. Réagissant aux perturbations environnementales, *P. arctica* pourrait somme toute constituer un indicateur fiable quant à la variabilité temporelle, permettant en outre des comparaisons à grande échelle spatiale.

Mots clés: Sclérochronologie, variabilité environnementale, fjords du Nunatsiavut, glacier, *Portlandia arctica*

ABSTRACT

In an era of global environmental change, few tools enable to assess the extent of the disturbances affecting high latitudes benthic fauna from decadal to centennial time scales. Biological proxies such as bivalves are of an inestimable value for retrospective reconstructions of environmental conditions. This study assessed the impact of environmental variations on annual growth dynamics of bivalve molluscs by means of sclerochronology. Shells of the deposit feeder *Portlandia arctica* originating from two Nunatsiavut fjords, glaciated or not, were thus studied. Given the expected disturbances within a glaciated fjord, the general hypothesis was that *P. arctica* should present variable or even slowed down dynamics of growth while developing in such an environment, compared to an un glaciated fjord. Shells were collected in October 2010 within the subarctic fjords Nachvak (glaciated) (n = 31) and Saglek (unglaciated) (n = 30) (Northern Labrador) and growth layers were analyzed. The established annual growth rates revealed a significant difference between the fjords ($F_{1,21} = 5.59$, $p = 0.028$). Such disparity was potentially due to food inputs (phytodetritus) which appeared to be significantly higher within Saglek, despite similar environmental characteristics between the fjords. Moreover, while standardized growth indices could be explained by various combinations of environmental factors at a local scale, growth patterns could not be correlated with the North Atlantic Oscillation (NAO) on a regional level. While responding to environmental disturbances, *P. arctica* could be used as a reliable proxy for temporal variability, allowing further large-scale comparisons.

Keywords: Sclerochronology, environmental variability, Nunatsiavut fjords, glacier, *Portlandia arctica*

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ix
AVANT-PROPOS	xiii
RÉSUMÉ	xvii
ABSTRACT	xix
LISTE DES TABLEAUX	xxv
LISTE DES FIGURES	xxvii
CHAPITRE 1. INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 Les types de suivis environnementaux	1
1.2 L'analyse biocénotique comme appréciation globale de la santé de l'écosystème	3
1.3 Notions de base en sclérochronologie	4
1.4 <i>P. arctica</i> comme indicateur biologique	6
1.5 Les fjords du Nunatsiavut, «notre beau pays»	6
1.6 Objectif et hypothèses	8
CHAPITRE 2. USING THE BIVALVE <i>PORTLANDIA ARCTICA</i> AS AN INDICATOR OF ENVIRONMENTAL VARIATIONS WITHIN GLACIATED AND UNGLACIATED FJORDS (LABRADOR, CANADA)	11
2.1 Introduction	11
2.2 Material and methods	14

2.3 Results	21
2.4 Discussion	25
2.5 Conclusion.....	30
CHAPITRE 3. CONCLUSION GÉNÉRALE	33
3.1 Échelles spatiales et facteurs environnementaux	33
3.2 Perspectives de recherche.....	34
ANNEXE.....	37
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Détail des emplacements des deux sites d'échantillonnage de <i>Portlandia arctica</i> au sein des fjords du Nunatsiavut	16
Tableau 2 : Conditions environnementales mesurées au sein des fjords Nachvak et Saglek les 24 et 25 octobre 2010	21
Tableau 3 : Résultats de l'ANOVA à mesures répétées testant l'effet du site, de l'année et de leur interaction sur les largeurs d'incrément transformées à l'aide d'un ln et sur les indices de croissance standardisés	24
Tableau 4 : Résultats de la régression multiple, mettant en évidence le meilleur modèle pour chaque fjord	24

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Coupe transversale d'une coquille de <i>Portlandia arctica</i>	5
Figure 2 : Profil longitudinal d'un fjord et ses apports sédimentaires.	7
Figure 3 : Emplacement des sites d'échantillonnage, au sein de deux fjords du Nunatsiavut (Labrador, Canada)	15
Figure 4 : Largeurs d'incréments moyennées par fjord entre les années 1992 et 2010 et indices de croissance obtenus suite à la standardisation des séries	23

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les preuves ne sont plus à fournir : l’empreinte de l’Homme sur son environnement est plus forte que jamais et l’évidence indiscutable de cette anthropisation croissante aiguille bon nombre de suivis environnementaux. Que ce soit pour mieux comprendre certains processus naturels ou encore établir un point de comparaison essentiel advenant l’introduction d’une quelconque perturbation, la collecte standardisée de données à intervalles de temps réguliers est devenue incontournable (Spellerberg, 2005). Bien qu’autrefois centré sur certains paramètres abiotiques tels que la température, la salinité, les courants et les nutriments, le suivi environnemental implique désormais une composante biologique, utilisée pour obtenir de plus amples informations, notamment concernant la distribution, les mécanismes de transport et le devenir de contaminants et de polluants, et ainsi permettre de mettre en relation certains stress environnementaux et la réponse de l’écosystème (Dame, 2012).

1.1 Les types de suivis environnementaux

Décrit en quatre catégories par Vaughan *et al.* (2001), le suivi environnemental peut être effectué (i) de façon simple, en enregistrant les valeurs d’une seule variable en un point donné dans le temps; (ii) de façon intégrée, en utilisant un ensemble d’informations écologiques détaillées; (iii) de façon substituée, en employant des informations de remplacement afin de compenser le manque de suivis antérieurs et extrapoler quant aux

changements induits; et (iii) au moyen d'études, permettant de pallier à une absence de données historiques advenant un problème environnemental touchant une région particulière. Ce type de suivi se caractérise notamment par un survol de l'ensemble des conditions environnementales mesurées au sein de la région affectée, lequel est ensuite comparé aux conditions extérieures à cette région. Nonobstant une augmentation du nombre de programmes de suivis environnementaux et écologiques instaurés depuis la fin des années 1980, certains problèmes d'ordre logistique et monétaire subsistent, freinant par conséquent leur expansion (Spellerberg, 2005). En effet, l'établissement d'états de référence biologique relatifs à un écosystème nécessite bon nombre d'observations et de périodes d'échantillonnages à diverses échelles de temps, allant de la saison à la décennie (Carroll *et al.*, 2009). Toutefois, compte tenu du caractère éloigné et difficilement accessible de certains écosystèmes marins, notamment au coeur des hautes latitudes, et d'une saisonnalité particulièrement marquée de ces régions (Carmack et Wassmann, 2006), les échelles d'observation souhaitées se concilient rarement avec les plans d'échantillonnage traditionnels appliqués en biologie marine, lesquels fournissent une vue d'ensemble du système plutôt limitée dans le temps et l'espace (Carroll *et al.*, 2009). En outre, à l'ère des changements climatiques, les conséquences d'un réchauffement particulièrement accru de ces régions soulignent l'importance de suivis environnementaux rigoureux, notamment dans le but d'anticiper les effets dommageables de changements considérables (Usher, 2005; National Research Council, 1990). Certains indicateurs biologiques constituent dès lors un outil alternatif à l'échantillonnage traditionnel, permettant notamment d'effectuer des suivis environnemenatux de type substitué afin d'évaluer la variabilité de l'écosystème marin sur de longues périodes de temps, tout en offrant la possibilité d'une reconstruction rétrospective de la variabilité environnementale (Carroll *et al.*, 2009).

1.2 L'analyse biocénotique comme appréciation globale de la santé de l'écosystème

Bon nombre de programmes visant l'évaluation et le suivi de la santé des écosystèmes appuient leur diagnose sur l'analyse des biocénoses, particulièrement des peuplements de macroinvertébrés benthiques, inféodés au substrat (Genin *et al.*, 2003; Cairns et Pratt, 1993). Contrastant avec maints groupes fauniques et floristiques, le benthos combine de nombreux avantages pour l'estimation globale de la qualité des milieux, notamment sa grande diversité taxonomique, sa répartition dans l'ensemble des écosystèmes, sa relative stabilité dans le temps et l'espace et sa simplicité d'échantillonnage (Genin *et al.*, 2003). Parmi tous les invertébrés benthiques, les bivalves possèdent de nombreuses caractéristiques leur conférant un statut d'indicateur environnemental particulièrement fiable : leur large distribution géographique, leur espérance de vie, leur caractère sessile, leur dominance générale en biomasse au sein des écosystèmes côtiers et estuariens, de même que leur importante tolérance à un large éventail de conditions environnementales (Wanamaker *et al.*, 2011; Carroll *et al.*, 2009; Gillikin *et al.*, 2005; Smaal et Widdows, 1994; Widdows et Donkin, 1992). Les bivalves sont conséquemment largement utilisés à titre d'espèces sentinelles (Garric *et al.*, 2010 ; Bélanger, 2009 ; Giguère, 2003), notamment en écotoxicologie, où leur importante capacité de bioaccumulation peut fournir des informations sur la fraction biodisponible des contaminants (Campbell, 1995). Leurs biomarqueurs génétiques, enzymatiques, physiologiques, morphologiques, moléculaires, cellulaires et biochimiques permettent en outre d'estimer le niveau d'altération de l'environnement, et ce, avant même que les effets néfastes des polluants se fassent sentir chez les autres organismes (Bélanger, 2009). Par ailleurs, la croissance des bivalves étant fortement modulée par la température et la disponibilité en nourriture (Schöne *et al.*, 2004; Gosling, 2003; Dekker et Beukema, 1999; Lewis et Cerrato, 1997; Beukema et Cadée, 1991; Jones *et al.*, 1989), l'analyse des altérations de croissance de la coquille peut fournir un aperçu des variations saisonnières, voire décennales de ces facteurs pour l'ensemble de la durée de vie de l'animal (Carroll *et*

al., 2009 ; Rhoads et Lutz, 1980); une discipline désormais connue sous le nom de sclérochronologie.

1.3 Notions de base en sclérochronologie

Au cours des vingt-quatre heures suivant la fécondation d'un oeuf de bivalve, la larve trochophore émergente crée une première coquille embryonnaire, profilée sous forme de «D». La larve, désormais véligère, débute la sécrétion d'une seconde coquille, produite par le manteau et pourvue de lignes de croissance (Gosling, 2003). Tout au long de sa vie, le bivalve croît en accumulant du carbonate de calcium à la marge ventrale de sa coquille au cours d'une période de croissance couvrant généralement les saisons printanière et estivale, et menant à la formation d'incréments de croissance annuels (Torres *et al.*, 2011; Gosling, 2003). La reconstruction rétrospective des conditions environnementales s'appuie dès lors sur l'âge du mollusque, lequel peut être déterminé à partir des lignes nacrées visibles à l'intérieur de la coquille et générées annuellement au cours de la saison hivernale, alors que s'interrompt la croissance coquillaire (Gosling, 2003) (Figure 1). Définies par Dillon et Clark (1980) comme étant le résultat de changements abrupts ou répétitifs dans le caractère d'accrétion des tissus, les stries d'arrêt de croissance sont manifestes chez certains bivalves soumis à des conditions saisonnières contrastées (Dame, 2012), particulièrement au sein des hautes latitudes (Nakaoka et Matsui, 1994). De telles structures de croissance périodique peuvent être utilisées comme outils de datation, permettant d'attribuer une année calendaire à chacune des parties de la coquille (Schöne *et al.*, 2004), notamment chez les espèces du genre *Yoldia* (Nakaoka et Matsui, 1994 ; Nolan et Clarke, 1993 ; Peck et Bullough, 1993). L'interprétation des patrons de stries d'arrêt ou de ralentissement de croissance coquillaire doit toutefois être nuancée lorsqu'un individu est soumis à certains stress environnementaux. En effet, bon nombre d'événements fortuits tels que les tempêtes, les attaques de prédateurs et l'instabilité sédimentaire, notamment, peuvent générer l'apparition de stries internes, au même titre que l'arrêt de croissance

hivernale (Rhoads et Lutz, 1980). Chez certains mollusques, la reproduction peut également consister un stress physiologique provoquant une décélération de la croissance coquillière (Radermacher *et al.*, 2009). Une considération particulière doit ainsi être apportée lors de l'interprétation des patrons de croissance afin d'évaluer l'impact physiologique de stimuli environnementaux d'ordre aléatoires, comparativement aux événements périodiques. En somme, la production séquentielle des coquilles de bivalves permet d'enregistrer leur historique de croissance, de même que les conditions métaboliques et environnementales prédominantes lors de l'accrétion du matériel coquillière (Carroll *et al.*, 2009). Les bivalves constituent ainsi de précieux bio-indicateurs, conservant des enregistrements ininterrompus des conditions environnementales prévalant sur des périodes allant de la décennie au siècle, et représentant par conséquent une source d'informations inestimable au sein de certaines régions, notamment l'Arctique, où le manque de données à long terme sur la structure et la dynamique des communautés est considérable (Ambrose *et al.*, 2006).

