

**Les dépôts coquilliers de Baie-Comeau (Québec, Canada) :
Communautés d'invertébrés marins, compositions isotopiques, géochimiques
et reconstructions paléo-environnementales**

Andréanne Bourgeois-Roy

Thèse soumise à la Faculté des études supérieures et postdoctorales dans le
cadre des exigences du programme de maîtrise ès sciences en géographie

Département de géographie
Université d'Ottawa
Ottawa, Canada

Superviseur:

Dr Denis Lacelle

Co superviseur:

Dr André Martel

Comité de thèse:

Dr Konrad Gajewski

Dr Bernard Lauriol

Résumé

On retrouve dans la vallée de la rivière aux Anglais, dans la région de Baie-Comeau, sur la Haute-Côte-Nord du Saint-Laurent, d'importants dépôts coquilliers naturels holocènes. Datés de 10,4 à 9,6 ka BP (Bernatchez et al., 1999), ils ont été formés lors de la submersion par la mer de Goldthwait. Une étude détaillée des invertébrés marins composant un de ces dépôts ainsi que des analyses isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) et géochimiques effectuées sur des coquilles de *Mytilus edulis* ont permis de décrire l'habitat dans lequel les invertébrés de ce dépôt ont vécu. La communauté marine identifiée et les compositions $\delta^{18}\text{O}$ ont démontré que les espèces du dépôt ont vécu dans un milieu marin assez stable, froid, peu profond et de salinité supérieure à 20 ‰. Les compositions $\delta^{18}\text{O}$ ont aussi démontré que la température moyenne annuelle de l'eau dans la mer de Goldthwait était environ 6 °C plus froide que celle de l'eau de l'estuaire maritime du Saint-Laurent moderne.

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de thèse, Dr Denis Lacelle. Merci Denis pour ta patience légendaire et tes judicieux conseils. Tes connaissances en géographie et ton expérience en tant que chercheur de renommée m'ont été fort utiles au cours de ces deux dernières années. Merci pour tout le temps que tu as consacré à la lecture et à la relecture de ma thèse, à faire les plus beaux montages de photos ainsi qu'à rendre mes cartes et mes graphiques les plus attrayants que possible. Je vais garder un très beau souvenir de cette grande aventure.

J'aimerais grandement remercier mon co directeur de thèse, le Dr André Martel du Musée canadien de la nature. Merci André pour ta patience du tonnerre, tes judicieux conseils et pour tout le temps que tu as accordé au cours des deux dernières années à m'assister dans mes identifications. Merci aussi d'avoir partagé ton savoir infini en malacologie. Tu as vraiment su me transmettre ta passion. Je vais garder le plus beau des souvenirs de mon expérience au musée. J'aimerais aussi remercier toute l'équipe du musée pour m'avoir laissé utiliser ses collections et son matériel de laboratoire. Merci à Sheila Edwards et à Jacqueline Madill de m'avoir assisté lors du tri de mes échantillons et de l'identification des espèces.

Je souhaite aussi remercier mon comité d'évaluation de thèse de l'Université d'Ottawa. Merci Dr Konrad Gajewski et Dr Bernard Lauriol pour le temps que vous avez consacré à la lecture de cette thèse et pour les commentaires que vous m'avez fournis.

Merci au coordonnateur des laboratoires d'enseignement du Département de Géographie, Jean Bjornson. Merci Jean pour ton aide technique dans les laboratoires. J'ai bien aimé nos discussions concernant tes cours et tes camps de terrain enseignés ainsi que sur la vie en général. Merci aussi pour tes judicieux conseils. Je suis aussi reconnaissante envers Chantal Arcand du personnel du département de Géographie. Grâce à toi j'ai eu la chance d'avoir un environnement de travail adéquat. Merci aussi d'avoir partagé ta bonne humeur avec moi.

Merci au Dr Pascal Bernatchez de l'Université du Québec à Rimouski, à Mathieu Payette ainsi qu'à ses collègues du Jardin des Glaciers de Baie-Comeau pour leur assistance sur le terrain et au plongeur Sylvain Sirois et son collègue pour avoir recueilli des moules dans la baie de Saint-Pancrace. J'aimerais aussi remercier Paul Middlestead et Wendy Abdy (Laboratoire G.G. Hatch, Université d'Ottawa) pour la supervision des analyses isotopiques ainsi que Nimal DeSilva (Laboratoire de géochimie, Université d'Ottawa) pour la supervision des analyses géochimiques.

Finalement, je ne pourrai jamais remercier suffisamment ma famille pour tous les encouragements donnés ainsi que pour les conseils et les expériences de vie partagés avec moi. Merci de m'avoir permis de décrocher quand il le fallait. Surtout, merci d'avoir cru en moi! Merci aussi à ma collègue de bureau et grande amie Catherine Paquette. On a réussi! J'ai adoré toutes nos discussions, au tour d'un bon café, concernant l'expérience de la maîtrise en général et sur tout ce qui ne touchait pas à la maîtrise. Merci pour ton support et bonne chance à Toronto!

Cette recherche a été réalisée avec le soutien du Département de Géographie de l'Université d'Ottawa. Elle a aussi été financée par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, le Fonds de recherche du Québec-Nature et Technologies et le Régime d'aide financière aux étudiants de l'Ontario. Je suis reconnaissante envers ces agences pour ce support financier qui m'a permis de mener à bien ce projet.

Table des matières

Résumé	II
Remerciements	III
1. Introduction	1
2. Site d'étude	4
3. Revue de littérature	8
3.1 Le Wisconsinien supérieur et le début de l'Holocène	8
3.2 La déglaciation sur la Côte-Nord du Québec	10
3.3 Les mers post-glaciaires du Québec	11
3.4 Reconstruction paléo-océanique à partir d'invertébrés marins.....	14
3.5. Invertébrés marins dans les mers post-glaciaires du Québec	19
3.6 Reconstruction des paléo-températures marines à l'aide de l'oxygène-18 et du Mg/Ca de carbonates marins	20
3.7 Reconstruction des paléo-salinités marines à partir des éléments mineurs et de l'oxygène-18 de carbonates marins	23
3.8 Effets des paramètres de croissance et de l'activité métabolique des mollusques sur les archives environnementales	25
3.9 Datation d'organismes marins au carbone-14.....	27
3.10 La mer de Goldthwait: Communautés marines et compositions isotopiques.....	28
4. Méthodologie.....	31
4.1 Méthodes sur le terrain	31
4.1.1 Échantillonnage du falun 1	31
1.2 Installation de capteurs thermiques et échantillonnage de l'eau de l'estuaire maritime du Saint-Laurent	32
4.1.3 Collecte de coquilles de <i>Mytilus edulis</i> modernes	33
4.2 Méthodes en laboratoire	33
4.2.1 Analyses isotopiques (^{18}O -D) et géochimiques de l'estuaire maritime du Saint-Laurent	33
4.2.1 Tri des échantillons du falun 1	34
4.2.2 Identification des espèces du falun 1-	35
4.2.3 Décompte des espèces de chacun des horizons du falun 1 et analyses statistiques	35
4.2.4 Analyses isotopiques (^{13}C et ^{18}O) de coquilles de <i>Mytilus edulis</i>	37
4.2.5 Analyses géochimiques de coquilles de <i>Mytilus edulis</i>	39

5. Résultats.....	40
5.1 Conditions actuelles de l'estuaire maritime du Saint-Laurent	40
5.2 Les invertébrés marins du falun 1.....	45
5.3 Analyses isotopiques et géochimiques des coquilles de <i>Mytilus edulis</i> modernes	55
5.4 Analyses isotopiques et géochimiques des coquilles de <i>Mytilus edulis</i> du falun 1	59
5.4.1 Hauteur 1,25 m	59
6. Discussion.....	65
6.1 Invertébrés marins du falun 1.....	65
6.1.1 Analyses multivariées de l'abondance des espèces du falun 1	65
6.2 Comparaison des compositions isotopiques et géochimiques des coquilles modernes de <i>Mytilus edulis</i> en fonction de l'âge des coquilles	68
6.3 Comparaison des compositions isotopiques et géochimiques des coquilles de <i>Mytilus edulis</i> du falun 1	71
6.4 Comparaison entre les compositions isotopiques et géochimiques des coquilles de <i>Mytilus edulis</i> modernes et celles du falun 1.....	73
6.5 Comparaison entre les compositions isotopiques moyennes ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) des coquilles du falun 1 et celles des faunes fossiles des mers post-glaciaires.....	76
6.6 Reconstructions paléo-environnementales à partir des invertébrés marins et des compositions isotopiques du falun 1.....	80
Conclusion.....	83
Bibliographie	85
Annexe 1. Compositions isotopiques et géochimiques des échantillons d'eau	92
Annexe 2. Compositions isotopiques et géochimiques des coquilles modernes (M1-B correspond à la coquille des Battures de Manicouagan; M1-A à celle de l'Anse à Moreau; M1-SP à celle de la baie de Saint-Pancrace)	93
Annexe 3. Compositions isotopiques et géochimiques des coquilles du falun 1 (M1-1.25 correspond à la coquille de 1,25 m; M1-2.50 à celle de 2,5 m; M1-3.75 à celle de 3,75 m; M1-5 à celle de 5 m).....	96

Liste des Tableaux

Tableau 1. Facteurs déterminants à la présence et au développement de certains invertébrés marins (Hillaire-Marcel, 1980).....	17
Tableau 2. Taxons identifiés au falun 1 par Bernatchez et al. (1999) ainsi que par Coutu et Bernatchez (2005).....	48
Tableau 3. Taxons composant le falun 1 de Baie-Comeau.....	48
Tableau 4. Nombre d'individus dénombrés pour chacune des espèces ou familles en fonction de la hauteur d'échantillonnage dans le falun 1 de Baie-Comeau (échantillons de 500 ml).	53
Tableau 5. Valeurs moyennes $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ de chacune des coquilles de <i>Mytilus edulis</i> analysées et celles des mers de Goldthwait et de Champlain (valeurs des mers tirées d'Hillaire-Marcel, 1977).....	78
Tableau 6. Résultats des tests <i>t</i> comparant les compositions moyennes $\delta^{13}\text{C}$ des coquilles du falun, des coquilles de l'estuaire maritime du Saint-Laurent moderne et des faunes fossiles des mers post-glaciaires (les valeurs en gras représentent des différences très significatives).	78
Tableau 7. Résultats des tests <i>t</i> comparant les compositions moyennes $\delta^{18}\text{O}$ des coquilles du falun, des coquilles de l'estuaire maritime du Saint-Laurent moderne et des faunes fossiles des mers post-glaciaires (les valeurs en gras représentent des différences significatives).....	79
Tableau 8. Mode de vie des espèces identifiées dans le falun 1 de Baie-Comeau.....	82