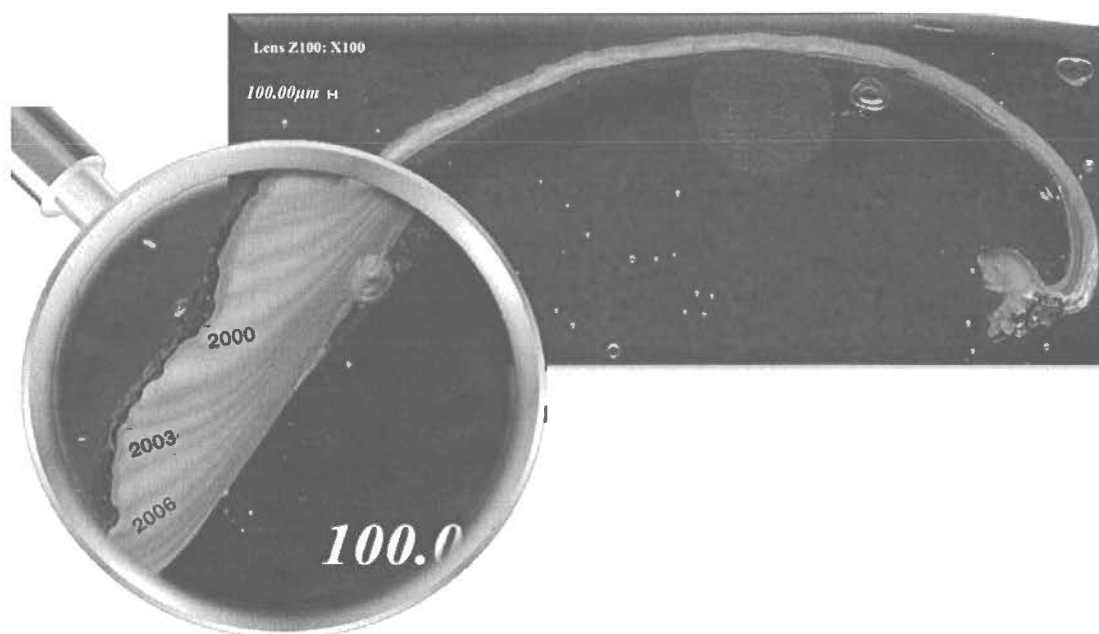


Figure 1. Coupe transversale d'une coquille de *Portlandia arctica*. Les zébrures d'un gris foncé désignent les stries d'arrêt ou de ralentissement de croissance alors que les incréments correspondent aux zones claires situées entre chaque strie. Ces structures de croissance permettent d'attribuer une année calendaire à chacune des parties de la coquille

1.4 *Portlandia arctica* comme indicateur biologique

Le mollusque bivalve dépositif *Portlandia arctica* est communément rencontré au sein des habitats benthiques peu profonds et turbides des régions arctiques (Peacock, 1989). Ce pélécyfode fouisseur appartenant au genre *Yoldia* est généralement très abondant près de l'embouchure des rivières et des marges glaciaires actives (Aitken et Gilbert, 1996) bordées de sédiments glaciomarins, qui sont déposés lors d'une première étape de déglaciation. Cette dernière est caractérisée par un retrait rapide de la glace de mer, une production primaire limitée, une salinité variable et une sédimentation rapide dans l'eau de fonte (Cai, 2006). Véritable pionnière au coeur d'environnements prodeltaïques, *P. arctica* est considérée comme une espèce robuste, tolérante aux biotopes limités en nourriture et aux conditions environnementales très variables (Cai, 2006; Aitken et Gilbert, 1996; Dale *et al.*, 1989). Elle domine en outre les archives fossiles caractéristiques du retrait du front glaciaire, utilisées dans la reconstruction de paléoenvironnements à partir d'assemblages de mollusques fossilisés (Gordillo et Aitken, 2001; Dyke *et al.*, 1996). Nonobstant sa popularité à titre de fossile de faciès, *P. arctica* n'est considérée par aucune étude comme éventuel indicateur biologique lors de reconstructions rétrospectives des conditions environnementales à plus court terme, les études sclérochronologiques étant traditionnellement réalisées sur des espèces filtreuses de plus grande taille. Pourtant, à l'ère des changements environnementaux globaux, ce robuste mollusque pourrait constituer une ressource pérenne permettant d'évaluer l'ampleur des perturbations subies par le compartiment benthique au sein des hautes latitudes et ce, sur une période s'échelonnant sur plusieurs décennies.

1.5 Les fjords du Nunatsiavut, «notre beau pays

Profondes indentations dans le tracé du littoral, les fjords forment une classe unique d'estuaires aux hautes latitudes, résultant de l'avancée, puis du retrait de glaciers et des fluctuations relatives du niveau de la mer au cours du Quaternaire (Syvitsky et Shaw,

1995). Partiellement érodés par les glaces, les fjords se présentent généralement sous forme de longues et étroites entailles dans le rivage, fréquemment ramifiées et sinueuses, bordées de falaises abruptes, mais également remarquablement rectilignes à certains endroits, notamment le long des lignes de faille (Dowdeswell et Andrews, 1985). Ce type d'estuaire compte généralement plusieurs bassins internes définis par des seuils rocheux créés à même le soubassement ou via des moraines glaciaires, résultant en une circulation océanique faiblement couplée aux bassins sous-jacents (Brown *et al.*, 2013; Syvitsky et Shaw, 1995) (Figure 2). Cette bathymétrie complexe maintient un certain nombre d'environnements océanographiques distincts au sein d'un même écosystème, étayant des caractéristiques physiques et biogéochimiques variées. En effet, l'eau douce issue des glaciers et du ruissellement s'écoule au-dessus de l'eau salée provenant de l'océan qui, souvent physiquement restreinte dans des bassins clos, peut induire une séparation spatiale et temporelle entre les processus se produisant au creux des bassins et ceux engendrés en surface. L'apparition de tels gradients hydrographiques verticaux influence non seulement le biote, mais également les sédiments (Syvitsky et Shaw, 1995). En outre, agissant simultanément à titre d'interface et de zone tampon entre le continent et l'océan, les fjords constituent des laboratoires naturels dynamiques, notamment à titre de bassins océaniques miniatures et de formations côtières protégées (Howe *et al.*, 2010). Leur biogéochimie unique, leur faune typique, de même que leurs processus hydrographiques et sédimentaires caractéristiques se révèlent d'un grand intérêt pour de nombreuses disciplines, à savoir la géomorphologie, l'océanographie et la biologie marine (Syvitsky *et al.*, 1987).

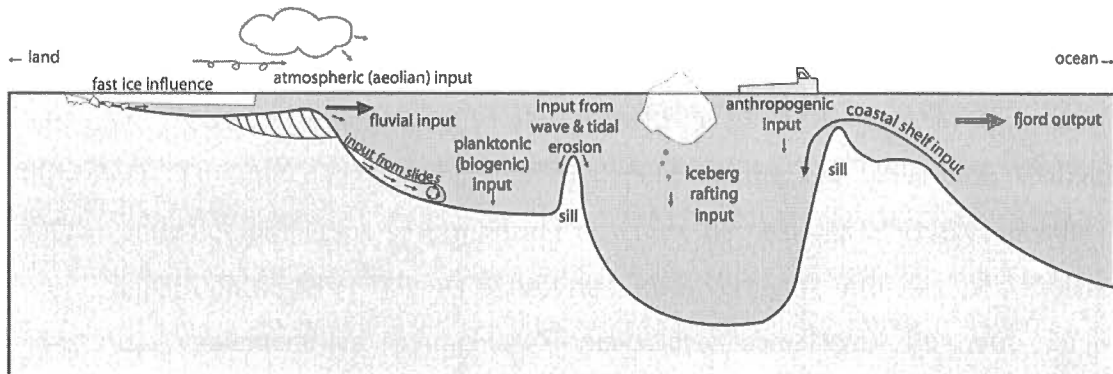


Figure 2. Profil longitudinal d'un fjord et ses apports sédimentaires (tiré de Brown *et al.*, 2013)

En Amérique du Nord, la côte nord-est du continent et l'Arctique comptent environ quatre fois plus de fjords, soumis ou non à l'influence d'un glacier, que sur la côte ouest et ce, principalement entre le Labrador et l'île d'Ellesmere (Dale *et al.*, 1989). Parmi eux, les fjords subarctiques du Nunatsiavut, situé au nord du Labrador, constituent d'importantes canalisations permettant l'introduction d'eau, de nutriments et de sédiments dans les écosystèmes marins côtiers (Bentley et Kahlmeyer, 2012). Influencés par les masses d'eau atlantique et arctique (Brown *et al.*, 2013), ces fjords sont exposés à un climat plus modéré qu'à très haute latitude. Nonobstant de longs hivers froids, les régions subarctiques connaissent des étés généralement doux, la température moyenne de l'air se situant au-delà du point de congélation et le couvert de glace disparaissant complètement à chaque année (Sørensen, 2012; Gilbert, 2000). Il en résulte ainsi l'apparition d'une forte pycnocline au cours de l'été, laquelle fait rapidement place à une colonne d'eau plutôt homogène dès l'arrivée de l'automne (Brown *et al.*, 2013). Véritables indicateurs sensibles aux changements climatiques (Syvitsky et Shaw, 1995), ces systèmes dynamiques en constante évolution forment des sites de suivi environnemental remarquables (Copeland *et al.*, 2012).

1.6 Objectif et hypothèses

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact de la variabilité environnementale sur la dynamique de croissance de bivalves au moyen de la sclérochronologie, au coeur de deux fjords subarctiques relativement peu étudiés et contrastés par la présence ou l'absence de glacier. Compte tenu du caractère résistant de *P. arctica* face aux changements subis au niveau de la structure des communautés, ce bivalve a été utilisé à titre d'indicateur biologique potentiel. En outre, considérant l'influence potentielle des glaciers situés en amont des fjords sur l'écosystème des bassins, les différences quant aux conditions environnementales marquant la présence et l'absence de telles masses glaciaires ont été étudiées. L'hypothèse générale était qu'un fjord exposé à un glacier résulterait en une variabilité environnementale accrue au coeur de ses bassins, conséquence des importants changements hydrologiques induits par la proximité de la masse glaciaire, et contrastant

ainsi avec un fjord dépourvu de glacier. Compte tenu des perturbations anticipées au sein d'un fjord soumis à l'influence d'un glacier, *P. arctica* devrait présenter une dynamique de croissance variable, voire ralentie, lorsqu'évoluant dans un tel environnement.

CHAPITRE 2

USING THE BIVALVE *PORTLANDIA ARCTICA* AS AN INDICATOR OF ENVIRONMENTAL VARIATIONS WITHIN GLACIATED AND UNGLACIATED FJORDS (LABRADOR, CANADA)

2.1 INTRODUCTION

Global warming is unequivocal, as climate trends reveal worldwide increasing average air and ocean temperatures, widespread melting of ice and snow and rising of global average sea level (IPCC, 2007). Consequences of such climate system warming are particularly emphasized in higher northern latitudes, since average temperatures in these regions are raising at almost twice the global average rate (IPCC, 2007). While the Arctic was considered one of the least disturbed regions on Earth, it is now one of the most vulnerable to climate change (Overpeck *et al.*, 1997). From this perspective, environmental monitoring is crucial in order to assess the status of the ecosystem, detect changes in its situation and anticipate the damaging effects of global changes (Usher, 2005; National Research Council, 1990).

Fjords form geomorphic and biologic systems of great interest for environmental monitoring (Copeland *et al.*, 2012), as they constitute sensitive indicators of global climate changes evolving over relatively short time scales (Syvitski and Shaw, 1995). Carved by

glacier ice, fjords typically stand as narrow, steep sided inlets partially cut off the open ocean by a shallow sill, which restricts water circulation and thus supports high stratification (NOAA, 2008). Given their manifest vertical gradients in key environmental parameters such as salinity, suspended mineral loads and sedimentation rates, those immature, non-steady state systems form ideal natural laboratories (Syvitski and Skei, 1983) and act both as interface and buffer between glaciated continents and the oceans (Syvitsky and Shaw, 1995).

While marine environmental monitoring used to emphasize on abiotic parameters such as temperature, salinity, currents and nutrients, biological monitoring has been developed as an alternative approach in order to gain more information about the distribution, transport mechanisms and faith of pollutants and contaminants, and relate directly the impact of environmental stresses on biota and ecosystem (Dame, 2012). Moreover, since the settlement of long term monitoring programs in highly dynamic areas like northernmost regions has proven to be laborious due to their important seasonal variability (Simstich *et al.*, 2005), archival hydrographic and environmental data affecting benthic community structures and dynamics turned out to be more easily obtained from long-lived marine biota (Wanamaker *et al.*, 2011).

Aquatic health assessment programmes mostly rely on benthic macroinvertebrates, as they form a diverse group of long-lived, relatively sedentary species that react intensively and often predictably to stresses carried out on aquatic ecosystems (Dauvin, 2007; Cairns and Pratt, 1993). In many instances, numerous biological traits of bivalves have led to their use as reliable environmental indicators, particularly their wide geographic distribution, life expectancy, sessile characteristics, general dominance of coastal and estuarine ecosystems and tolerance to a wide range of environmental conditions (Wanamaker *et al.*, 2011; Carroll *et al.*, 2009; Gillikin *et al.*, 2005; Smaal and Widdows, 1994; Widdows and Donkin, 1992). The analysis of growth of bivalve's shells has set bases of a specific discipline, known as sclerochronology (Carroll *et al.*, 2011; Rhoads and Lutz,

1980). Throughout their life, bivalves grow by accreting calcium carbonate at the ventral margin of their shells during the growing period, mainly during spring and summer, leading to the creation of internal growth increments (Torres *et al.*, 2011; Gosling, 2003). In order to reconstruct marine environmental parameters, the mollusc's age is determined out of the nacreous lines in the shell, which are usually produced annually during the winter period of suspended shell growth (Gosling, 2003). Such periodic growth structures provide reliable dating control and make it possible to attribute precise calendar years to each part of the shell (Schöne *et al.*, 2004), especially for high latitude species such as *Yoldia* genus (Nakaoka and Matsui, 1994). Since bivalve growth is strongly regulated by temperature and food availability (Schöne *et al.*, 2004; Gosling, 2003; Dekker and Beukema, 1999; Lewis and Cerrato, 1997; Beukema and Cadée, 1991; Jones *et al.*, 1989), analyzing growth variations can provide an overview of seasonal to decadal variability of those factors over the bivalve's life (Carroll *et al.*, 2009). It is important to underline, however, that internal banding pattern can be altered by some physiological and environmental stresses, such as reproduction cycle, storms, predator attacks and sediment instability, amongst others, which cause growth deceleration and may also produce nacreous lines within shells (Radermacher *et al.*, 2009; Rhoads and Lutz, 1980). Therefore, particular attention must be paid to the interpretation of the growth patterns in order to assess the impact of non-predictably versus periodic events (Rhoads and Lutz, 1980).

The present study aimed to investigate the impacts of environmental variations on bivalves' annual growth dynamics using sclerochronology in two understudied contrasting subarctic fjords. The bivalve *Portlandia arctica*, a burrowing marine mollusc living in turbid shallow waters (Peacock, 1989) and frequently used as a facies fossil (Gordillo and Aitken, 2001), was used as a biological proxy. Since upstream glaciers are known to influence fjords basin ecosystems, differences between the presence and absence of innermost glacial mass were studied. The general hypothesis was that glaciated fjord would provide evidence of a greater environmental variability as a consequence of important hydrologic changes inferred by the proximity of a glacier, thus contrasting with an

unglaciaded fjord. It was anticipated that *P. arctica* growth dynamics would be more variable, even slowed down, in a glaciaded fjord.

2.2 MATERIAL AND METHODS

2.2.1 Study area

This study was conducted in Nachvak and Saglek fjords in Nunatsiavut, in North Labrador, on the eastern seaboard of Canada (Figure 3). Located in the northernmost part of the study area, the Nachvak fjord is a pristine system, as it forms a part of the Torngat Mountains National Park Reserve (Richerol *et al.*, 2012). This 45 km-long fjord is glaciaded and measures 2 to 4 km wide, gradually increasing in width eastward to Nachvak Bay (Bell and Josenhans, 1997). Its bathymetry shows a series of four basins, receiving an average annual sediment discharge of 39 000 t year⁻¹ mostly from the glaciaded catchment Ivitak Brook (Bentley and Kahlmeyer, 2012).

Saglek is an unglaciaded, 55 km-long and 2 to 14-km wide fjord, gradually increasing in width eastward to Saglek Bay, which opens to the Labrador Sea (Richerol *et al.*, 2012). The bathymetry shows a series of seven basins along the fjord, receiving an average annual sediment load of 43 000 t year⁻¹ mostly from the unglaciaded catchment Nachvak Brook (Bentley and Kahlmeyer, 2012). For information purposes, Saglek Bay has been exposed to high anthropogenic disturbances while serving as a military radar base from 1953 to 1971. Polychlorinated biphenyls (PCBs) which were then used in transformers and other equipments contaminated soils in three separate areas around the bay at concentrations reaching 250 µg gram⁻¹ of soil, resulting in a halo of contamination up to 50 km in diameter (Pier *et al.*, 2003). During soil remediation carried out from 1997 to 1999, PCBs concentrations in marine sediments ranged from 0.24 to 62 000 ng g⁻¹, diminishing exponentially with distance from the original contamination (Kuzyk *et al.*,

2005). Despite the efforts provided for decontamination, recent studies revealed evidences of bioaccumulation and biomagnification of PCBs through the marine food chain (Kuzyk *et al.*, 2005).

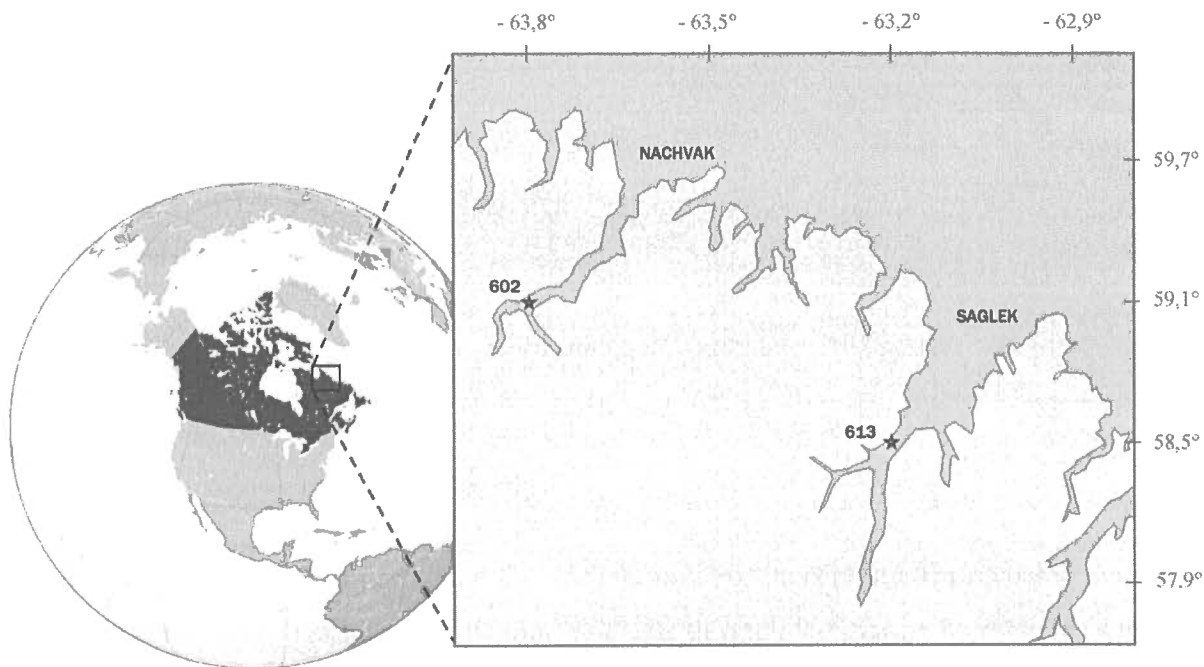


Figure 3. Location of the sampling sites in two Nunatsiavut fjords (Labrador, Canada)

2.2.2 Sampling sites

Samplings in Nachvak and Saglek fjords were carried out in October 2010 on board the *CCGS Amundsen*. Hundreds of bivalves were collected in the upstream section of each fjord using an Agassiz trawl. Samples were sorted, identified and preserved in -80°C freezer directly on board the ship. Details of sampling locations are listed in Table 1.

Table 1. Details of sampling locations for the two collection sites of *Portlandia arctica* within Nunatsiavut Fjords

Fjord name	Station	Latitude	Longitude	Depth (m)
Nachvak	602	59.05892	-63.84592	152
Saglek	613	58.48367	-63.23108	255

2.2.3 Environmental conditions

At each station, near-bottom water temperature and salinity were measured by the shipboard CTD probe, 10 m above the seafloor. Twelve sub-surface sediment samples (0-1 cm) were collected with 60 ml syringes within a box core 0.25 m² to perform pigment, stable isotopes, C/N ratio and grain size analyses in triplicate. Samples were kept in -20 °C freezer until analyses.

Sediment pigment concentrations (chlorophyll *a* and phaeopigments) were fluorometrically analysed following the protocol of Riaux-Gobin and Klein (1993). Two grams of sediment were added 10 ml of 90% acetone and kept for 24h at 4 °C for extraction. Once centrifuged, samples were measured before and after acidification (5% HCl) using a Turner Design fluorometer. Pigment concentrations were expressed in microgram pigment per gram of dry sediment [$\mu\text{g g}^{-1}$], then transformed in milligram pigment per square meter of dry sediment [mg m^{-2}]. The transformation was performed based on the fact that two grams of wet sediment equals about $\frac{1}{4}$ of a 1 cm thick core sampled with a 60 ml syringe of 2.6 cm diameter (area about 5.31 cm²).

Sediment samples collected for isotopic analyses were oven-dried between 40 and 70 °C and three to four milligrams were encapsulated in tin capsules. Carbon and nitrogen isotopic composition was determined using a COSTECH ECS 4010 elemental analyser paired up with an Isotope Ratio Mass Spectrometer (IRMS) Delta^{Plus} XP (Thermo Electron Co.) via a ConFlo III interface following an acidification procedure. Chemical standards

allowing correction of isotopic values (caffeine, Mueller Hinton Broth and *Nannochloropsis*) were calibrated with respect to certified standards from the National Institute of Standards and Technology (NIST, USA). Isotope ratios are expressed in the delta notation ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$), relevant to Vienna PDB and atmospheric nitrogen. While precision on $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ measures respectively amounts to $\pm 0.05\%$ and $\pm 0.15\%$, relative standard deviation of C/N ratio calculation is equivalent to $\pm 0.08\%$.

Laser diffraction particle sizing technique was used to obtain fine sediment composition. To do so, wet substrate (0.1-0.5 cm³) was mixed with 10 ml of sodium hexametaphosphate and water, and then analyzed using a Beckman Coulter LS 13320.

2.2.4 Long-term data

Sea surface temperature (SST) (°C) and salinity (SSS) (PSU), ice cover (IC) (%), precipitation rate (PR) (kg m⁻² s⁻¹) and runoff (RO) (kg m⁻²) data were extracted from National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) (Saha *et al.*, 2010), a high resolution coupled atmosphere-ocean-land surface-sea system covering the period of January 1979 to December 2009 for both fjords (oceanic data resolution: 0.5°x0.5°, N40° to 90°, E0° to -100°; atmospheric data resolution: lat 0.3125° global gaussian T382 grid). Data were averaged based on two key ice events: the break-up foreshadowing summer and the freeze-up which portends winter. Regarding sea-ice observations made over the last ten years, means were calculated from July to December (summer) and from January to June (winter) (Richerol *et al.*, 2012). North Atlantic Oscillation (NAO) index, calculated from the pressure difference found at sea level between Azores and Iceland (Hurrell, 1995; Bjerknes, 1964), was obtained via the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Internet database and averaged annually.

2.2.5 Sample preparation

Each specimen of *P. arctica* was visually inspected to ensure its suitability for further analyses, criteria being based on the presence of the entire animal and the wholeness of the shells. Individuals were then sorted by size and largest specimens were retained to facilitate reading (*i.e.*, shell longer than 15 mm and larger than 10 mm), resulting in a final sample population of 31 shells from Nachvak and 30 shells from Saglek. Samples were dissected and wet mass measurements of shells were taken before and after dissection.

One valve from each air dried shell was enclosed in polyester resin (Escil Corp.) to form shielding during cutting, grinding and polishing. 0.8 mm thick sections were sliced along the line of maximum of growth with a Struers saw (Secotom-50) employing a 0.8 mm thick diamond blade (E1D20). Slices were mounted on microscope slides with epoxy Araldite 2020 and air dried. Sections were rinsed with nanopure water, then ground using 800, 1200, and 2400 abrasive discs. All sections were ultrasonically cleaned following each grinding degree and dried. Samples were ultimately polished using MD-Nap disc (Struers) with a 1 μm diamond polishing powder (DP-Suspension P from Struers), dried and stored in microscope slide boxes.