Liste des Figures

Figure 1. Localisation des dépôts coquilliers de la vallée de la rivière aux Anglais, région de Baie-Comeau, Québec (carte A modifiée de Bernatchez et al., 1999).	6
Figure 2. Vue d'ensemble du falun 1. Le falun est composé essentiellement de coquilles d'invertébrés marins (95 % du volume) dans une matrice de sable (5 % du volume). L'enseigne en bois mesurant 1 m de hauteur est utilisée comme échelle.	7
Figure 3. Graphiques illustrant la température moyenne annuelle de l'air (°C) et les précipitations totales annuelles (mm) de la région de Baie-Comeau pour la période de 1970 à 2005 (données d'Environnement Canada, 2014).	7
Figure 4. Les différentes parties de l'Inlandsis laurentidien pendant le maximum glaciaire du Wisconsinien supérieur vers 18 ± 4 ka BP (Occhietti, 1987).	9
Figure 5. Localisation des mers post-glaciaires du Québec selon leurs phases d'extension (carte modifiée d'Hillaire-Marcel, 1980).	11
Figure 6. Isolignes de la limite maximale de la mer de Goldthwait (Dubois, 1977).	14
Figure 7. Graphique illustrant la relation entre la salinité (‰) et le $\delta^{18}\text{O}$ (‰) des eaux océaniques (Epstein et al., 1951)	24
Figure 8. Compositions isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$) des mers post-glaciaires (données tirées d'Hillaire-Marcel, 1977).	30
Figure 9. Les quatre sites d'échantillonnage du falun 1 (photo A prise en 2013; photo B prise en 2012 par Bernard Lauriol).	31
Figure 10. Exemples d'échantillonnage de la calcite le long de coquilles de <i>Mytilus edulis</i> pour des analyses isotopiques et géochimiques. (A) Moule de l'Anse à Moreau, 2012. (B) Moule des Battures de Manicouagan, 2012. (C) Moule de l'horizon 3,75 m du falun 1, ca. 10 ka ^{14}C . (D) Moule de l'horizon 5 m du falun 1, ca. 10 ka ^{14}C	38
Figure 11. Températures moyennes journalières de l'eau de l'estuaire maritime du Saint-Laurent enregistrées par deux capteurs thermiques indépendants placés sur l'estran, à marée basse, à l'Anse à Moreau (A, B) ainsi qu'aux Battures de Manicouagan (C, D) du 1 ^{er} septembre 2012 au 31 août 2013. Les lignes pleines représentent la température moyenne mensuelle.	42
Figure 12. Compositions isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) et géochimiques (ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca et Sr/Ca) de l'eau de l'estuaire maritime du Saint-Laurent de septembre 2012 à septembre 2013 à l'exception du mois de juin.	43
Figure 13. Diagrammes de dispersion illustrant les corrélations entre les compositions isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) ainsi que géochimiques (ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca) et la température mensuelle de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Une droite de régression linéaire a été ajoutée aux diagrammes du $\delta^{18}\text{O}$, du $\delta^2\text{H}$ et du ratio molaire Ba/Ca.	44
Figure 14. Montage de photographies illustrant les différents taxons de bivalves identifiés dans le falun 1 (échantillons de 2012).	49

Figure 15. Montage de photographies illustrant les différents taxons de gastéropodes identifiés dans le falun 1 (échantillons de 2012).....	50
Figure 16. Montage de photographies illustrant les autres espèces retrouvées d'invertébrés marins dans le falun1 et des particularités propres au dépôt.....	51
Figure 17. Montage de photographies illustrant les Buccinidae et les Naticidae identifiés par Bernatchez et <i>al.</i> (1999) ainsi que deux espèces de bivalves uniquement identifiées en 1999.	52
Figure 18. Diagramme représentant l'abondance des espèces ou familles dénombrées en fonction de la profondeur dans le falun 1. L'axe des X, de gauche à droite, illustre la profondeur (cm) dans le dépôt alors que l'axe de Y, de haut en bas, reporte le pourcentage des espèces et le nombre d'espèces présentes.	54
Figure 19. Compositions isotopiques et géochimiques de la coquille moderne M1-A, prélevée en 2012 à l'Anse à Moreau, en fonction de la distance par rapport à l'umbo. Les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ ont une précision de $\pm 0,15\text{ ‰}$ alors que les ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca et Sr/Ca ont une précision de 5%.	57
Figure 20. Compositions isotopiques et géochimiques de la coquille moderne M1-B, prélevée en 2012 aux Battures de Manicouagan, en fonction de la distance par rapport à l'umbo. Les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ ont une précision de $\pm 0,15\text{ ‰}$ alors que les ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca et Sr/Ca ont une précision de 5%.	58
Figure 21. Compositions isotopiques et géochimiques de la coquille M1-1.25, prélevée en 2012 au falun 1, en fonction de la distance par rapport à l'umbo. Les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ ont une précision de $\pm 0,15\text{ ‰}$ alors que les ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca et Sr/Ca ont une précision de 5%.	60
Figure 22. Compositions isotopiques et géochimiques de la coquille M1-3.75, prélevée en 2012 au falun 1, en fonction de la distance par rapport à l'umbo. Les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ ont une précision de $\pm 0,15\text{ ‰}$ alors que les ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca et Sr/Ca ont une précision de 5%.	62
Figure 23. Compositions isotopiques et géochimiques de la coquille M1-5, recueillie en 2012 au falun 1, en fonction de la distance par rapport à l'umbo (mm). Les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ ont une précision de $\pm 0,15\text{ ‰}$ alors que les ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca et Sr/Ca ont une précision de 5%.	64
Figure 24. Analyse de regroupement hiérarchique (<i>Cluster Analysis</i>) des données brutes d'abondance en espèce de chacun des horizons du falun 1 (transformation ($\sqrt{x}$)).	67
Figure 25. Analyse multivariée de positionnement multidimensionnel (<i>MDS</i>) des données brutes d'abondance en espèce de chacun des horizons du falun 1 (transformation: ($\sqrt{x}$)).	68
Figure 26. Compositions isotopiques et géochimiques des coquilles modernes en fonction de l'âge des coquilles (années). Les compositions de M1-B sont représentées par les losanges alors que celles de M1-A sont représentées par les carrés.	70
Figure 27. Compositions isotopiques et géochimiques des coquilles du falun 1 en fonction de l'âge des coquilles (années). Les compositions de M1-1.25 sont représentées par les triangles, celles de M1-3.75 par les losanges et celles de M1-5 par les carrés.....	72
Figure 28. Comparaison des compositions isotopiques et géochimiques des cinq coquilles. La courbe pleine en rouge est celle de M1-A; la courbe hachurée en rouge est celle de M1-B; la courbe pointillée en noir est celle de M1-1.25; la courbe pleine en noir est celle de M1-3.75 et la courbe hachurée en noir est celle de M1-5.	74

Figure 29. Variation dans l'obliquité de l'axe terrestre en fonction de l'âge (image: NASA, 2014; données: NOAA, 2014).	75
Figure 30. Comparaison entre les compositions isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) de la mer de Goldthwait, de la mer de Champlain et les compositions isotopiques moyennes ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) des coquilles du falun 1, de l'Anse à Moreau ainsi que des Battures de Manicouagan (données des mers tirées d'Hillaire-Marcel, 1977).	77

1. Introduction

Dans les sédiments du Néogène tardif et du Quaternaire, on retrouve souvent des fossiles de mollusques marins ou terrestres. En certains endroits, les fossiles représentent une grande proportion des sédiments et forment alors de véritables dépôts coquilliers. Les dépôts coquilliers ont été désignés par les géologues, les géographes et les sédimentologues par de nombreux termes anglais (*shell deposits*, *shell ridges*, *shell beds*, *shell mounds*, *shelly sands*) et français (faluns). Le terme falun désigne un dépôt sédimentaire détritique formé de coquilles ou de débris de coquilles d'invertébrés (bryozoaires, brachiopodes, échinodermes et mollusques) dans une matrice sableuse ou argilo-sableuse (Lozet et Mathieu, 2011). Plusieurs hypothèses ont été suggérées pour expliquer comment se forment les dépôts coquilliers (Bernatchez et al., 1999). L'homme a été tenu responsable de la formation des amas coquilliers «*midden*» que l'on retrouve en milieu côtier (Craig et Psuty, 1971; Killingley, 1981). Certains oiseaux sont aussi à l'origine de la formation de dépôts coquilliers comme ceux de la plaine côtière du nord de l'Australie (Stone, 1995). Ceux-ci se créent de larges buttes de coquilles pour couvrir leurs œufs. Tel que résumé par Bernatchez et al. (1999), plusieurs autres processus naturels viennent expliquer la formation et la stratification des dépôts coquilliers tels que l'effet des tempêtes (Kreisa, 1981; Kreisa et Bambach, 1982; Henderson et Frey, 1986; Meldahl, 1993), de la dérive littorale (Greensmith et Tucker, 1969; Albertzart et Wilkinson, 1990), des vagues (Gibbons, 1967; Kidwell, 1989; Meldahl, 1993; Zwiebel et Johnson, 1995), des courants de marée (Greensmith et Tucker, 1969; Henderson et Frey, 1986; Meldahl et Cutler, 1992), des transgressions et des régressions marines successives (Kidwell, 1989; Aliotta et Farinati, 1990) et des processus de sédimentation (Kidwell, 1988; Banarjee et Kidwell, 1991). On retrouve les dépôts coquilliers dans les chenaux de marée (Henderson et Frey, 1986; Davies et al., 1989), les milieux marins (Kreisa, 1981; Kreisa et Bambach, 1982; Meldahl et Cutler, 1992; Meldahl, 1993), estuariens (Greensmith et Tucker, 1969; Aliotta et Farinati, 1990) et lagunaires (Gibbons, 1967; Craig et Psuty, 1971), dans les baies (Albertzart et Wilkinson, 1990; Zwiebel et Johnson, 1995) et les plaines côtières (Kidwell 1988; Kidwell, 1989; Banarjee et Kidwell, 1991; Stone, 1995).