2.2.6 Growth structure analyses

Growth layers were assessed by microscopic examination using a Keyence digital microscope VH-2100R with Z100 lens and 100 x magnification. As bivalves were collected alive and growth rings were assumed to be annual, each growth increment could be ascribed to a precise calendar year by counting consecutively back from the year of collection. However, since only the posterior sections of the shells were readable and since external growth lines did not match the internal structural marks of the shell, two distinct methods were tried out in furtherance of analyzing growth structures. On a first attempt,

shell growth was modelled by fitting a general von Bertalanffy growth function to *P. arctica* theoretical ontogenetic age obtained from Torres *et al.* (2011) and shell height data for each bivalve (Brey, 2004). Nevertheless, taking into consideration the small number of legible increments and the lack of inflection points among some individuals growth curve, a considerable number of bivalves were removed from the analyses as their growth rate proved to be unrepresentative (see annexe). Thus, 15 individuals out of 31 were eliminated from the station within the glaciated fjord, while 18 out of 30 were removed from the station within the unglaciated fjord.

On another issue, since the ontogenic age of individuals could not be experimentally clearly assessed, measurements of shell growth were taken into account exclusively from year 1992 and averaged increment width series were calculated for each bivalve population.

2.2.7 Series standardization

Increment-width series exhibit strong trends in mean and variance throughout bivalve's life, with wide and highly variable increments in the early years of growth which become narrower and less variable with age (Butler *et al.*, 2010; Schöne *et al.*, 2004; Gosling, 2003). To remove biological growth trends from the raw data and therefore remove a potential bias that could mask or distort the climate signal, a detrending function was applied on individual increment-width series in a process called 'standardization', thus resulting in dimensionless indices (Fritts, 1971).

On one hand, yearly measured shell growth data were divided by the associated expected growth data obtained by means of the von Bertalanffy classical model, which generated standardized growth indices (SGI).

On the other hand, a highly flexible 10-year cubic smoothing spline with 50% frequency cut-off was applied to each increment width series within each fjord using the

software package *detrendeR* (Campelo *et al.*, 2012) so that medium and low frequencies variability having an environmental cause would be retained.

2.2.8 Statistical analyses

One-off autumnal sediment pigments data were compared between the fjords using nonparametric Mann-Whitney tests (α level = 0.05) in JMP v10 (SAS Institute). Raw averaged increment width data and standardized growth indices stemmed from both methods were analyzed using repeated measures analysis of variance (ANOVA). Factors considered in the model were: site (fixed with two levels: Nachvak and Saglek), year (fixed with 19 levels: 1992 to 2010) and their interaction with $n = 1004$ observations. Normality and homoscedasticity were verified visually through residuals distribution as suggested by Quinn and Keough (2002). Mauchly's sphericity was analyzed and a Greenhouse-Geisser adjusted univariate test was performed. Increment width data were transformed using a natural logarithm function to meet the homoscedasticity assumption. *A posteriori* comparisons were carried out using Tukey-Kramer HSD test when significant differences were carried out.

A multiple regression was performed to evaluate the functional relationship between environmental parameters (SST, SSS, IC, RO, PR, NAO) and growth indices series stemmed from both methods. Considering the strong seasonality of biological processes in higher latitudes (Carmack and Wassmann, 2006), SST, SSS and IC averaged winter data were removed from the analysis. Normality and homoscedasticity were visually verified through residuals distribution. Assumptions regarding the linearity between the variables and the lack of multicollinearity between predictors were also tested.

2.3 RESULTS

Environmental conditions measured during the 2010 expedition revealed no differences between the two fjords, with the exception of sediment pigment concentrations and chl *a*/phaeo ratios. Saglek showed significant high concentrations of phaeopigments (295.56 ± 6.29 mg/m²) in comparison to Nachvak (153.63 ± 6.83 mg/m²) ($p = 0.0495$), while chl *a*/phaeo ratios proved to be significant higher in Nachvak (0.32 ± 0.03 vs 0.22 ± 0.04) ($p = 0.0495$) (Table 2).

Table 2. Environmental conditions measured in Nachvak and Saglek fjords on October 24-25 2010

Environmental parameter	n	Glaciated fjord (Nachvak)	Unglaciated fjord (Saglek)
Bottom temperature (°C)	n/a	-1.6	-1.7
Bottom salinity	n/a	32.5	32.5
Sediment pigments (mg/m ²)			
Chlorophyll <i>a</i>	3	48.43 ± 3.40	64.76 ± 5.99
Phaeopigments	3	153.63 ± 6.83	295.56 ± 6.29
Chl <i>a</i> : Phaeo ratio	3	0.32 ± 0.03	0.22 ± 0.04
Sediment C/N ratio	3	9.13 ± 0.61	9.62 ± 0.78
Sediment δ ¹³ C	3	-21.42 ± 0.04	-21.40 ± 0.08
Sediment δ ¹⁵ N	3	6.15 ± 0.05	6.17 ± 0.87
Sediment composition (%)			
Silt	1	89.4	91.0
Clay	1	10.6	9.0

Within station averages ± SE. N number of replicates. n/a non applicable

Averaged increment width series showed statistically significant differences between Nachvak and Saglek fjords ($F_{1,21} = 5.59$, $p = 0.028$), alike between the years ($F_{18,4} = 5.89$, $p < 0.0001$) (Table 3). *Post hoc* Tukey-Kramer HSD test revealed significant differences between the early 90's and the late 00's (Figure 4).

Once the biological growth trend removed, the best fit model yielded by the multiple regression for the cubic smoothing spline contained 4 predictors for the glaciated fjord. Although the model was statistically significant ($F_{4,491} = 10.80, p < 0.0001$), it only accounted for approximately 7% of the variance of standardized growth indices ($R^2 = 0.081, \text{Adjusted } R^2 = 0.073$). It was found that SST slightly affected molluscs growth ($\beta = 0.162, p = 0.002$), as did SSS ($\beta = 0.189, p = 0.0004$), IC ($\beta = 0.281, p < 0.0001$) and NAO ($\beta = 0.133, p = 0.0105$). Comparatively, the unglaciated fjord's best fit model held 5 predictors. Also statistically significant ($F_{5,441} = 13.061, p < 0.0001$), it explained approximately 12% of the variance ($R^2 = 0.129, \text{Adjusted } R^2 = 0.119$). It appeared that both summer and winter PR influenced annual growth (respectively $\beta = 0.141, p = 0.0092$ and $\beta = -0.204, p = 0.0002$), just like winter RO ($\beta = 0.264, p < 0.0001$), IC ($\beta = -0.228, p < 0.0001$) and NAO ($\beta = 0.171, p = 0.0004$) (Table 4). The repeated measures ANOVA performed on standardized indices revealed no significant differences between either fjords, years or the interaction (Table 3, Figure 4).

The best fit model provided by multiple regression for the classical model included 6 predictors for the glaciated fjord. Statistically significant ($F_{6,261} = 9.09, p < 0.0001$), it roughly accounted for 15% of the variance ($R^2 = 0.173, \text{Adjusted } R^2 = 0.154$), as SST ($\beta = -0.227, p = 0.0387$), SSS ($\beta = 0.206, p = 0.0214$), IC ($\beta = -0.227, p = 0.0065$), NAO ($\beta = 0.113, p = 0.0942$), summer RO ($\beta = -0.284, p = 0.0059$) and summer PR ($\beta = 0.309, p = 0.0114$) seemed to affect molluscs growth. Comparatively, the unglaciated fjord's best fit model held 5 predictors but revealed to be not significant ($F_{5,177} = 1.3958, p = 0.2280$), as it barely explained 1% of the variance ($R^2 = 0.038, \text{Adjusted } R^2 = 0.011$) (Table 4). The repeated measures ANOVA performed on these indices revealed significant differences between fjords and years (Table 3).

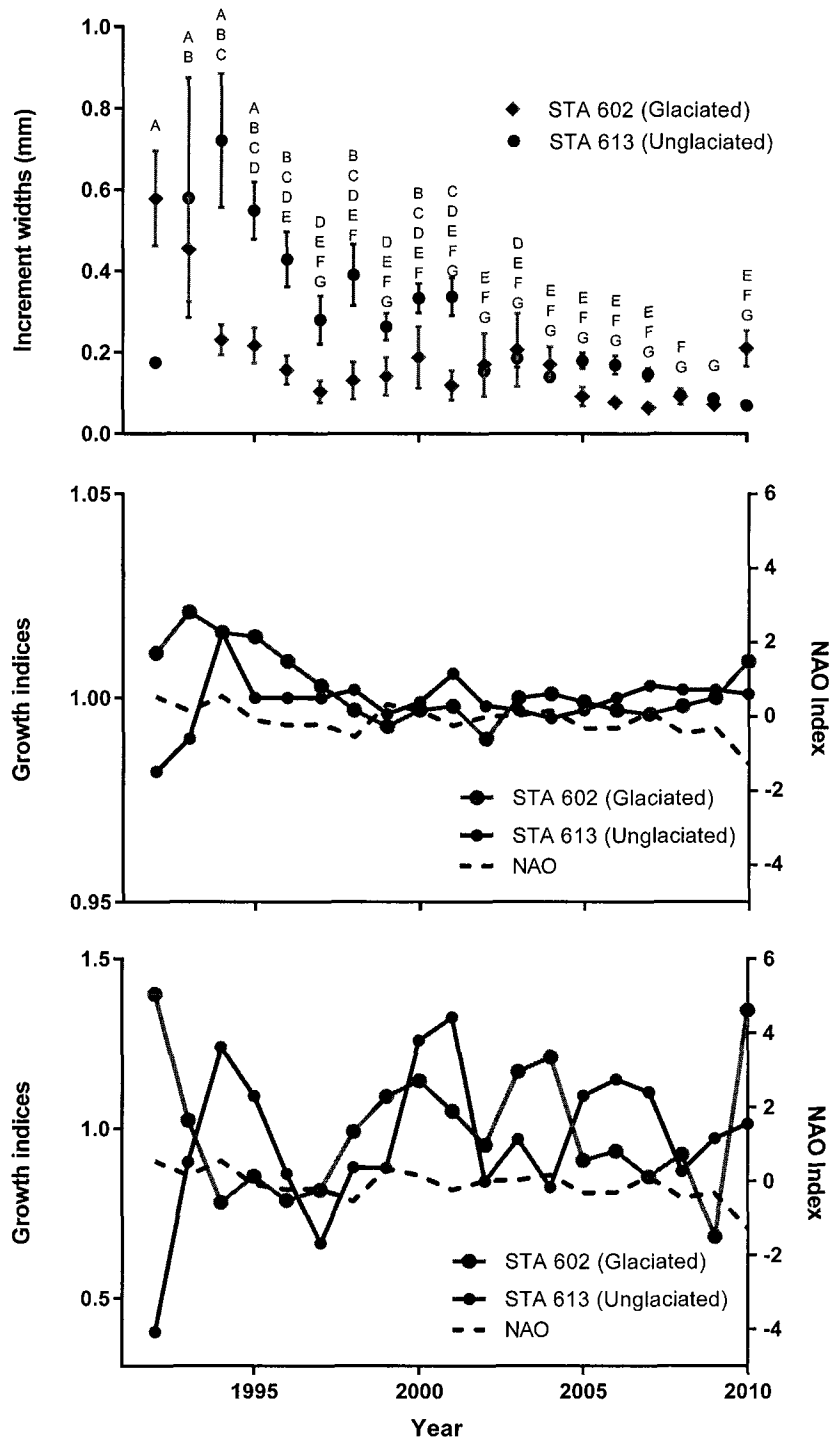


Figure 4. Within fjord averaged increment width series (raw measurements in mm) and associated standard errors (a), standardized growth indices obtained for each fjord from 1992 to 2010 with von Bertalanffy model (b) and cubic smoothing spline (c). In (a), different letters indicates significant differences between years based on *a posteriori* pair-wise tests

Table 3. Results of repeated measures ANOVA testing the effect of Site (S), Year (Y) and their interaction (S*Y) on increment width ln-transformed data and standardized growth indices stemmed from both methods. Statistically significant values are highlighted in bold

Sources of variation	Increment width (ln)			Growth indices (cubic spline)			Growth indices (classical model)		
	df	F	<i>p</i>	df	F	<i>p</i>	df	F	<i>p</i>
S	1	5.5931	0.0277	1	1.1517	0.2954	1	6.0674	0.0299
Y	18	5.8947	< 0.0001	18	1.4851	0.1721	18	5.2166	0.0147
S*Y	18	2.1435	0.0529	18	1.7347	0.1001	18	3.2384	0.0599

Table 4. Results of standard multiple regression, which brings out the best fitting model for each fjord. Statistically significant values are highlighted in bold

Employed approach	Cubic smoothing spline				Classical model			
	Glaciated fjord		Unglaciated fjord		Glaciated fjord		Unglaciated fjord	
	β	<i>p</i>	β	<i>p</i>	β	<i>p</i>	β	<i>p</i>
Predictors								
SST	0.16	0.002			-0.23	0.0387	0.12	0.2149
SSS	0.19	0.0004			0.21	0.0214	-0.16	0.1150
IC	0.28	< 0.0001	-0.23	< 0.0001	-0.23	0.0065	-0.17	0.0942
NAO	0.13	0.0105	0.17	0.0004	0.11	0.0942	-0.03	0.6894
RO (Winter)			0.26	< 0.0001				
RO (Summer)					-0.28	0.0059	-0.05	0.5667
PR (Summer)			0.14	0.0092	0.31	0.0114		
PR (Winter)			-0.20	0.0002				
R ²		0.081		0.129		0.173		0.038
Adjusted R ²		0.073		0.119		0.154		0.011
No. Observations		496		447		268		183

β = Standard regression coefficient. SST = Sea surface temperature; SSS = Sea surface salinity; IC = Ice cover; NAO = North Atlantic Oscillation; RO = Runoff; PR = Precipitation rate

2.4 DISCUSSION

This study clearly shows the impact of environmental variations on the annual growth dynamics of the bivalve *Portlandia arctica* in two contrasting fjords in Nunatsiavut, Canada. As hypothesized, the growth dynamics of the robust bivalve proved to be more variable in the northermost, glaciated fjord as the environmental variability seemed to regulate the pelagic-benthic coupling.

2.4.1. Comparing growth indice databases and analyses

As pointed out by Gulland (1969), selected growth formula must easily fit the observed data, include few constants and should not provide illogical outcomes outside the boundaries of the inputs used. The von Bertalanffy function generally meets those criteria as for assessing mollusc bivalves growth (Vakily, 1992; Lévêque, 1971). However, the use of such a model involves obtaining specific data regarding the biology of the species, namely the ontogenetic age of individuals as well as their growth rate, amongst others. In the case of *P. arctica*, only the posterior section of the shells revealed sufficiently distinct growth increments, a phenomenon that may be related to the thin and fragile shell of many polar molluscs (Nicol, 1967), along with the homogeneous nature of the shell material (Nolan and Clarke, 1993). These factors have been shown to affect adversely the delineation of any but the increments of strongest contrast in molluscs (Pannella and MacClintock, 1968). Therefore, the bivalves age could not be assessed and the use of von Bertalanffy classical model has required the use of estimated and thus less representative ontogenetic ages. Besides, growth curves yielded by the use of increments width data from the posterior sections of the shells proved to be often devoided of inflexion points, resulting in a display of unrealistic growth rate (K). Consequently, nearly half of the individuals were eliminated from each station, thereby considerably reducing databases for subsequent statistical analyses. As a result, divergent outcomes were yielded, depending on the method carried forward. The repeated measures ANOVA performed on growth indices obtained via

the classical model revealed significant differences between fjords and years, while no significant differences between either fjords, years or the interaction were revealed by the use of indices stemmed from the cubic spline. Moreover, the best fit model provided by multiple regression for the classical indices included 6 predictors for the glaciated fjord, which roughly accounted for 15% of the variance, a benefit compared to the 7% obtained for the spline indices. While some predictors recurred between the methods (SST, SSS and IC), new ones were added with the classical method (summer RO and PR). Comparatively, the unglaciated fjord's best fit model proved to be not significant (less than 1%), thus contrasting with the model yielded by the spline indices which accounted for 12% of the variance. Regarding the divergent outcomes obtained and the uncertainty associated with the use of the classical indices database, which represents a subsampling of the population, the subsequent biological interpretation of results is based on those provided by the use of the cubic smoothing spline indices.

2.4.2 Growth rates and environmental relationships

At the local scale, the best fit model yielded by the standard multiple regression revealed variable sets of predictors for standardized growth indices depending on the fjord (SST, SSS, IC and NAO for the glaciated fjord; IC, NAO, RO and PR for the unglaciated fjord). Regardless the assemblage, it is worth noting that selected proxies regulate the biological productivity of the overlying water column either directly by influencing the physiological functioning and demographic traits of the organisms (SST, SSS, IC) or indirectly through the mediation of nutrient concentrations (NAO, RO, PR) (Fichot *et al.*, 2013; Doney *et al.*, 2012; Hurrell and Deser, 2009; ACIA, 2004). Considering the strong pelagic-benthic coupling pointed out in northern regions (Link *et al.*, 2011; Renaud *et al.*, 2008), bivalves depend heavily on primary producers for food in order to support their sustained growth. Besides, the use of proxies having an indirect impact on the measured variable can only account for a very small amount of its variance, as explained by Møller and Jennions (2002).

Among all the predictors used in statistical analyses, only two came out as significant ones for both fjords: the IC and the NAO. Highlighted by many authors, the influence of sea-ice cover on bivalves growth is of great importance in northern latitudes. However, results from different studies differ as for the meaning of the relationship. According to Serj *et al.* (2009), sea-ice cover regulates the growth of *Ciliatocardium ciliatum* through the mechanism of constraint of pelagic primary production in Greenland. On the other hand, Carroll *et al.* (2013) found the opposite relationship, as *C. ciliatum* growth tended to increase with more sea-ice coverage in the Barents Sea. These authors suggested that colder years lead to episodic sedimentation events that mostly bypass the pelagic grazers, thus resulting in the export of relatively fresh organic matter to sediments. Despite contradictory theories, the impact of ice cover on bivalves growth is also brought out in our study, as it appears as a significant predictor in each fjord.

Well-known driver of atmospheric patterns in the North Atlantic region (Osborn *et al.*, 1999; Jones *et al.*, 1997), the NAO is thought to broadly influence manifold climatic and meteorological models from the northeast coast of North America through Europe and the Mediterranean region (Carroll *et al.* 2009). As it oscillates between positive and negative phases, the NAO exhibits variability on seasonal, interannual, and decadal timescales, which intensely affect the oceanic basin and surrounding continents (Sun *et al.*, 2008; Hurrell, 1995). Over the ocean, its fluctuation induces considerable changes in surface wind patterns as well as the heat and freshwater exchange on the sea surface (Visbeck *et al.*, 1998). Thus, this dominant system affects upper ocean currents, distribution of sea surface temperature, and intensity of the Atlantic thermohaline circulation (Sun *et al.*, 2008). On a more regional scale, trend in NAO conditions influence seasonal transport variability of the Labrador Current (Marsh *et al.*, 1999), as well as ice cover in the Labrador and Greenland Seas (Visbeck *et al.*, 1998). Overall, the large-scale driver has an influence on ecological components in both terrestrial and marine ecosystems in the North Atlantic region (Ottersen *et al.*, 2001). To support this, Carroll *et al.* (2009) analyzed growth rates of the circumpolar Greenland smooth cockle *Serripes groenlandicus* from the southern

Barents Sea over almost 70 years. Once standardized, growth indices (SGI) revealed an oscillatory growth pattern with a multi-year periodicity, which was inversely related to the NAO. However, despite the overall 20% of variance explained by the model, authors found out relationship inconsistencies among time periods : while varying from weak to strong at times, the relation between SGI and NAO turned out to be statistically insignificant on occasion. These discrepancies could explain the models feeble variance ascertained for each of our fjords. Moreover, growth rate series obtained for *P. arctica* (18 years) proved to be quite short to those of *S. groenlandicus* (86 years). Since the NAO was found to be characterized by a nearly 60-year dominant oscillation since 1650 (Mazzarella et Scafetta, 2012), decadal *P. arctica*'s SGI could hardly be correlated with the atmospheric large-scale driver.

On a shorter time scale, 2010 one-off autumnal observations revealed high concentrations of sediment pigments in the unglaciated fjord, in comparison to Nachvak. Such results are consistent with Richerol *et al.* (2012) observations of dinocyst concentrations, which unveiled a north-south regional trend of biological productivity within Nunatsiavut fjords. Besides, since the sampling station in Nachvak is located in the upstream section of the estuary, it is coherent to run into lower concentrations, since productivity tends to increase from the inner towards the outer part of the fjords (Richerol *et al.*, 2012). Moreover, in each fjord, phaeopigments concentrations were much higher than chlorophyll *a* concentrations. In fact, the chl *a* pigment has a half-life of nearly three weeks in polar sediments (Graf *et al.*, 1995). While degrading, photosynthetic pigments are transformed into phaeopigments, which are thus used as long-term integrators of the physiological status of phytoplankton and decomposition pathways, such as herbivory grazing or bacterial degradation (Morata, 2008; Villanueva and Hastings, 2000; Mantoura and Llewellyn, 1983). Hence, the chl *a* : phaeo ratio is used as a 'freshness' proxy of the phytodetrital input (Pape *et al.*, 2013; Morata and Renaud, 2008; Riaux-Gobin *et al.*, 2004).

In addition to high concentrations of pigments in the sediment, the unglaciated fjord stands out, as patterns of standardized growth indices highlight a nearly six years cyclicity in the development of bivalves. Absent in the glaciated fjord, such cyclicity is most probably linked to factors regulating food availability. Since there are no differences in terms of SST or SSS between the two fjords, and since ice cover in subarctic regions breaks up completely each year (Sørensen, 2012; Gilbert, 2000), allowing enough light to penetrate in the water column, the only factor that could likely restrict the biological productivity would be the nutrient concentration. As the unglaciated fjord receives much more variable sediment inputs than the glaciated one (Richerol *et al.*, 2012), this major supply could favour primary production through high nutrient inputs (Fichot *et al.*, 2013) and, indirectly, support bivalves growth.

2.4.3 *P. arctica* as a biological proxy of temporal variability: pros and cons

P. arctica proved to be a useful tool, notwithstanding the lack of knowledge about the biology of the species. In fact, such backwardness, particularly regarding growth parameters, prevented us from making an appropriate use of well-established growth models like von Bertalanffy, Gompertz, Logistic and Richards, conventionally employed in sclerochronology (Hernandez-Llamas and Ratkowsky, 2004). While those functions were ruled out, there was still a requirement for data standardization, as within fjord averaged increment width series revealed the presence of a pronounced biological trend between the early 90's and the late 00's. So as to calculate indices cleared of age signal undesirable effects, standardization was performed to set raw data up with a mathematical function providing predicted values series: a cubic smoothing spline. Frequently used in dendrochronology to remove the non-climatic variance of tree-ring width series, splines are defined as a series of piecewise cubic polynomials (Cook et Peters, 1981), which allow to quantify the proportion of variance eliminated from growth sequences. Despite its approval rating, this kind of standardization has some shortcomings, including the loss of a certain amount of climatic information caused by the shape of the frequency responses curves and

where the signal and noise spectra overlap in the lower frequencies (Cook and Peters, 1981). Such loss could provide an additional explanation for the low percentages of variance obtained with the standard multiple regressions performed for each fjord. Regardless this fault, the lack of significant differences between either fjords or years, resulting from repeated measures ANOVA performed on standardized indices reinforce the selection of a 10-year cubic spline with 50% frequency cut-off to smooth *P. arctica*'s increment series. Indeed, as standardization brought the averaged indices down to 1 for each fjord, the lack of differences observed between the two sites revealed the use of a well-fitting curve.

In spite of some complications as for increment analyses due to the misreading of the species, the use of *P. arctica* as a biological proxy of temporal variability displayed manifold advantages. Considered as a pioneer species of prodeltaic environments, this bivalve appears as a sturdy species, bearing food-limited biotopes and variable environmental conditions (Cai, 2006; Aitken and Gilbert, 1996; Dale *et al.*, 1989). In addition to its wide arctic distribution, *P. arctica* prevails over many other species in early deglacial fossil record, which are used in paleoenvironments reconstruction from fossil mollusc assemblages (Gordillo et Aitken, 2001; Dyke *et al.*, 1996). Therefore, in an era of global change, this robust mollusc constitutes a potential resource allowing the assessment of disturbances on the benthic compartment in higher northern latitudes from decadal to century timescales.