Les dépôts coquilliers sont surtout localisés dans les régions du golfe de Californie (Kidwell, 1988; Meldahl et Cutler, 1992; Meldahl, 1993; Zwiebel et Johnson, 1995) et du golfe du Mexique (Davies et al., 1989; Albertzart et Wilkinson, 1990). Il en existe aussi dans la

péninsule d'Ungava (Lauriol et al., 1979), en Alberta (Banarjee et Kidwell, 1991), sur la côte Est américaine (Kidwell, 1989; Kreisa 1981; Henderson et Frey, 1986), au Pérou et en Argentine (Craig et Putsy, 1971; Aliotta et Farinati, 1990), en Grande-Bretagne (Greensmith et Tucker, 1969), au Liban ainsi que dans le nord et le sud de l'Australie (Stone, 1995; Gibbons, 1967). Les amas coquilliers naturels connus dans le monde ne font rarement plus qu'un mètre d'épaisseur (Bernatchez et al., 1999). Dans les argiles marines du sud de l'Alberta, datant du Crétacé inférieur, on retrouve des surfaces d'inondation entremêlées avec des surfaces de quelques centimètres d'épaisseur, riches en coquilles (Banarjee et Kidwell, 1991). Quelques rares dépôts font plus d'un mètre de hauteur (Bernatchez et al., 1999). C'est le cas de quatre dépôts majeurs, retrouvés dans la formation de Calvert de l'État du Maryland datant du Miocène, faisant six mètres de hauteur (Kidwell, 1989). À Weipa, dans la péninsule du cap York, en Australie, la majorité des 500 dépôts coquilliers holocènes retrouvés ne dépasse pas cinq mètres d'épaisseur (Stone, 1995). De plus, les dépôts coquilliers naturels connus dans le monde ont une teneur en débris qui varie généralement de 15 à 35 % et qui n'excède guère 60 % (Bernatchez et al., 1999). Dans la province de Buenos Aires, en Argentine, la transgression marine de l'Holocène a laissé des dépôts composés à 30 % de coquilles et de fragments de coquilles (Aliotta et Farinati, 1990). Dans l'État australien de la Nouvelle-Galles du Sud, les dunes de sable de Dee Why sont composées de 35 % de débris coquilliers (Gibbons, 1967). Dans le comté d'Essex en Grande-Bretagne, sur la rive nord de la Tamise, un chénier est formé de dépôts coquilliers holocènes composés à 60 % de débris coquilliers (Greensmith et Tucker, 1968).

C'est dans la vallée de la rivière aux Anglais, dans la région de Baie-Comeau, sur la Haute-Côte-Nord du Saint-Laurent (Québec), que l'on retrouve les plus grands faluns naturels holocènes découverts au monde. Au début du 20^e siècle, les coquilles de ces dépôts étaient utilisées pour l'amendement des sols ou pour la création de routes. Ce n'est qu'au début des années 1990 que la valeur scientifique de ces amas a été mise de l'avant. Bernatchez et al. (1999) ont été les premiers à les signaler, à les décrire, à démontrer leur unicité et à émettre une hypothèse de formation. Datés de 10,4 à 9,6 ka ¹⁴C BP, les faluns de Baie-Comeau diffèrent des autres signalés dans les formations holocènes par leur épaisseur, variant de 2 à 15 m (Bernatchez et al., 1999). Ils sont également remarquables en raison de leur concentration en débris coquilliers qui peut atteindre jusqu'à 90 à 95 % du volume par endroits (Bernatchez et al., 1999). Les faluns de Baie-Comeau attirent aussi l'attention en raison du fort taux de conservation des

coquilles et du fort pourcentage d'individus complets (Bernatchez et al., 1999). En effet, plusieurs individus de *Mytilus edulis* ont encore leurs deux valves jointes. On retrouve fréquemment des spécimens de *Balanus* attachés à des coquilles de *Mytilus edulis*. Par ailleurs, sur bon nombre de coquilles adultes de gastéropodes et de bivalves, les stades juvéniles et postlarvaires sont très bien préservés. L'absence de sédiments dans les coquilles de *Mytilus edulis* encore articulées suggèrent que ces individus ont été soit transportés vivants soit enfouis rapidement dans leur biotope d'origine (Bernatchez et al., 1999).

Malgré la préservation exceptionnelle des faluns de Baie-Comeau, leur mode de formation reste inconnu. Bernatchez et al. (1999) ont proposé que ces dépôts ont été formés dans la mer de Goldthwait après une première période de relèvement isostatique, relativement courte, à la limite Pléistocène-Holocène. Ils se seraient possiblement formés dans un milieu littoral peu profond de type ria où les courants de marée et les vagues dominaient (Bernatchez et al., 1999). Le chenal sous-marin reliant la baie des Anglais et le chenal Laurentien aurait aussi contribué à concentrer les coquilles dans la vallée de la rivière aux Anglais (Bernatchez et al., 1999). De plus, l'étroitesse de la vallée et l'échancrure de la baie devaient amplifier la compétence des courants de marée et des vagues ce qui aurait favorisé l'apport en coquilles dans la vallée (Bernatchez et al., 1999). Un estran englacé pendant une certaine période de l'année et des hivers très rigoureux, successifs auraient contribué à décimer les invertébrés marins de Baie-Comeau (Bernatchez et al., 1999). Les invertébrés marins décimés représentaient alors une importante source de débris coquilliers pouvant être transportés. Cependant, la taille importante de certains individus retrouvés dans les faluns suggère que ces hivers rigoureux devaient être assez espacés ce qui aurait permis à ces individus d'atteindre un développement optimal avant de mourir (Bernatchez et al., 1999).

L'étude menée par Bernatchez et al. (1999) décrit l'assemblage d'invertébrés marins de deux des faluns (falun 1 et 2) de Baie-Comeau et suggère un mode de formation. Elle fournit cependant peu d'informations sur les conditions environnementales qui prévalaient lors de la formation des dépôts. Il est donc apparu pertinent de préciser ces conditions. C'est ce que cette thèse tente de faire pour l'un de ces faluns (falun 1) en décrivant la communauté d'invertébrés marins qui le compose et en réalisant des analyses isotopiques et géochimiques sur des coquilles adultes de *Mytilus edulis*. L'identification des différents taxons présents dans un milieu marin nous permet de déterminer les conditions environnementales dans lesquelles ces individus ont

vécu. En effet, la présence et le développement de chaque espèce dans un environnement donné nous renseigne sur la température, la salinité et la profondeur de l'eau de son milieu de croissance générale ainsi que sur la nature du substrat et sur l'apport en nourriture (Hillaire-Marcel, 1980). Les compositions en isotopes stables (^{18}O et ^{13}C) et en certains éléments chimiques (Mg/Ca, Sr/Ca) de coquilles d'invertébrés marins (bivalves, foraminifères) nous renseignent également sur les changements de température et de salinité de l'eau (Bédard et al., 1981; Killingley, 1981; Krantz et al., 1987; Israelson et al., 1994; Klein et al., 1996a; Schöne et al., 2005; Gentry et al., 2008; Pfister et al., 2011; Schöne et al., 2011; Quillmann et al., 2012; Royer et al., 2013; Mouchi et al., 2013).

Le but de cette thèse est de décrire l'habitat dans lequel les invertébrés marins du falun 1 de Baie-Comeau ont vécu. Le premier objectif est d'identifier les espèces d'invertébrés marins de ce falun, tant les micro-individus que les macro-individus, afin de déterminer le type de communauté marine qui vivait dans la mer de Goldthwait. En comparant la communauté marine qui vivait dans cette mer à celle retrouvée dans l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent moderne, il est possible de reconstituer les conditions environnementales lors de la formation du dépôt. Le second objectif est d'analyser les compositions isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$) et géochimiques (Mg/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca) de coquilles d'invertébrés marins adultes provenant du falun afin de reconstituer les conditions thermiques et salines (annuelles et saisonnières) de la mer de Goldthwait et de les comparer à celles qui prévalent aujourd'hui dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Cette recherche est pertinente en ce sens où elle décrit un site encore très peu connu du monde scientifique et dont le niveau de conservation des spécimens est très élevé, incluant de nombreux stades juvéniles parfaitement préservés. De plus, la présente étude complète celle de Bernatchez et al. (1999) et constitue une analyse isotopique et géochimique à haute résolution pour des reconstructions paléo-environnementales.

2. Site d'étude

Les faluns de Baie-Comeau sont situés dans la vallée de la rivière aux Anglais, au nord de Baie-Comeau, sur la Haute-Côte-Nord de l'estuaire maritime du Saint-Laurent (Figure 1). La vallée s'étend sur une dizaine de kilomètres de la baie des Anglais au lac Inconnu et fait cinq cent mètres de largeur (Bernatchez et al., 1999). Au total, huit faluns ont été identifiés le long de la rivière. Leur élévation varie entre 25 et 87 m. Celle-ci est inférieure à la limite maximale de la

mer de Goldthwait (170 m; Bernatchez et al., 1999). Le falun 1 (49°19'18''N; 068°09'36''O), situé à 300 m au sud du lac Inconnu et à une altitude de 80 m, est le plus remarquable des dépôts de par ses dimensions (275 x 180 x 10 m) et son volume estimé à 495 000 m³ (Figure 2) (Bernatchez et al., 1999). Étant donné que cette région est fortement boisée, il est fort probable que d'autres dépôts coquilliers existent et n'aient pas encore été découverts (Bernatchez et al., 1999).

Le falun 1 de Baie-Comeau est surtout composé de coquilles et de débris de coquilles d'invertébrés marins (95 %) avec un faible volume de matrice sableuse (Bernatchez et al., 1999). On observe plusieurs strates (environ une centaine) le long du faciès. Ces couches, mesurant généralement entre 2 et 8 cm, sont grossièrement parallèles et obliques avec un pendage variant entre 12 et 14° et atteignant parfois 35° (Bernatchez et al., 1999). En certains endroits dans le falun, on remarque une alternance entre des lits minces de sable coquillier, des lits coquilliers à matrice sableuse et des lits avec un faible volume de matrice (Bernatchez et al., 1999). La partie sommitale du falun est surtout composée de lits coquilliers pratiquement dépourvus de matrice alors que la base du falun est formée de lits plus pauvres en débris coquilliers. La partie inférieure du falun, déposée en premier, date de $10,2 \pm 100$ ka ¹⁴C BP alors que la partie sommitale, déposée en dernier, date de $9,85 \pm 100$ ka ¹⁴C BP (Bernatchez et al., 1999).

La région de Baie-Comeau (secteur de la Haute-Côte-Nord du Québec) possède un climat subarctique (Dfc selon la classification de Koppen) caractérisé par des étés courts et frais et aucune saison sèche (Peel et al., 2007). Selon les données climatiques d'Environnement Canada (2014; Figure 3), la température moyenne annuelle de l'air à la station Baie-Comeau A (49°08'N; 68°12'O; 21 m) est de $1,6 \pm 0,9$ °C. La température moyenne de l'air en janvier est de $-14,5 \pm 2,1$ °C, alors qu'en juillet, elle est de $15,7 \pm 0,8$ °C. La région de Baie-Comeau reçoit en moyenne 995 ± 140 mm de précipitations (pluie et neige) par année (Figure 3). Les précipitations neigeuses correspondent à 35 % de ce total (Environnement Canada, 2014).

Dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent à la station Baie-Comeau-A (49°12.1'N 68°03.4'O; -1 m), la température moyenne de l'eau de surface de mai à octobre 2012 est de $10,2 \pm 3$ °C (6,6 °C en mai et 14 °C en août; Observatoire global du Saint-Laurent-OGSL, 2014). La température moyenne annuelle de l'eau à 82 m de profondeur à la station Baie-Comeau-B (49°12.1'N 68°03.4'O; -82,3 m) est de $1,03 \pm 0,75$ °C (-0,2 °C en avril et 2,3 °C en novembre; Observatoire global du Saint-Laurent-OGSL, 2014). La salinité moyenne de l'eau de l'estuaire

maritime du Saint-Laurent en surface est de $25,6 \pm 1,9 \text{ ‰}$ et varie de 23 à 29 ‰ (données de la station Baie-Comeau-A pour la période de mai à octobre 2009; Observatoire global du Saint-Laurent-OGSL, 2014). Vers 15 m de profondeur, la salinité moyenne annuelle de l'eau de l'estuaire maritime du Saint-Laurent (station IML-B 2012 ($48^{\circ}39.5'N$ $68^{\circ}09.4'W$; -15m) localisée près de Métis-sur-Mer en Gaspésie, à 60,5 km au sud de Baie-Comeau), pour la période d'août 2012 à juillet 2013, est de $27,5 \pm 1,3 \text{ ‰}$ et varie entre 25 et 29,5 ‰ (Observatoire global du Saint-Laurent-OGSL, 2014).

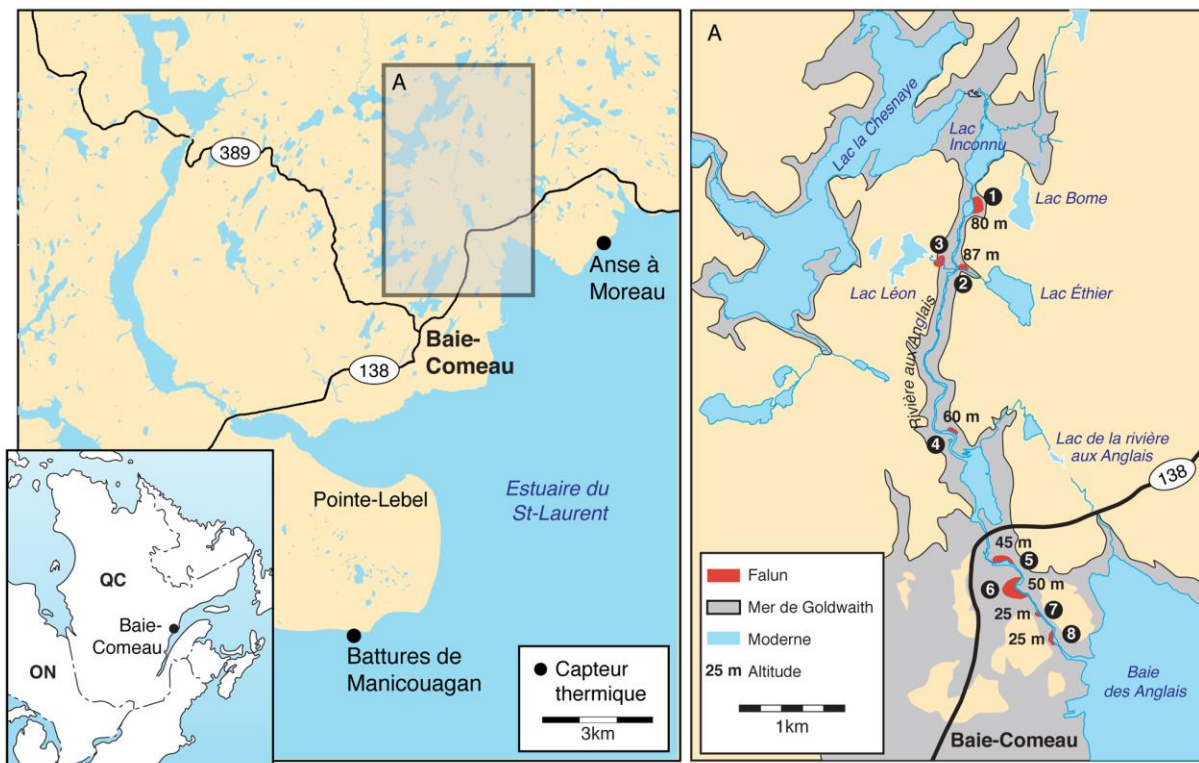


Figure 1. Localisation des dépôts coquilliers de la vallée de la rivière aux Anglais, région de Baie-Comeau, Québec (carte A modifiée de Bernatchez et al., 1999).

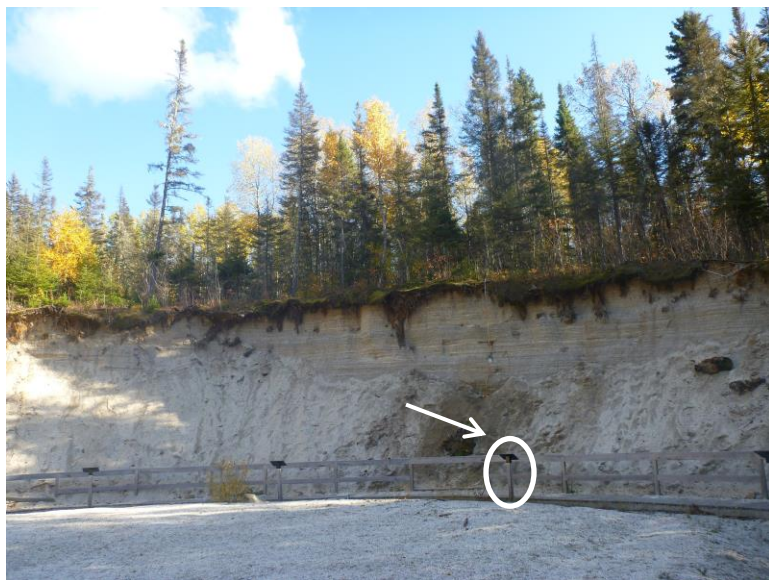


Figure 2. Vue d'ensemble du falun 1. Le falun est composé essentiellement de coquilles d'invertébrés marins (95 % du volume) dans une matrice de sable (5 % du volume). L'enseigne en bois mesurant 1 m de hauteur est utilisée comme échelle.

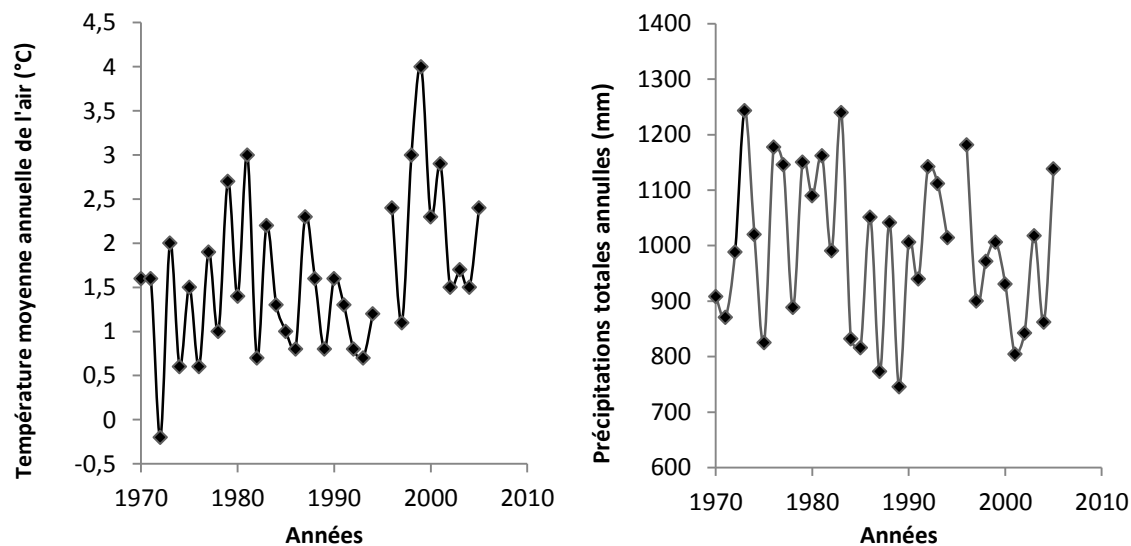


Figure 3. Graphiques illustrant la température moyenne annuelle de l'air (°C) et les précipitations totales annuelles (mm) de la région de Baie-Comeau pour la période de 1970 à 2005 (données d'Environnement Canada, 2014).

3. Revue de littérature

3.1 Le Wisconsinien supérieur et le début de l'Holocène

Durant le dernier maximum glaciaire (18 ± 4 ka BP), l'Inlandsis laurentidien recouvre près de la moitié de l'Amérique du Nord (Occhietti, 1987). Il s'étend à l'ouest sur les Plaines intérieures jusqu'aux pieds des Rocheuses, recouvertes par l'Inlandsis de la Cordillère. Au sud, il dépasse la latitude de 40° N (Occhietti, 1987). Selon Occhietti (1987), l'Inlandsis laurentidien déborde à l'est sur le plateau continental au large des côtes du Maine, de la Nouvelle-Écosse ainsi que du Labrador et dans le golfe du Saint-Laurent. L'Inlandsis s'étend même sur certaines îles du sud de l'archipel Arctique canadien, sur l'Île de Baffin et sur la bordure ouest de l'Île de Banks (Occhietti, 1987). Il est composée de trois principaux secteurs interdépendants: le secteur du Keewatin; le secteur du Labrador et le secteur de Baffin (Occhietti, 1987; Dyke et Prest, 1987). Il est également traversé par la ligne de partage des glaces translaurentidiennes (Dyke et Prest, 1987; Figure 4). À son maximum glaciaire, vers 18 ± 4 ka BP, l'Inlandsis laurentidien s'étend d'est en ouest sur 4200 km et du nord au sud sur 3700 km. Son épaisseur varie entre 3200 m et 4000 m d'un endroit à l'autre (Occhietti, 1987). Le niveau marin au large des côtes de l'Atlantique canadien est près du minimum eustatique, soit 115 à 120 m plus bas que le niveau marin actuel. La ligne de rivage sur le plateau continental de Beaufort est à -100 m (Dyke et Prest, 1987).