2.5 CONCLUSION

Changes in physical and biological systems are foreseen to intensify as global warming occupies a key place in our oceans. Under such circumstances, we investigated the impacts of environmental variations (*i.e.* presence or absence of a glacier) on bivalves' annual growth dynamics using sclerochronology. Our results suggest that the robust bivalve

Portlandia arctica responds to observed environmental variations and has thus the potential to become a reliable proxy of temporal variability, allowing large-scale comparisons in Arctic and subarctic systems. Indeed, this study revealed a more erratic dynamics of growth within the glaciated fjord. However, despite such promising outcomes, *P. arctica* can only be used as a quite restrictive model at the moment. The biology of this species should be assessed further in order to define specific growth parameters (*e.g.* growth rate, maximum shell size, age at growth inflexion) and allow the use of well-established growth models, conventionally employed in sclerochronology. In the same vein, the food dynamics of the species should be studied for each population by means of lipid analysis so as to better understand the interaction between the biological productivity within the water column and the bivalves growth patterns.

Besides, due to the seasonal limitation on the ability to feed and hence grow in polar regions (Nolan et Clarke, 1993), *P. arctica* shell increments were assumed to be annual. In order to improve the power of the bivalve as a biological proxy, this assumption will have to be confirmed in further studies. Finally, the acquisition of expanded, uninterrupted long-term data such as properties of bottom water and sediment pigments would be essential to identify the major environmental factors regulating bivalves' annual growth dynamics in the fjords and other areas of the Arctic.

CHAPITRE 3

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude offre de nouvelles perspectives quant à l'utilisation des bivalves en sclérochronologie, notamment lors de reconstructions climatiques. Visant à évaluer l'impact des perturbations environnementales sur la dynamique de croissance annuelle des bivalves au cœur de deux fjords subarctiques contrastés, les résultats obtenus ont permis de confirmer l'hypothèse de travail initiale. En effet, au cœur d'un fjord soumis à l'influence d'un glacier, la dynamique de croissance du mollusque fouisseur *Portlandia arctica* semble perturbée, voire nettement plus irrégulière que pour une population évoluant au sein d'un fjord dépourvu de masse glaciaire. Une ANOVA à mesures répétées effectuée sur les séries de largeurs moyennes d'incrémentes a notamment permis de mettre en évidence des différences significatives au niveau des patrons de croissance des bivalves entre les deux fjords. À la lumière de ces résultats, *P. arctica* pourrait offrir un réel potentiel comme indicateur biologique de variabilité spatiale et temporelle. Nonobstant les nombreux avantages associés à l'utilisation de ce pélécy-pode pour le suivi des perturbations environnementales, le manque d'informations concernant la biologie de *P. arctica* limite actuellement le développement de cet outil.

3.1 Échelles spatiales et facteurs environnementaux

À l'échelle du fjord, l'effet circonscrit de divers facteurs abiotiques permet d'expliquer partiellement les différences obtenues quant aux indices de croissance, justifiant environ 7% de la variance pour Nachvak et 12% pour Saglek. Le manque de données à long terme concernant la disponibilité en nourriture pourrait constituer l'une des

causes de si faibles pourcentages. Augmentant le long d'un gradient nord-sud, la production primaire accrue mesurée au coeur des bassins de Saglek pourrait être à l'origine de la régularité des indices de croissance observés parmi la population de bivalves étudiés. Par ailleurs, à l'échelle régionale, le faible lien relevé entre l'ONA et les indices annuels standardisés de chacun des fjords pourrait être attribuable aux inconstances de la relation, décelées à l'échelle multidécennale par Carroll *et al.* (2009).

3.2 Perspectives de recherche

Au vu du potentiel élevé qu'offre l'utilisation du bivalve *P. arctica* pour la détection de perturbations environnementales, des efforts devraient être investis dans l'étude de la biologie de l'espèce, notamment dans le but d'obtenir des paramètres de croissance spécifiques (coefficient de croissance K , taille maximale de la coquille S_{∞} et âge au point d'inflexion D) et ainsi permettre l'utilisation adéquate de modèles de croissance bien établis, couramment utilisés en sclérochronologie. Dans un premier temps, il serait nécessaire de valider le caractère annuel des stries internes par la combinaison de plusieurs approches indépendantes. Des analyses d'isotopes d'oxygène devraient ainsi être effectuées dans l'aragonite de la coquille afin de s'assurer que les variations du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ offrent un enregistrement des variations saisonnières du milieu (Santarelli et Gros, 1985). Par ailleurs, le marquage chimique de coquilles à l'aide de fluorochromes tels le manganèse et la calcéine permettrait de mieux identifier, lors d'expériences de capture-marquage-recapture, les structures internes de la coquille, en plus de connaître avec exactitude les paramètres de croissance des individus marqués (Bellamy *et al.*, 2009). Les processus de marquage pourraient également être couplés avec des analyses d'isotopes stables du carbone afin de mieux comprendre les mécanismes de biominéralisation de la coquille (Bellamy *et al.*, 2009). En outre, l'utilisation d'une solution de Mutvei permettrait de mettre en évidence les structures de croissance internes, facilitant ainsi la lecture des incréments et des stries d'arrêt de croissance (Schöne *et al.*, 2005).

Une fois les paramètres biologiques de l'espèce établis et les indices de croissance standardisés calculés à partir des modèles classiques, l'évaluation des coefficients d'alpha Cronbach et d'EPS (Expressed Population Signal) pourrait s'avérer bénéfique, ces facteurs permettant d'estimer la fiabilité de l'échantillon considéré, alors que la variabilité de croissance à l'intérieur d'un échantillon se révèle généralement représentative de la variabilité des SGI de la population entière (Bland et Altman, 1997).

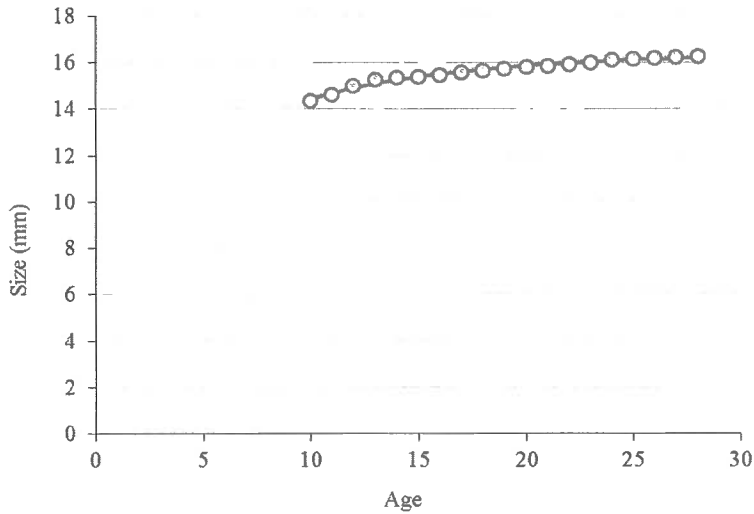
Par ailleurs, l'acquisition de données à long terme complémentaires à celles recueillies, telles que les propriétés physiques de l'eau de fond (température, salinité, turbidité, pH), les concentrations annuelles en pigments des sédiments et des données isotopiques sur la matière organique au fond, seraient indispensables afin d'identifier les facteurs environnementaux principaux contrôlant la dynamique de croissance des bivalves. L'obtention de telles informations, combinées à des analyses isotopiques complémentaires du carbone et de l'azote sur les chairs de bivalves permettraient en effet de mieux comprendre les mécanismes trophiques régissant ces deux environnements contrastés. L'étude de la dynamique alimentaire de *P. arctica* pourrait en outre être parfaite au moyen d'analyses lipidiques, permettant d'évaluer le niveau d'interaction entre la productivité biologique en surface et les patrons de croissance du bivalve. À noter que l'analyse quantitative des éléments traces (Mo, Ba et Mn) le long des stries de calcite des coquilles permettrait d'enrichir les profils chronologiques établis, notamment concernant la dynamique phytoplanctonique (Barats, 2006).

Dans un tout autre ordre d'idées, il serait intéressant d'augmenter le nombre de stations échantillonnées et ce tant au sein d'un même fjord, afin d'assurer un suivi d'amont en aval, que le long d'un gradient latitudinal incluant l'ensemble des quatre fjords du Nunatsiavut, à savoir Nachvak, Saglek, Okak et Anaktalak. En effet, l'ajout d'une échelle spatiale permettrait d'établir une meilleure corrélation entre la dynamique de croissance du bivalve et les divers facteurs environnementaux mesurés à l'échelle régionale.

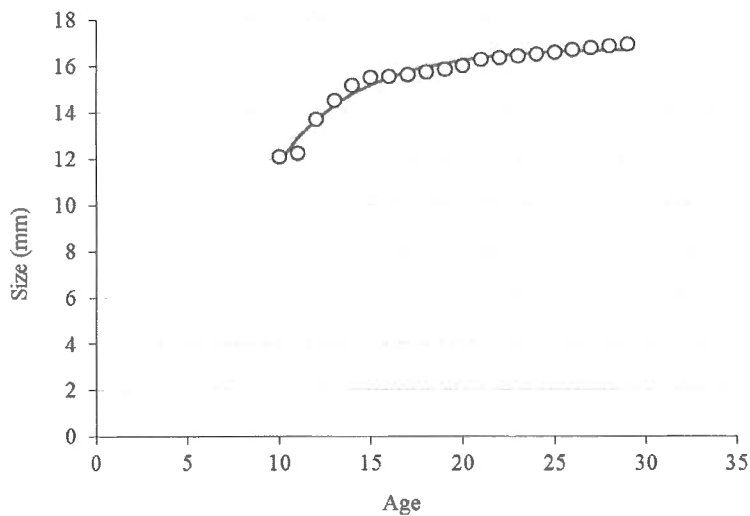
L'augmentation de l'aire d'étude permettrait également une meilleure comparaison entre les fjords, en plus de coïncider avec les stations d'échantillonnage décrites au moyen des assemblages de kystes de dinoflagellés à la surface des sédiments par Richerol *et al.* (2012), lesquels reflètent bien certains paramètres environnementaux de surface, à savoir la température, la salinité, le couvert de glace et la productivité primaire. L'intégration de telles informations, notamment au niveau du couvert de glace, permettrait assurément une meilleure description de chacun des sites, comparativement aux données issues de l'utilisation de modèles généraux présentant une grille à grande taille de maille.

ANNEXE

Sorties de modèles de croissance classiques de von Bertalanffy général (Brey, 2004) présentant les courbes de croissance de deux bivalves issus d'une même station (fjord avec glacier). Les individus ne présentant pas de point d'inflexion (figure du haut) ont été retirés de l'analyse



RESULTS	
1) Goodness of Fit	
Sum of (S-S') ² =	Target Cell 0,110
R ² =	0,979
Number of data pairs =	19
2) Parameters - Best Fit	
Soo:	16,392
K:	0,132
Parameter not used	0,000
t.zero:	-6,247
Parameter not used	0,000
Parameter not used	0,000



RESULTS	
1) Goodness of Fit	
Sum of (S-S') ² =	Target Cell 1,030
R ² =	0,973
Number of data pairs =	20
2) Parameters - Best Fit	
Soo:	16,806
K:	0,226
Parameter not used	0,000
t.zero:	4,540
Parameter not used	0,000
Parameter not used	0,000

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACIA. 2004. *Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment*. New York : Cambridge University Press, 139 p.
- AITKEN, A.E. et R. GILBERT. 1996. « Marine mollusca from Expedition Fiord, Western Axel Heiberg Island, Northwest Territories, Canada ». *Arctic*, volume 49, pp. 29-43.
- AMBROSE JR., W.G., M.L. CARROLL, M. GREENACRE, S.R. THORROLD et K.W. McMAHON. 2006. « Variation in *Serripes groenlandicus* (Bivalvia) growth in a Norwegian high-Arctic fjord: evidence for local- and large-scale climatic forcing ». *Global Change Biology*, volume 12, pp. 1595-1607.
- BARATS, A. 2006. « Micro analyse quantitative des éléments traces dans la calcite de la coquille Saint-Jacques (*Pecten maximus*) par Ablation Laser ICP-MS : une archive journalière de la biogéochimie des environnements côtiers tempérés ». Thèse de doctorat en Environnement et Matériaux, Pau : Université de Pau et des Pays de l'Adour, 301 p.
- BÉLANGER, D. 2009. « Utilisation de la faune macrobenthique comme bioindicateur de la qualité de l'environnement marin côtier ». Mémoire de maîtrise en écologie, Sherbrooke : Université de Sherbrooke, 67 p.
- BELL, T. et H. JOSENHANS. 1997. « The Seismic Record of Glaciation in Nachvak Fiord, Northern Labrador ». Dans T. Davies, T. Bell, A. Cooper, H. Josenhans, L. Polyak, A. Solheim, S.M. Stoker et J.A. Stravers (eds.), *Glaciated Continental Margins: An Atlas of Acoustic Images*, p. 190-193. Londres : Chapman & Hall.
- BELLAMY, E., A. LEFEBVRE, K. MAHÉ et M. de RAFÉLIS. 2009. « Croissance de la coque (*Cerastoderma edule*) en baie de Somme: Morphométrie et Marquage ». *Ifremer*, 54 p.
- BENTLEY, S.J. et E. KAHLMEYER. 2012. « Patterns and mechanisms of fluvial sediment flux and accumulation in two sub-arctic fjords: Nachvak and Saglek

fjords, Nunatsiavut, Canada ». *Canadian Journal of Earth Sciences*, volume 49, pp. 1200-1215.