Entre 18 et 13 ka BP, l'Inlandsis se retire lentement dans l'ouest et le sud mais sa forme demeure presque inchangée vers 13 ka BP (Dyke et Prest, 1987). Selon Dyke et Prest (1987), le plus grand retrait durant cette période est observé au sud-est où les marges se retrouvent dans les vallées du lac Champlain et de la rivière Connecticut. Dans les provinces de l'Atlantique et sur les côtes du golfe du Saint-Laurent, la position de l'Inlandsis demeure relativement stable. Elle atteint sa limite maximale sur l'Île d'Anticosti vers 14,5 ka BP. Vers 14 ka BP, le niveau marin sur le plateau continental de Beaufort passe de -100 m à -40 m en raison de l'affaissement du plateau et du relèvement eustatique. Sur le plateau continental, au sud-est de l'Inlandsis, le niveau marin augmente rapidement entre 18 et 13 ka BP puisque le relèvement isostatique est limité. Au large de la rive sud de la Nouvelle-Écosse, la ligne de rivage est à -60 m (Dyke et Prest, 1987).

Entre 13 ka et 8 ka BP, la déglaciation est beaucoup plus rapide dans l'ouest que dans l'est du territoire si bien que la ligne de partage des glaces au Keewatin se déplace vers l'est

(Dyke et Prest, 1987). Vers 8 ka BP, le glacier dans le secteur de la baie d'Hudson est disparu et la mer de Tyrrell pénètre dans le bassin (Dyke et Prest, 1987). Durant cette même période, il n'y a presque plus de glace dans le secteur du Keewatin (Dyke et Prest, 1987). Les dernières glaces de l'Inlandsis, dans le secteur du Labrador, fondent vers 6 ka BP (Occhietti, 1987).



Figure 4. Les différentes parties de l’Inlandsis laurentidien pendant le maximum glaciaire du Wisconsinien supérieur vers 18 ± 4 ka BP (Occhietti, 1987).

3.2 La déglaciation sur la Côte-Nord du Québec

Les formes géomorphologiques qui façonnent le paysage de la Côte-Nord du Québec permettent de déterminer la position frontale de l'Inlandsis laurentidien en retrait. Trois systèmes morainiques rappellent les diverses positions frontales de la calotte sur ce territoire. Le complexe morainique de Manitou-Matamek, s'étendant sur 195 km de longueur entre les rivières Moisie et Romaine, se raccorderait à la transgression maximale de la mer de Goldthwait vers 9,5 à 9,6 ka BP (Dubois, 1977). Il est également observé jusqu'à la rivière aux Outardes, à l'ouest de Baie-Comeau. Une crête majeure de 15 à 20 m de hauteur bloque la rivière Manicouagan à la hauteur du barrage Manic 2 (Dubois, 1977). Selon Dubois (1977), l'origine fluvio-glaciaire des sédiments confirme la mise en place de cette crête lors d'un arrêt dans la fusion de glace. Cependant, la position de cette crête ne semble correspondre qu'à une position annuelle ou pluriannuelle. Le complexe morainique de Baie-Trinité, s'étendant sur 43 km de longueur et culminant dans la région de Pointe-des-Monts, daterait de 10,1 à 10,3 ka BP (Dubois, 1977). Toujours selon Dubois (1977), ce complexe aurait été mis en place alors que la calotte était active. Le complexe morainique de Brador, s'étendant dans la région de la rivière Étamamiou et se terminant dans le golfe à l'ouest de la Baie de Brador, daterait de 10,9 à 11 ka BP (Dubois, 1977). Il correspondrait à une halte glaciaire. Ces trois systèmes morainiques ne peuvent être associés à des récurrences glaciaires à l'exception du complexe de Baie-Trinité. Ils correspondent plutôt à une position frontale maintenue pendant au moins quelques dizaines d'années (Dubois, 1977).

Selon les datations de Dubois (1977) effectuées sur des coquilles de balanes, le déglacement du trait de côte dans la région de Baie-Comeau aurait débuté vers 10 ka BP voir même 11 ka BP. Une datation effectuée sur une coquille de *Balanus sp.*, prélevée dans des argiles marines à 63 m d'altitude, donne un âge de $9\,150 \pm 150$ ans BP (Dubois, 1977). Une autre datation effectuée sur une coquille de *Balanus balanus* prélevée dans des argiles marines à 60 m d'altitude donne un âge de $9\,280 \pm 140$ ans BP. Les argiles du site où fut prélevée la coquille de *Balanus sp.* s'étendent sous l'épandage fluvio-glaciaire situé devant la crête morainique de Manic 2. Cette crête pourrait donc avoir un âge de $9\,150 \pm 150$ ans BP (Dubois, 1977).

3.3 Les mers post-glaciaires du Québec

En parallèle au retrait des glaciers du Wisconsinien, les eaux marines ont envahi le territoire québécois. Cinq grandes régions québécoises ont été submergées à différents moments durant l'Holocène (Dionne, 1972). Un nom fut donné à chacune des nappes d'eau marine ayant recouvert ces régions: (1) mer de Goldthwait à celle ayant submergé les côtes du Saint-Laurent en aval de Québec et les basses-terres entourant le golfe du Saint-Laurent entre 13,5 et 8 ka BP; (2) mer de Champlain à celle ayant ennoyé les basses-terres de l'Outaouais et du Saint-Laurent en amont de Québec entre 12 et 10 ka BP; (3) golfe de Laflamme à celle ayant recouvert les basses-terres du Saguenay/Lac Saint-Jean entre 10,3 et 8 ka BP; (4) mer d'Iberville à celle ayant recouvert les basses-terres encerclant la baie d'Ungava entre 8 ka et 6 ka BP; et (5) mer de Tyrrell à celle ayant submergé les basses-terres de la mer d'Hudson et de la baie James entre 7 et 3 ka BP (Figure 5; âges des mers tirés de Dionne, 1972). Hillaire-Marcel (1980) définit la mer de Champlain et le golfe de Laflamme comme des bassins fermés alors qu'il qualifie la mer de Goldthwait, la mer de Tyrrell et la mer d'Iberville comme des bassins ouverts.



Figure 5. Localisation des mers post-glaciaires du Québec selon leurs phases d'extension (carte modifiée d'Hillaire-Marcel, 1980).

La délimitation géographique de la mer de Goldthwait a longtemps posé un problème. À l'aide de quelques datations au ^{14}C , Dionne (1977) suggère que cette mer s'étend à l'est jusqu'aux limites actuelles du golfe du Saint-Laurent si bien qu'elle ne couvre pas les secteurs de la baie de Fundy et du Labrador/Terre-Neuve. L'identification d'une démarcation entre la mer de Champlain et la mer de Goldthwait s'avère être une tâche plus ardue puisque ces deux mers ont toutes deux un rapport avec la région de Québec. Comment savoir avec précision où la mer de Goldthwait commence dans la région de Québec? Dionne (1977) avance que cette mer s'étend à l'est d'une ligne nord-sud reliant la rivière Etchemin et le lac Saint-Charles. Quant à la délimitation avec le golfe de Laflamme au Saguenay/Lac-Saint-Jean, celle-ci se situe en amont du fjord du Saguenay, à la hauteur de la baie des Ha! Ha! (Dionne, 1977). Selon cette limite, les basses-terres du Haut-Saguenay et du Lac-Saint-Jean sont couvertes par le golfe de Laflamme alors que le Bas-Saguenay est submergé par la mer de Goldthwait (Dionne, 1977).

La chronologie de la mer de Goldthwait s'avère être une question aussi épineuse que la question de son étendue. La mer de Goldthwait débute il y a environ 13,5 ka BP lorsque l'Inlandsis laurentidien commence à se retirer du golfe du Saint-Laurent (Dionne, 1977). En raison de l'affaissement isostatique dû au poids de l'Inlandsis, la mer parvient à recouvrir les zones côtières du Saint-Laurent (Dionne, 1977). Sur l'ensemble du territoire couvert par la mer de Goldthwait, la submersion marine est définie par deux phases (Dionne, 1977): une phase de transgression marine au cours de laquelle les zones côtières commencent à être dégagées; une phase de régression marine durant laquelle la croûte terrestre se relève en raison de la disparition de la glace. Contrairement aux régions submergées par les mers de Champlain et de Laflamme, les côtes du Saint-Laurent, où s'étendait la mer de Goldthwait, ne sont pas complètement relevées aujourd'hui si bien que l'on peut affirmer que la régression goldthwaitienne n'est pas encore terminée. Étant donné que les conditions environnementales au début de la submersion diffèrent de celles qui prévalent aujourd'hui, il est apparu nécessaire de subdiviser la chronologie de la mer (Dionne, 1977). La mer de Goldthwait aurait précédé la mer de Champlain, lui a été contemporaine et lui est postérieure (Dionne, 1972). La période de la submersion des côtes de l'estuaire et du golfe par la mer de Goldthwait peut être ainsi divisée en trois phases distinctes: une antérieure à la mer de Champlain (Goldthwaitien inférieur), soit de 13,5 à 12 ka BP environ; une contemporaine (Goldthwaitien moyen), soit de 12 à 10 ka BP, et une postérieure (Goldthwaitien supérieur), soit de 10 ka BP à nos jours puisque le relèvement isostatique est

toujours en cours (Dionne, 1972). Étant donné que la déglaciation n'est pas synchrone sur tout le territoire québécois, la submersion par la mer de Goldthwait varie d'un secteur à l'autre (Dionne, 1977). Pour cette raison, ces premières dénominations sont remplacées par Goldthwaitien I, II et III. Cette nouvelle nomenclature est surtout basée sur la lithologie (Dionne, 1977).

Le Goldthwaitien I (13,5 à 12 ka BP) est défini par Dionne (1977) comme une phase glacio-marine très courte, s'étendant sur une période de 500 à 1500 ans, durant laquelle les eaux sont froides et peu salines. La faune marine, peu abondante, est caractérisée par des espèces arctiques. La croûte terrestre commence à rebondir et des hauts deltas se forment mais le niveau marin reste inchangé (Dionne, 1977). Le Goldthwaitien II (12 à 10 ou 9 ka BP) est la phase marine principale qui dure environ 2000 à 3000 ans et durant laquelle les eaux sont plus chaudes et salines que durant la période précédente (Dionne, 1977). Ce réchauffement des eaux permet à des espèces tempérées de pénétrer dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. C'est une phase tout d'abord marquée par la transgression marine et ensuite marquée par la régression marine. Le taux de relèvement isostatique est fort et la sédimentation importante. Pour ce qui est du Goldthwaitien III, il s'étend de 9 ou 8 ka BP à nos jours. C'est une phase dominée par la régression. Elle est définie par un relèvement isostatique plus faible que celui du Goldthwaitien II et une érosion forte. Durant cette période, les cours d'eau s'enfoncent dans les dépôts mis en place au cours des phases précédentes. Les eaux sont également plus chaudes et salines que durant les deux phases précédentes (Dionne, 1977).

Sur l'ensemble de la Côte-Nord, l'altitude maximale atteinte par la mer de Goldthwait varie spatialement dû au fait que le déglacement des côtes ne se fait pas en même temps d'une région à l'autre (Dubois, 1977; Figure 6). Dans les régions précocement déglacées, la mer atteint une altitude inférieure à celle atteinte dans les régions déglacées plus tardivement. Le relèvement isostatique de ces régions, libérées d'une partie du poids des glaciers, empêche la mer d'atteindre sa plénitude (Dubois, 1977). La limite marine de la mer de Goldthwait la plus élevée, 152 m, se situe dans la région de Blanc-Sablon. La limite marine la plus basse se situe à 76 m à l'Île d'Anticosti (Dubois, 1977). Selon Dubois (1977), la limite marine dans la région de Baie-Comeau se situe entre 122 et 140 m d'altitude, mais Dionne (1977) place cette limite entre 105 et 110 m. Cette altitude de la mer de Goldthwait est atteinte avant 9500 ans BP (Dionne, 1977).

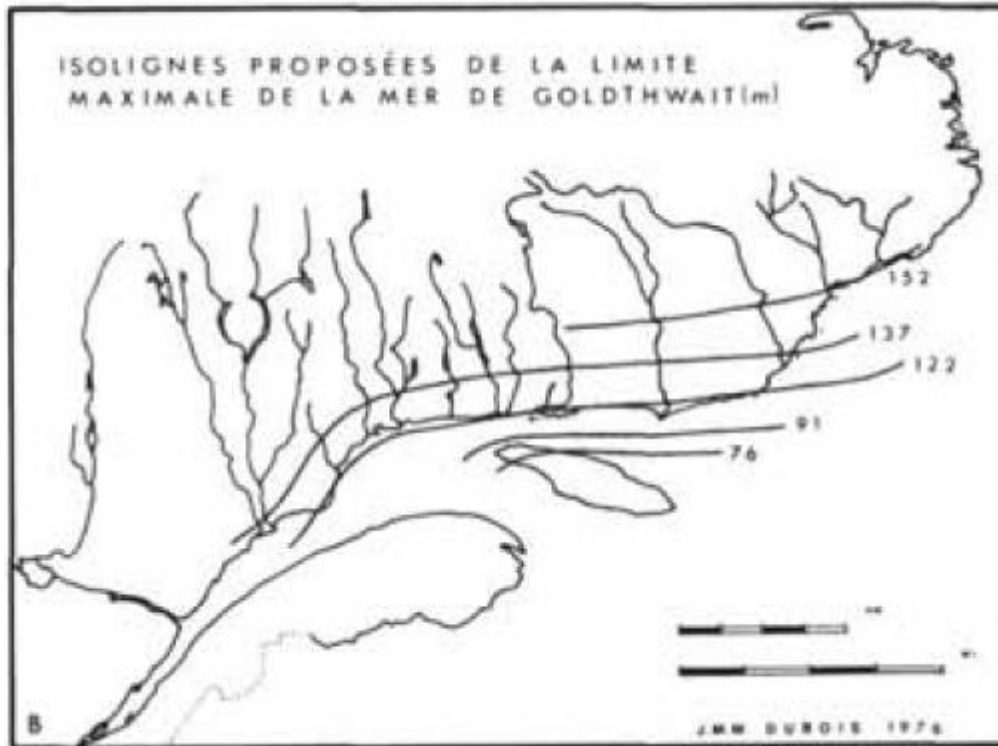


Figure 6. Isolignes de la limite maximale de la mer de Goldthwait (Dubois, 1977).

3.4 Reconstruction paléo-océanique à partir d'invertébrés marins

L'étude d'invertébrés marins permet de reconstituer les conditions hydrologiques et l'évolution bathymétrique des bassins anciens et modernes. Dans les mers, modernes ou post-glaciaires, la présence et le développement d'invertébrés marins dépendent de plusieurs facteurs à savoir: la température, la salinité et la profondeur de l'eau, la nature du substrat et l'apport en nourriture (Hillaire-Marcel, 1980). Chaque espèce a des préférences thermiques et salines, occupe un domaine bathymétrique propre et a des exigences quant au type de sédiments sur lesquels il se fixera ou s'enfouira. Notons que ces préférences varient en fonction de la latitude géographique. Dans cette section, les conditions de croissance propres à certains invertébrés marins sont présentées (données tirées d'Hillaire-Marcel, 1980; Tableau 1).

Les lamellibranches (bivalves) présentés dans la section qui suit incluent les espèces suivantes: *Astarte montagui*, *Chlamys islandicus*, *Hiattella arctica*, *Macoma balthica*, *Macoma calcarea*, *Mya truncata*, *Mytilus edulis*, *Portlandica arctica* et *Serripes groenlandicus*. La plupart des bivalves se nourrissent de nourriture planctonique (phytoplancton, détritus, bactéries)

alors qu'une minorité d'entre eux se nourrissent de la matière organique enfouie dans les sédiments. Selon Hillaire-Marcel (1980), *Astarte montagui* est une espèce d'eaux froides qui tolère des salinités élevées (>30 ‰) et est rencontrée dans les silts ou les sables entre 5 et 20 m de profondeur. *Chlamys islandicus* et *Serripes groenlandicus* sont deux espèces ultrahalines qui se développent dans des eaux froides sur des fonds avec sédiments fins. Elles occupent le domaine infralittoral et le domaine circalittoral (Hillaire-Marcel, 1980). *Hiatella arctica* croît dans les eaux froides. La ponte des larves a lieu de juin à septembre et celles-ci se développent lorsque la température de l'eau est inférieure à 10-12 °C (Hillaire-Marcel, 1980). *Hiatella arctica* tolère les eaux saumâtres mais une salinité de 20 ‰ lui convient le mieux. Son domaine bathymétrique moyen est de -15 m (Hillaire-Marcel, 1980). Bien que parfois *Hiatella arctica* se fixe au substrat en rongant la roche sédimentaire par sécrétion d'un acide, cette espèce se retrouve surtout sous les galets, les crampons de laminaires, les coquilles d'autres bivalves; une fois qu'un micro-habitat favorable est choisi, cette espèce sécrète alors de nombreux filaments (ou byssus) pour s'immobiliser.

Toujours selon Hillaire-Marcel (1980), *Macoma balthica* est une espèce qui tolère des eaux de salinité très basse (jusqu'à 4 ‰) et est retrouvée dans les sables ou les silts littoraux, entre la zone de balancement des marées et 6 m de profondeur. Les larves de *Macoma balthica* se développent à des températures supérieures à 10 °C (Hillaire-Marcel, 1980). Étant donné que le stade larvaire de cette espèce est bref, elle peut vivre dans des eaux froides. Par contre, son métabolisme est très faible sous 4 °C (Hillaire-Marcel, 1980). *Macoma calcarea* est une espèce typiquement arctique vivant à de grandes profondeurs (jusqu'à 140 m) où la température varie peu durant toute l'année (~0 °C) et où la salinité dépasse 30 ‰ (Hillaire-Marcel, 1980). On la retrouve dans les sédiments argilo-silteux (Hillaire-Marcel, 1980). *Mytilus edulis* est une espèce qui préfère les eaux de salinités élevées. Elle est cependant adaptée à vivre dans des eaux aussi bien tempérées que boréales (Soot-Ryen, 1955) ou subarctiques (Martel, communications personnelles). Elle est aussi retrouvée entre la zone de balancement des marées et une trentaine de mètres de profondeur fixée sur un substrat rocheux (blocs ou socle) et parfois sur des algues (Hillaire-Marcel, 1980). Dans les mers post-glaciaires, cette espèce s'est souvent servie de rudites de plage pour se nicher (Hillaire-Marcel, 1980). *Mya truncata* est une autre espèce typiquement arctique qui préfère les eaux très froides et très salées. Elle occupe le domaine mésolittoral ainsi que le domaine infralittoral et se fixe aux aréno-rudites (Hillaire-Marcel,

1980). Finalement, *Portlandia arctica* se développe au-delà de 10 m de profondeur, où la température ne dépasse pas 0 °C et où la salinité est supérieure à 30 ‰ (Hillaire-Marcel, 1980). On la retrouve dans les argiles grises et meubles (Hillaire-Marcel, 1980).

Outre les mollusques, on retrouve également des cirripèdes (balanes) et des brachiopodes dans les mers modernes et les dépôts des mers post-glaciaires. Selon Hillaire-Marcel (1980), *Balanus crenatus* et *Balanus balanus* occupent le domaine intertidal jusqu'au domaine circalittoral mais sont surtout retrouvés entre 5 et 15 m de profondeur. *Balanus balanus* est l'espèce la mieux adaptée des deux aux eaux froides (Hillaire-Marcel, 1980). *Balanus crenatus*, quant à lui, est l'espèce la mieux adaptée aux variations de salinité (Hillaire-Marcel, 1980). Elle est retrouvée dans les eaux saumâtres et chaudes (Hillaire-Marcel, 1980). Le dernier cirripède rencontré dans les mers modernes et post-glaciaires est *Balanus hameri*. Toujours selon Hillaire-Marcel (1980), ce cirripède exige des salinités élevées (>30 ‰) et des eaux froides (~0 °C) pour croître. *Balanus hameri* se fixe sur des rudites glacio-marines ou sur des blocs et des cailloux des faciès profonds (Hillaire-Marcel, 1980). *Hemithyris psittacea* est un brachiopode que l'on retrouve dans les faciès d'exondation (silts ou sables) sous quelques mètres de profondeur ou sur l'estran et préfère les eaux de salinité élevée (Hillaire-Marcel, 1980). On le retrouve dans les eaux des régions tempérées et boréales.