BEUKEMA, J.J et G.C. CADÉE. 1991. « Growth rates of the bivalve *Macoma balthica* in the Wadden Sea during a period of eutrophication: relationships with concentrations of pelagic diatoms and flagellates ». *Marine Ecology Progress Series*, volume 68, pp. 249-256.

BJERKNES, J. 1964. « Atlantic air-sea interaction ». *Advanced Geophysics*, volume 10, pp. 1-82.

BLAND, J.M. et D.G. ALTMAN. 1997. « Statistics notes: Cronbach's alpha ». *British Medical Journal*, volume 314, pp. 572.

BREY, T. 2004. « Population dynamics in benthic invertebrates: A virtual Handbook ». En ligne <<http://www.thomas-brey.de/science/virtualhandbook/navlog/index.html>>. Consulté le 7 juillet 2014.

BROWN, T., Ken REIMER, Tom SHELDON et Trevor BELL. 2013. « Un premier aperçu des écosystèmes des kangidualuk (fjords) du Nunatsiavut ». Dans M. Allard et M. Lemay (eds.), *De la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation*, p. 283-315. Québec : ArcticNet Inc.

BUTLER, P.G., C.A. RICHARDSON, J.D. SCOURSE, A.D. WANAMAKER JR., T.M. SHAMMON et J.D. BENNELL. 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*, volume 29, pp. 1614-1632.

CAI, S. 2006. « Paleoenvironmental interpretation of late glacial and post-glacial fossil marine molluscs, Eureka Sound, Canadian Arctic Archipelago ». Mémoire de maîtrise en géographie, Saskatoon : University of Saskatchewan, 150 p.

CAIRNS, J. et J.R. PRATT. 1993. « A history of biological monitoring using benthic macroinvertebrates ». Dans D. M. Rosenberg et V. H. Resh (eds.), *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*, p. 10-27. New York : Chapman and Hall.

- CAMPBELL, P.G.C. 1995. « Interaction between trace metals and aquatic organisms: a critique of the free-ion activity model ». Dans A. Tessier et D.R. Turner (eds.), *Metal speciation and bioavailability in aquatic system*, p. 45-102. New York : John Wiley & Sons Ltd.
- CAMPELO, F., I. GARCIA-GONZALEZ et C. NABAIS. 2012. « detrendeR: A graphical user interface to process and visualize tree-ring data using R ». *Dendrochronologia*, volume 30, pp. 57-60.
- CARMACK, E. et P. WASSMANN. 2006. « Food webs and physical-biological coupling on pan-Arctic shelves: Unifying concepts and comprehensive perspectives ». *Progress in Oceanography*, volume 71, pp. 446-477.
- CARROLL, M.L., B.J. JOHNSON, G.A. HENKES, K.W. MCMAHON, A. VORONKOV, W.G. AMBROSE JR. et S.G. DENISENKO. 2009. « Bivalves as indicators of environmental variation and potential anthropogenic impacts in the southern Barents Sea ». *Marine Pollution Bulletin*, volume 59, numéro 4-7, pp. 193-206.
- CARROLL, M.L., W.G. AMBROSE JR., B.S. LEVIN, W.L. LOCKE V, G.A. HENKES, H. HOP et P.E. RENAUD. 2011. « Pan-Svalbard growth rate variability and environmental regulation in the Arctic bivalve *Serripes groenlandicus* ». *Journal of Marine Systems*, volume 88, pp. 239-251.
- CARROLL, M.L., W.G. AMBROSE JR., W.L. LOCKE V, S.K. RYAN et B.J. JOHNSON. 2013. « Bivalve growth rate and isotopic variability across the Barents Sea Polar Front ». *Journal of Marine Systems*, volume 130, pp. 167-180.
- COOK, E.R. et K. PETERS. 1981. « The smoothing spline: a new approach to standardization forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies ». *Tree-Ring Bulletin*, volume 41, pp. 45-53.
- COPELAND, A., E. EDINGER, T. BELL, P. LEBLANC, J. WROBLEWSKI et R. DEVILLERS. 2012. « Geomorphic Features and Benthic Habitats of a Sub-Arctic Fjord: Gilbert Bay, Southern Labrador, Canada ». Dans P.T. Harris et E.K. Baker (eds.), *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat: GeoHAB Atlas of Seafloor Geomorphic Features and Benthic Habitats*, p. 309-327. Massachusetts : Elsevier.

- DALE, J.E., A.E. AITKEN, R. GILBERT et M.J. RISK. 1989. « Macrofauna of Canadian Arctic fjords ». *Marine Geology*, volume 85, pp. 331-358.
- DAME, R.F. 2012. *Ecology of Marine Bivalves: An Ecosystem Approach*. 2^e édition. Londres : CRC Press, 271 p.
- DAUVIN, J.-C. 2007. « Paradox of estuarine quality: Benthic indicators and indices, consensus or debate for the future ». *Marine Pollution Bulletin*, volume 55, pp. 271-281.
- DEKKER, R. et J.J. BEUKEMA. 1999. « Relations of summer and winter temperatures with dynamics and growth of two bivalves, *Tellina tenuis* and *Abra tenuis* on the northern edge of their distribution ». *Journal of Sea Research*, volume 42, pp. 207-220.
- DILLON, J.F. et G.R. CLARK. 1980. « Growth-line analysis as a test for contemporaneity in populations ». Dans D. C. Rhoads et R. A. Lutz (eds.), *Skeletal Growth of Aquatic Organisms*, p. 395-415. New York : Plenum Press.
- DONEY, S.C., M. RUCKELSHAUS, J.E. DUFFY, J.P. BARRY, F. CHAN, C.A. ENGLISH, H.M. GALINDO, J.M. GREBMEIER, A.B. HOLLOWED, N. KNOWLTON, J. POLOVINA, N.N. RABALAIS, W.J. SYDEMAN et L.D. TALLEY. 2012. « Climate Change Impacts on Marine Ecosystems ». *Annual Review of Marine Science*, volume 4, pp. 11-37.
- DOWDESWELL, E.K. et J.T. ANDREWS. 1985. « The fiords of Baffin Island: Description and classification ». Dans J.T. Andrews (ed.), *Quaternary Environments: Eastern Canadian Arctic, Baffin Bay and West Greenland*, p. 93-123. Boston : Allen and Unwin.
- DYKE, A.S., J.E. DALE et R.N. McNEELY. 1996. « Marine mollusks as indicators of environmental change in glaciated North America and Greenland during the last 18 000 years ». *Géographie physique et Quaternaire*, volume 50, pp. 125-184.
- FICHOT, C.G., K. KAISER, S.B. HOOKER, R.M.W. AMON, M. BABIN, S. BÉLANGER, S.A. WALKER et R. BENNER. 2013. « Pan-Arctic distributions of continental runoff in the Arctic Ocean ». *Scientific Reports*, volume 1053, pp. 1-6.

- FRITTS, H.C. 1971. « Dendroclimatology and dendroecology ». *Quaternary Research*, volume 1, pp. 419-449.
- GARRIC, J., S. MORIN et F. VINCENT-HUBERT. 2010. « Les biomarqueurs en écotoxicologie : définition, intérêt, limite, usage ». *Sciences Eaux & Territoires*, volume 1, pp. 12-17.
- GENIN, B., C. CHAUVIN et F. MÉNARD. 2003. *Cours d'eau et indices biologiques: pollution, méthodes, IBGN*. Dijon : Educagri Éditions, 221 p.
- GIGUÈRE, A. 2003. « Accumulation et répartition subcellulaire des métaux (CD, CU, ZN, NI) chez deux organismes aquatiques exposés à un gradient métallique en milieu naturel : liens avec le stress oxydant ». Thèse de doctorat en Sciences de l'eau et de l'environnement, Québec : INRS-Eau, Terre et Environnement, 266 p.
- GILBERT, R. 2000. « Environmental assessment from the sedimentary record of high-latitude fiords ». *Geomorphology*, volume 32, pp. 295-314.
- GILLIKIN, D.P., F. DE RIDDER, H. ULENS, M. ELSKENS, E. KEPPENS, W. BAEYENS et F. DEHAIRS. 2005. « Assessing the reproducibility and reliability of estuarine bivalve shells (*Saxidomus giganteus*) for sea surface temperature reconstruction: Implications for paleoclimate studies ». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, volume 228, pp. 70-85.
- GORDILLO, S. et A.E. AITKEN. 2001. « Post glacial succession and palaeoecology of Late Quaternary macrofaunal assemblages from the central Canadian Arctic Archipelago ». *Boreas*, volume 30, pp. 61-72.
- GOSLING, E. 2003. *Bivalve Molluscs: Biology, Ecology and Culture*. Massachusetts : Blackwell Publishing, Inc., 443 p.
- GRAF, G., S.A. GERLACH, P. LINKE, W. QUEISSER, W. RITZRAU, A. SCHELTZ, L. THOMSEN et U. WITTE. 1995. « Benthic-pelagic coupling in the Greenland-Norwegian sea and its effect on the geological record ». *Geologische Rundschau*, volume 84, numéro 1, pp. 49-58.
- GULLAND, J.A. 1969. « Manual of Methods for Fish Stock Assessment – Part I: Fish Population Analysis ». *FAO Manuals in Fisheries Science*, numéro 4.

- HERNANDEZ-LLAMAS, A. et D.A. RATKOWSKY. 2004. « Growth of fishes, crustaceans and molluscs: estimation of the von Bertalanffy, Logistic, Gompertz and Richards curves and a new growth model ». *Marine Ecology Progress Series*, volume 282, pp. 237-244.
- HOWE, J.A, W.E.N. AUSTIN, M. FORWICK et M. PAETZEL. 2010. *Fjord Systems and Archives*. Londres : Geological Society, 380 p.
- HURRELL, J.W. 1995. « Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Temperatures and Precipitation ». *Science*, volume 269, numéro 5224, pp. 676-679.
- HURRELL, J.W. et C. DESER. 2009. « North Atlantic climate variability: The role of the North Atlantic Oscillation ». *Journal of Marine Systems*, volume 78, pp. 28-41.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Genève : IPCC, 104 p.
- JONES, D.S., M.A. ARTHUR et D.J. ALLARD. 1989. « Sclerochronological records of temperature and growth from shells of *Mercenaria mercenaria* from Narragansett Bay, Rhode Island ». *Marine Biology*, volume 102, pp. 225-234.
- JONES, P.D., T. JONSSON et D. WHEELER. 1997. « Extension to the North Atlantic oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland ». *International Journal of Climatology*, volume 17, numéro 13, pp. 1433-1450.
- KUZYK, Z.A., J.P. STOW, N.M. BURGESS, S.M. SOLOMON et K.J. REIMER. 2005. « PCBs in sediments and coastal food web near a local contaminant source in Saglek Bay, Labrador ». *Science of the Total Environment*, volume 351-352, pp. 264-284.
- LÉVÊQUE, C. 1971. « Équation de von Bertalanffy et croissance des mollusques benthiques du lac Tchad ». *Hydrobiologia*, volume 5, numéros 3-4, pp. 3-45.
- LEWIS, D.E. et R.M. CERRATO. 1997. « Growth uncoupling and the relationship between shell growth and metabolism in the soft shell clam *Mya arenaria* ». *Marine Ecology Progress Series*, volume 158, pp. 177-189.

- LINK, H., P. ARCHAMBAULT, T. TAMELANDER, P.E. RENAUD et D. PIEPENBURG. 2011. « Spring-to-summer changes and regional variability of benthic processes in the western Canadian Arctic ». *Polar Biology*, volume 34, pp. 2025-2038.
- MANTOURA, R.F.C. et C.A. LLEWELLYN. 1983. « The rapid determination of algal chlorophyll and carotenoid pigments and their breakdown products in natural waters by reverse-phase high-performance liquid chromatography ». *Analytica Chimica Acta*, volume 151, pp. 297-314.
- MARSH, R., B. PETRIE, C.R. WEIDMAN, R.R. DICKSON, J.W. LODER, C.G. HANNAH, K. FRANK et K. DRINKWATER. 1999. « The 1882 tilefish kill — a cold event in shelf waters off the north-eastern United States? ». *Fisheries Oceanography*, volume 8, numéro 1, pp. 39-49.
- MAZZARELLA, A. et N. SCAFETTA. 2012. « Evidences for a ~60-year North Atlantic Oscillation since 1700 and its meaning for global climate change ». *Theoretical Applied Climatology*, volume 107, numéro 1, pp. 599-609.
- MØLLER, A.P. et M.D. JENNIONS. 2002. « How much variance can be explained by ecologists and evolutionary biologists? ». *Oecologia*, volume 132, pp. 492-500.
- MORATA, N. et P.E. RENAUD. 2008. « Sedimentary pigments in the western Barents Sea: A reflection of pelagic-benthic coupling? ». *Deep-Sea Research II*, volume 55, pp. 2381-2839.
- MORATA, N., P.E. RENAUD, S. BRUGEL, K.A. HOBSON et B.J. JOHNSON. 2008. « Spatial and seasonal variations in the pelagic-benthic coupling of the southeastern Beaufort Sea revealed by sedimentary biomarkers ». *Marine Ecology Progress Series*, volume 371, pp. 47-63.
- NAKAOKA, M. et S. MATSUI. 1994. « Annual variation in the growth rate of *Yoldia notabilis* (Bivalvia: Nuculanidae) in Otsuchi Bay, northeastern Japan, analyzed using shell microgrowth patterns ». *Marine Biology*, volume 119, pp. 397-404.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1990. *Managing Troubled Waters: The Role of Marine Environmental Monitoring*. Washington : The National Academies Press, 136 p.

- NICOL, D. 1967. « Some characteristics of cold water marine pelecypods ». *Journal of Paleontology*, volume 41, pp. 1330-1340.
- NOAA. 2008. « Fjord-type Estuaries » Dans NOAA Ocean Service. En ligne. <http://oceanservice.noaa.gov/education/kits/estuaries/media/supp_estuar05b_fjord.html>. Consulté le 3 décembre 2013.
- NOLAN, C.P. et A. CLARKE. 1993. « Growth in the bivalve *Yoldia eightsi* at Signy Island, Antarctica, determined from internal shell increments and calcium-45 incorporation ». *Marine Biology*, volume 117, pp. 243-250.
- OSBORN, T.J., K.R. BRIFFA, S.F.B. TETT, P.D. JONES et R.M. TRIGO. 1999. « Evaluation of the North Atlantic Oscillation as simulated by a coupled climate model ». *Climate Dynamics*, volume 15, pp. 685-702.
- OTTERSEN, G., B. PLANQUE, A. BELGRANO, E. POST, P.C. REID et N.C. STENSETH. 2001. « Ecological effects of the North Atlantic Oscillation ». *Oecologia*, volume 128, pp. 1-14.
- OVERPECK, J., K. HUGHEN, D. HARDY, R. BRADLEY, R. CASE, M. DOUGLAS, B. FINNEY, K. GAJEWSKI, G. JACOBY, A. JENNINGS, S. LAMOUREUX, A. LASCA, G. MACDONALD, J. MOORE, M. RETELLE, S. SMITH, A. WOLFE et G. ZIELINSKI. 1997. « Arctic Environmental Change of the Last Four Centuries ». *Science*, volume 278, pp. 1251-1256.
- PANNELLA, G. et C. MACCLINTOCK. 1968. « Biological and environmental rhythms reflected in molluscan shell growth ». *Journal of Paleontology*, volume 42, pp. 64-80.
- PAPE, E., D.O.B. JONES, E. MANINI, T.N. BEZERRA et A. VANREUSEL. 2013. « Benthic-Pelagic Coupling: Effects on Nematode Communities along Southern European Continental Margins ». *PLoS ONE*, volume 8, numéro 4, pp. 1-14.
- PEACOCK, J.D. 1989. « Marine molluscs and Late Quaternary environmental studies ». *Quaternary Science Reviews*, volume 8, pp. 179-192.

- PECK, L.S. et L.W. BULLOUGH. 1993. « Growth and population structure in the infaunal bivalve *Yoldia eightsi* in relation to iceberg activity at Signy Island, Antarctica ». *Marine Biology*, volume 117, pp. 235-241.
- PIER, M.D., A. BETTS-PIPER, C. KNOWLTON, B.A. ZEEB et K. REIMER. 2003. « Redistribution of Polychlorinated Biphenyls from a Local Point Source: Terrestrial Soil, Freshwater Sediment, and Vascular Plants as Indicators of the Halo Effect ». *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, volume 35, numéro 3 pp. 349-360.
- QUINN, G.P. et M.J. KEOUGH. 2002. *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. New York : Cambridge University Press, 537 p.
- RADERMACHER, P., B.R. SCHÖNE, E. GISCHLER, W. OSCHMANN, J. THÉBAULT et J. FIEBIG. 2009. « Sclerochronology – a highly versatile tool for mariculture and reconstruction of life history traits of the queen conch, *Strombus gigas* ». *Aquatic Living Resources*, volume 22, pp. 307-318.
- RENAUD, P.E., N. MORATA, M.L. CARROLL, S.G. DENISENKO et M. REIGSTAD. 2008. « Pelagic-benthic coupling in the western Barents Sea: Processes and time scales ». *Deep-Sea Research II*, volume 55, numéro 20-21, pp. 2372-2380.
- RHOADS, D.C. et R.A. LUTZ. 1980. *Skeletal growth of aquatic organisms*. New York : Plenum Publishing Corporation, 750 p.
- RIAUX-GOBIN, C. et B. KLEIN. 1993. « Microphytobenthic biomass measurement using HPLC and conventional pigments analysis ». Dans P. Kemp, B. Sherr, E. Sherr et J.J. Cole (eds.), *Current Methods in Aquatic Microbial Ecology*, p. 369-376. Boca Raton : Lewis Publishers.
- RIAUX-GOBIN, C., A. DINET, G. DUGUÉ, G. VÉTION, E. MARIA et A. GRÉMARE. 2004. « Phytodetritus at the sediment-water interface, NW Mediterranean Basin: spatial repartition, living cells signatures, meiofaunal relationships ». *Scientia Marina*, volume 68, numéro 1, pp. 7-21.

- RICHEROL, T., R. PIENITZ et A. ROCHON. 2012. « Modern dinoflagellate cyst assemblages in surface sediments of Nunatsiavut fjords (Labrador, Canada) ». *Marine Micropaleontology*, volume 88-89, pp. 54-64.
- SAHA, S., S. MOORTHY, H.-L. PAN, X. WU, J. WANG, S. NADIGA, P. TRIPP, R. KISTLER, J. WOOLLEN, D. BEHRINGER, H. LIU, D. STOKES, R. GRUMBINE, G. GAYNO, J. WANG, Y.-T. HOU, H.-Y. CHUANG, H.-M.H. JUANG, J. SELA, M. IREDELL, R. TREADON, D. KLEIST, P. VAN DELST, D. KEYSER, J. DERBER, M. EK, J. MENG, H. WEI, R. YANG, S. LORD, H. VAN DEN DOOL, A. KUMAR, W. WANG, C. LONG, M. CHELLIAH, Y. XUE, B. HUANG, J.-K. SCHEMM, W. EBISUZAKI, R. LIN, P. XIE, M. CHEN, S. ZHOU, W. HIGGINS, C.-Z. ZOU, Q. LIU, Y. CHEN, Y. HAN, L. CUCURULL, R.W. REYNOLDS, G. RUTLEDGE et M. GOLBERG. 2010. « The NCEP Climate Forecast System Reanalysis ». *American Meteorological Society*, volume 91, pp. 1015-1057.
- SALL, J., L. CREIGHTON et A. LEHMAN. 2007. *JMP® Start Statistics: A Guide to Statistics and Data Analysis Using JMP®*, 4e édition, Cary : SAS Institute.
- SANTARELLI, L et P. GROS. 1985. « Détermination de l'âge et de la croissance de *Buccinum undatum* L. (Gasteropoda : Prosobranchia) à l'aide des isotopes stables de la coquille et de l'ornementation operculaire ». *Oceanologica Acta*, volume 8, numéro 2, pp. 221-229.
- SCHÖNE, B.R., A.D. FREYRE CASTRO, J. FIEBIG, S.D. HOUK, W. OSCHMANN et I. KRÖNCKE. 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*, volume 212, pp. 215-232.
- SCHÖNE, B.R., E. DUNCA, J. FIEBIG et M. PFEIFFER. 2005. « Mutvei's solution: An ideal agent for resolving microgrowth structures of biogenic carbonates ». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, volume 228, pp. 149-66.
- SERJ, M.K., M.E. BLICHER et S. RYSGAARD. 2009. « Sea ice cover affects inter-annual and geographic variation in growth of the Arctic cockle *Clinocardium ciliatum* (Bivalvia) in Greenland ». *Marine Ecology Progress Series*, volume 389, pp. 149-158.

- SIMSTICH, J., I. HARMS, M.J. KARCHER, H. ERLLENKEUSER, V. STANOVY, L. KODINA, D. BAUCH et R.F. SPIELHAGEN. 2005. « Recent freshening in the Kara Sea (Siberia) recorded by stable isotopes in Arctic bivalve shells ». *Journal of Geophysical Research*, volume 110, pp. 1-11.
- SMAAL, A.C. et J. WIDDOWS. 1994. « The scope for growth of bivalves as an integrated response parameter in biological monitoring ». Dans K. Kramer (éd.), *Biomonitoring of Coastal Waters and Estuaries*, p. 247-268. Boca Raton : CRC Press.
- SØRENSEN, H.L. 2012. « Seasonal dynamics in benthic metabolism in a subarctic fjord ». Mémoire de maîtrise en océanographie, Danemark : University of Southern Denmark, 73 p.
- SPELLERBERG, I.F. 2005. *Monitoring Ecological Change*. 2^e édition. New York : Cambridge University Press, 412 p.
- SUN, J., H. WANG et W. YUAN. 2008. « Decadal variations of the relationship between the summer North Atlantic Oscillation and middle East Asian air temperature ». *Journal of Geophysical Research*, volume 113, pp. 1-11.
- SYVITSKI, J.M.P. et J.M. SKEI. 1983. « Sedimentology of fjords ». *Sedimentary Geology*, volume 36, numéro 2, pp. 75-342.
- SYVITSKI, J.M.P., D.C. BURRELL et J.M. SKEI. 1987. *Fjords: processes and products*. New York : Springer-Verlag, 379 p.
- SYVITSKI, J.P.M. et J. SHAW. 1995. « Sedimentology and geomorphology of fjords ». Dans G.M.E. Perillo (éd.), *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries, Developments in Sedimentology*, volume 53, pp. 113-178.
- TORRES, M.E., D. ZIMA, K.K. FALKNER, R.W. MACDONALD, M. O'BRIEN, B.R. SCHÖNE et T. SIFERD. 2011. « Hydrographic Changes in Nares Strait (Canadian Arctic Archipelago) in Recent Decades Based on $\delta^{18}\text{O}$ Profiles of Bivalve Shells ». *Arctic*, volume 64, numéro 1, pp. 45-58.

- USHER, M.B. 2005. « Principles of Conserving the Arctic's Biodiversity ». Dans C. Symon, L. Arris et B. Heal (éd.), *Arctic Climate Impact Assessment*, pp. 539-587.
- VAKILY, J.M. 1992. *Determination and Comparison of Bivalve Growth, with Emphasis on Thailand and Other Tropical Areas*. Manila : International Center for Living Aquatic Resources Management, 125 p.
- VAUGHAN, H., T. BRYDGES, A. FENECH et A. LUMB. 2001. « Monitoring long-term ecological changes through the Ecological Monitoring and Assessment Network: science-based and policy relevant ». *Environmental Monitoring and Assessment*, volume 67, pp. 3-28.
- VILLANUEVA, J. et D.W. HASTINGS. 2000. « A century-scale record of the preservation of chlorophyll and its transformation products in anoxic sediments ». *Geochimica et Cosmochimica Acta*, volume 64, pp. 2281-2294.
- VISBECK, M., H. CULLEN, G. KRAHMAN et N. NAIK. 1998. « An ocean model's response to North Atlantic Oscillation - like wind forcing ». *Geophysical Research Letters*, volume 25, pp. 4521-4524.
- WANAMAKER JR., A.D., S. HETZINGER et J. HALFAR. 2011. « Reconstructing mid- to high-latitude marine climate and ocean variability using bivalves, coralline algae, and marine sediment cores from the Northern Hemisphere ». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, volume 302, pp. 1-9.
- WIDDOWS, J. et P. DONKIN. 1992. « Mussels and environmental contaminants: bioaccumulation and physiological aspects ». Dans E. Gosling (éd.), *The Mussel Mytilus: Ecology, Physiology, Genetics and Culture*, p. 383-424. Amsterdam : Elsevier Science Publishers.