Tableau 1. Facteurs déterminants à la présence et au développement de certains invertébrés marins (Hillaire-Marcel, 1980).

Espèces	Température eau	Salinité eau	Profondeur eau	Substrat
<i>Astarte montagui</i>	Froide	> 30 ‰	5 à 20 m	Silts et sables
<i>Chlamys islandicus</i>	Froide	Élevée	Infralittoral à circalittoral	Sédiments fins
<i>Hiatella arctica</i>	Froide	20 ‰	15 m	Côtes rocheuses, galets, crampons de laminaires, coquilles
<i>Macoma balthica</i>	> 10 °C (larves) > 4 °C (métabolisme)	> 4 ‰	Balancement des marées à 6 m	Silts et sables
<i>Macoma calcarea</i>	~ 0 °C	> 30 ‰	Jusqu'à 140 m	Argiles et silts
<i>Mya truncata</i>	Très froide	Très élevée	Mésolittoral à infralittoral	Aréno-rudites
<i>Mytilus edulis</i>	> 4 °C (voir note en bas du tableau)	Élevée	Zone de balancement des marées et jusqu'à 30 m	Blocs, socles, algues, rudites
<i>Portlandica arctica</i>	≤ 0 °C	> 30 ‰	> 10 m	Argiles grises ou meubles
<i>Serripes groenlandicus</i>	Froide	Élevée	Infralittoral à circalittoral	Sédiments fins
<i>Balanus balanus</i>	Froide	Élevée	Infralittoral à circalittoral (5-15 m)	Coquilles
<i>Balanus crenatus</i>	Froide	Élevée à saumâtre	Infralittoral à circalittoral (5-15 m)	Rudites glacio-marines, blocs ou cailloux
<i>Balanus hameri</i>	~ 0 °C	> 30 ‰	Grandes profondeurs	Rudites glacio-marines, blocs ou cailloux
<i>Hemithiris psittacea</i>	Froide	Élevée	L'estran à quelques mètres	Silts et sables

Note: La température de 4 °C provient de Moore (1958); cependant, les populations de *Mytilus edulis* se retrouvant à la limite nord de la distribution de cette espèce vivent dans des eaux dont la température varie entre -1 et + 5 °C.

Hillaire-Marcel (1980) a regroupé les faunes fossiles des mers post-glaciaires en communautés types, caractérisées par l'existence d'une espèce dominante et un certain nombre d'espèces accompagnatrices dans un faciès déterminé. Lorsqu'une des espèces accompagnatrices devient caractéristique du milieu, une nouvelle communauté apparaît. Les communautés types se sont également succédées, dans un site déterminé, en fonction du rehaussement isostatique et des variations hydrologiques liées à l'émersion des terres et non pas selon des changements climatiques (Hillaire-Marcel, 1980). Deux types de communautés ont été identifiés par Hillaire Marcel (1980): l'endobenthos et l'épibenthos vagile des faciès argileux ou sableux, de même que l'épibenthos sessile des faciès grossiers.

Selon Hillaire-Marcel (1980), la communauté à *Portlandia arctica* est la première à coloniser les bassins post-glaciaires, même les plus fermés et saumâtres, une fois le retrait glaciaire dans les eaux profondes et salées. *Portlandia arctica*, accompagné de *Macoma calcarea*, est retrouvé dans des rythmites argilo-silteuses indiquant la proximité d'un front glaciaire (Hillaire-Marcel, 1980). La communauté à *Macoma calcarea* succède souvent celle de *Portlandia arctica* dans les faciès profonds argileux, d'eaux froides et ultrahalines (Hillaire-Marcel, 1980). *Macoma calcarea* est accompagné de différentes espèces selon la profondeur des faciès. Dans les argiles profondes (50 m ou plus), où la température avoisine 0 °C et la salinité 30 ‰, *Chlamys islandicus*, *Portlandia arctica* et *Mya truncata* forment la sous-communauté inférieure (Hillaire-Marcel, 1980). *Clinocardium ciliatum* et les *Astarte* dominent l'étage moyen (35 ± 15 m) alors que seuls les *Astarte* forment l'étage supérieur (5 à 20 m). Les *Chlamys islandicus*, étant des substrats parfaits pour les balanes, sont souvent accompagnés de *Balanus hameri* dans la sous-communauté inférieure et de *Balanus balanus* ainsi que de *Balanus crenatus* dans les sous-communautés moyenne et supérieure (Hillaire-Marcel, 1980).

Lorsque la température estivale atteint ~12 °C et que les terres émergent, la communauté à *Mya arenaria* s'installe avec les *Macoma balthica* (Hillaire-Marcel, 1980). Dans les baies fermées et salées, la communauté à *Hemithyris psittacea* et à gastéropodes domine les faciès d'exondation (Hillaire-Marcel, 1980). Toujours selon Hillaire-Marcel (1980), la communauté à *Hiatella arctica* est rencontrée dans les faciès grossiers de l'épibenthos sessile et ce, peu importe, la profondeur. Comme dans le cas de la communauté à *Macoma calcarea*, *Hiatella arctica* est accompagné de différentes espèces selon la profondeur. La sous-communauté inférieure (au-delà de 30 m) est formée par *Mya truncata* et *Balanus hameri* dans les bassins fermés (Hillaire-Marcel, 1980). Dans les rudites de profondeurs modérées, la sous-communauté supérieure est composée de *Mytilus edulis* et de *Balanus crenatus* ou *Balanus balanus* (Hillaire-Marcel, 1980). Finalement, la communauté à *Mytilus edulis* se limite, selon Hillaire-Marcel (1980), aux dépôts grossiers (blocs ou cailloux) de la zone intertidale. Elle est accompagnée d'une ou deux espèces de balanes (Hillaire-Marcel, 1980). Pour que *Mytilus edulis* forme sa propre communauté fossile, il faut des conditions exceptionnelles. Les coquilles de *Mytilus edulis* sont effectivement souvent fragmentées par les vagues (Hillaire-Marcel, 1980).

Les aires spécifiques à chacune de ces communautés peuvent subir des modifications lorsque le seuil thermique ou le seuil de salinité est dépassé (Hillaire-Marcel, 1980). Les espèces

doivent donc se déplacer pour trouver des eaux répondant à leurs exigences. Ce changement d'aire est accompagné d'un ralentissement de la croissance de la coquille (Hillaire-Marcel, 1980).

3.5. Invertébrés marins dans les mers post-glaciaires du Québec

Hillaire-Marcel (1980) a décrit le développement des invertébrés marins dans les différentes mers post-glaciaires. Parmi les lamellibranches, *Hiatella artica* est l'espèce la plus répandue dans les dépôts marins post-glaciaires (Hillaire-Marcel, 1980). Majoritaire dans les assemblages de la mer de Champlain, elle a été désignée espèce caractéristique de la phase initiale de cette mer (Elson, 1969). Selon Hillaire-Marcel (1980), *Hiatella arctica* a cependant connu un développement plus important dans les bassins ouverts, froids et salés tels la mer de Goldthwait et la mer d'Iberville. En effet, la dimension des coquilles dans les populations de ces mers dépasse celle des coquilles de la mer de Champlain. La croissance restreinte des coquilles dans la mer de Champlain suggère la persistance d'eaux saumâtres (Hillaire-Marcel, 1980). Toujours selon Hillaire-Marcel (1980), *Macoma balthica* est surtout retrouvé dans les dépôts des bassins fermés, c'est-à-dire la mer de Champlain et le golfe de Laflamme. Sa tolérance aux faibles salinités explique sa présence dans ces milieux. Moins adapté aux faibles salinités, *Mytilus edulis* n'est pas retrouvé dans les dépôts du golfe de Laflamme et sa croissance est limitée dans la mer de Champlain (Hillaire-Marcel, 1980). Entre 8 ka et 2 ka BP, cette espèce colonise la mer d'Iberville (Hillaire-Marcel, 1980). Cette migration septentrionale peut être expliquée selon Hillaire-Marcel (1980) par un réchauffement estival de l'eau dans l'Arctique.

Macoma calcarea est une autre espèce qui n'est pas retrouvée dans le golfe de Laflamme et qui a une tendance au nanisme dans la mer de Champlain (Hillaire-Marcel, 1980). Hillaire-Marcel (1980) suggère que cette espèce est typiquement arctique puisque la dimension de sa coquille est remarquable dans les populations de la mer de Tyrrell. *Mya truncata* est une autre espèce typiquement arctique souvent retrouvée fossilisée dans les sédiments fins de la partie nord du bassin de la mer de Goldthwait, de ceux de la mer d'Iberville et de la mer de Tyrrell (Hillaire-Marcel, 1980). Toujours selon Hillaire-Marcel (1980), une seule espèce est signalée dans l'ensemble des mers post-glaciaires soit *Portlandia arctica*. Une fois le retrait glaciaire entamé, cette espèce a colonisé tous les bassins. D'autres espèces de lamellibranches, *Chlamys islandicus*, *Serripes groenlandicus* et *Astarte montagui*, sont retrouvées dans les dépôts marins

des mers post-glaciaires mais en faible abondance. Les deux premières sont absentes du golfe de Laflamme et sont surtout retrouvées dans les mers ouvertes (Hillaire-Marcel, 1980). Elles sont aussi signalées dans les dépôts de l'est de la mer de Champlain. *Astarte montagui*, quant à lui, est peu abondant dans les mers saumâtres. Bien que les gastéropodes soient plus diversifiés dans les dépôts des mers post-glaciaires, ils y sont moins abondants que les bivalves (Hillaire-Marcel, 1980). *Euspira pallida*, *Buccinum glaciale*, *Buccinum scalariforme*, *Cryptonatica affinis* et *Puncturella noachina* sont les principaux gastéropodes signalés par Hillaire-Marcel (1980) dans les dépôts de la mer de Goldthwait, de la mer de Champlain et des bassins de l'Arctique. La présence de *Boreotrophon clathratus*, *Buccinum undatum*, *Plicifusus kroyeri* est limitée à la mer de Goldthwait et à la mer de Champlain (Hillaire-Marcel, 1980).

Outre les mollusques, on retrouve trois espèces de balanes dans les dépôts des mers post-glaciaires. *Balanus balanus*, espèce la mieux adaptée aux eaux froides, est surtout présente dans les dépôts de la mer d'Iberville et la mer de Tyrrell (Hillaire-Marcel, 1980). *Balanus crenatus*, espèce la mieux adaptée aux variations de salinité, est surtout retrouvée dans les dépôts de la mer de Champlain et du golfe de Laflamme (Hillaire-Marcel, 1980). Le dernier cirripède, *Balanus hameri*, est surtout retrouvé dans les dépôts de la mer de Goldthwait mais aussi dans les faciès profonds de la mer de Champlain et du golfe de Laflamme (Hillaire-Marcel, 1980). Une seule espèce de brachiopode est signalée dans les dépôts post-glaciaires soit *Hemithiris psittacea*. Par contre, il n'est pas retrouvé dans le golfe de Laflamme, trop saumâtre pour cette espèce (Hillaire-Marcel, 1980).

3.6 Reconstruction des paléo-températures marines à l'aide de l'oxygène-18 et du Mg/Ca de carbonates marins

Une méthode pour mesurer les paléo-températures marines à partir des variations naturelles dans l'abondance en isotopes de l'oxygène dans les carbonates déposés dans les mers a été démontrée par Urey et al. (1951). Cette méthode est basée sur le principe d'une distribution non aléatoire des atomes d'oxygène entre l'eau et la structure cristalline des carbonates marins lors de la déposition du CaCO_3 . Une légère discrimination isotopique (fractionnement) s'opère durant la distribution des atomes d'oxygène entre l'eau et le CaCO_3 (Shackleton, 1973; Friedman et O'Neil, 1977). Le carbonate marin devient plus enrichi, soit 3 ‰ de plus, en isotopes lourds de l'oxygène que l'eau ambiante (Jones, 1983). Friedman et O'Neil (1977) ont démontré que le

facteur de fractionnement isotopique dépendait de la température de l'eau dans laquelle le CaCO_3 se déposait. La relation entre la température de l'eau et l'abondance relative en oxygène-18 du CaCO_3 des carbonates marins a été démontrée par Epstein et al. (1951; 1953). À partir d'analyses isotopiques effectuées sur des mollusques choisis pour leur température de croissance connue, Epstein et al. (1951; 1953) a développé une équation:

$$t = a - b(\delta) + c(\delta)^2$$

où t est la température exprimée en °C; où a , b et c sont les plus récentes constantes estimées soit 16,5; 4,3 et 0,14 respectivement; et où

$$\delta = \left(\frac{^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ échantillon}}{^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ standard}} - 1 \right) \times 1000$$

Dans cette équation, δ , exprimé en pour mille (‰), représente la différence entre le ratio $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ d'un échantillon de carbonate et le ratio $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ du carbonate de référence *Belemnitella americana*, de la formation de Pee Dee (Epstein et al., 1951; 1953). Le ratio $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de l'échantillon est mesuré à partir du CO_2 relâché par la décomposition acide du carbonate dans un spectromètre de masse (Shackleton, 1973; Killingley, 1981). Selon l'équation présentée, le $\delta^{18}\text{O}$ d'un échantillon de carbonate est inversement corrélé avec la température de l'eau dans laquelle celui-ci a crû, si bien qu'une augmentation de la température se traduit par une diminution du $\delta^{18}\text{O}$ de l'échantillon (Urey, 1947; Pfister et al., 2011; Quillmann et al., 2012). Plus précisément, lorsque la température augmente de 1 °C, le $\delta^{18}\text{O}$ du carbonate diminue de 0,2 ‰ (Shackleton, 1973). Il est donc possible de déterminer la température de l'eau dans laquelle le CaCO_3 d'une coquille a été déposé et ce, avec une précision de ± 1 °C, si l'abondance relative oxygène-18 de la coquille est connue (Epstein et al., 1951). Lors de la détermination des paléo-températures à partir du $\delta^{18}\text{O}$ de carbonates marins, il est important de prendre en considération la salinité des mers. La relation entre la température et le $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates marins est en effet dépendante de la salinité (Klein et al., 1996a; Mouchi, 2013). L'effet des variations de salinité dans les eaux marines sur la concentration en ^{18}O de ces eaux serait dix fois plus grand que celui lié à une augmentation de 1 °C (Epstein et Mayeda, 1953). L'apport d'eaux continentales et de fonte, l'évaporation et la condensation changent la salinité des eaux marines de même que le $\delta^{18}\text{O}$ de celles-ci. Le $\delta^{18}\text{O}$ d'animaux marins vivant dans des eaux de même température mais de salinité variant entre 32 et 38 ‰ variera de 2 à 4 ‰ (Epstein et Mayeda, 1953). Cet écart représente une variation de 11 °C (Epstein et Mayeda, 1953). De plus, bien que deux eaux aient la même salinité elles peuvent avoir $\delta^{18}\text{O}$ différent. En effet, l'addition d'eau douce provenant de la fonte de la

neige diminue la concentration en ^{18}O des eaux marines de 3 à 5 fois plus que ne le fait l'ajout d'eau douce provenant d'une rivière (Epstein et Mayeda, 1953). Ainsi, l'interprétation des paléo-températures marines doit se faire en considérant les variations possibles de salinité de l'eau.

L'équation développée par Epstein et al. (1951; 1953) a été utilisée pour de nombreuses recherches visant à reconstruire les paléo-températures marines (Killingley, 1981; Krantz et al., 1987; Israelson et al., 1994; Klein et al., 1996a; Schöne et al., 2005; Royer et al., 2013). Ces recherches ont démontré que les coquilles de bivalves étaient les plus appropriées pour les reconstructions paléo-environnementales. En formant des anneaux journaliers et annuels faciles à discerner, les bivalves fournissent de l'information sur les variations saisonnières et intra-saisonnières (Royer et al., 2013). Shackleton (1973) et Killingley (1981) ont estimé la saison de la mort de bivalves à partir de la composition $\delta^{18}\text{O}$, mesurée à la marge ventrale (terminale) de leur coquille. Une mesure de la composition $\delta^{18}\text{O}$ prise à la marge ventrale d'une coquille permettrait ainsi de déterminer la température de l'eau au moment de la mort de l'animal (Killingley, 1981). Des principes physiques nécessaires à la reconstruction de températures saisonnières précises ont été élaborés (Shackleton, 1973):

- L'espèce utilisée doit déposer du carbonate en équilibre thermodynamique avec l'eau.
- La composition isotopique de l'eau dans laquelle l'animal vit doit être constante durant une même saison. Les espèces vivant dans des cuvettes d'eau de mer dans les rochers (sujettes à l'évaporation et à la précipitation) doivent être exclues.
- La température à laquelle la déposition du carbonate a lieu doit être celle de la mer.
- L'animal doit déposer du carbonate durant toute l'année. Une espèce qui ne dépose pas de carbonate durant l'hiver ne pourra pas enregistrer les températures de cette saison.
- Le taux de croissance de la coquille doit être suffisamment élevé.

La température de l'eau peut aussi être déterminée à partir du ratio Mg/Ca de la calcite des coquilles de bivalves (Dodd, 1965; 1967; Klein et al., 1996a; Putten et al., 2000; Mouchi et al., 2013). Dodd (1965; 1967) a observé une variation saisonnière, corrélée avec la température, de la concentration en Mg dans la couche de calcite de *Mytilus edulis*. La concentration en Mg dans la couche de calcite est aussi affectée par la taille du spécimen (Dodd, 1965). Celle-ci diminue chez les plus gros spécimens qui ont un taux de croissance plus faible. Klein et al. (1996a) a ensuite démontré que le ratio Mg/Ca de *Mytilus edulis* fournissait des données sur la

température. En effet, le mécanisme de régulation du Mg dans la couche de calcite de *Mytilus edulis* est influencé en partie par la température de l'eau. Lorsque la température augmente, les ions de Mg sont plus nombreux si bien que le ratio Mg/Ca dans la coquille de *Mytilus edulis* augmente (Klein et al., 1996a). Contrairement au $\delta^{18}\text{O}$ qui est sujet à des changements fréquents, le ratio Mg/Ca dans les mers change très peu à court terme (Schöne et al., 2011; Mouchi et al., 2013). Ce ratio est sujet à changer seulement une fois tous les 10^5 ans puisque le Mg ainsi que le Ca ont une durée de vie de 10^6 ans et le brassage complet des eaux de l'océan n'arrive qu'une fois tous les 10^3 ans (Klein et al., 1996a). La température de l'eau des derniers 10^5 ans peut ainsi être identifiée à partir du ratio Mg/Ca de mollusques ayant vécu durant cette période. L'analyse de ce ratio permet donc de reconstituer les paléo-températures du dernier interglaciaire, pour lequel les données de températures sont manquantes (Klein et al., 1996a). En analysant la composition isotopique de l'oxygène et le ratio Mg/Ca pour une même coquille, la température de l'eau dans laquelle cette coquille a cru peut être déterminée avec une plus grande précision. Lorsque les températures marines inférées à partir de la composition isotopique de l'oxygène et du ratio Mg/Ca ne se rejoignent pas, la différence entre les températures estimées peut être expliquée par des variations de salinité engendrée par un apport d'eau douce (Klein et al., 1996a).

3.7 Reconstruction des paléo-salinités marines à partir des éléments mineurs et de l'oxygène-18 de carbonates marins

Le Mg et le Sr sont les deux éléments mineurs les plus abondants dans les carbonates marins. La concentration en ces deux éléments dépend de plusieurs facteurs dont la géochimie de l'eau, la minéralogie du squelette de l'invertébré marin, la physiologie de l'organisme et les facteurs environnementaux (salinité et température de l'eau; Dodd, 1967). Les effets des facteurs environnementaux sur la chimie des carbonates sont plutôt subtils et peu documentés (Dodd, 1967). Toutefois, les rapports entre ces éléments et le Ca des carbonates marins sont parfois utilisés comme archives de la salinité de l'eau de mer. Certains auteurs ont observé une relation positive entre le ratio Sr/Ca de la couche de calcite de *Mytilus edulis* et la salinité lorsque le ratio est en équilibre avec l'eau (Klein et al., 1996b). D'autres ont observé une relation inverse entre le ratio Sr/Ca de *Mytilus edulis*, *Macoma balthica* et *Mya arenaria* et la salinité de l'eau (Eisma et al., 1976; Putten et al., 2000). Kulp et al. (1952) ont observé que le ratio Sr/Ca de coquilles

d'aragonite, composées principalement de Sr, était influencé par les variations de salinité de l'eau. Le Sr/Ca variait positivement avec la salinité de l'eau (Kulp et al., 1952). Dodd (1965; 1967) a, quant à lui, observé une relation inverse entre le ratio Mg/Ca de la calcite de *Mytilus edulis* et la salinité de l'eau.

La salinité de l'eau peut également être déterminée en utilisant la composition $\delta^{18}\text{O}$ des coquilles de mollusques (Epstein et al., 1951; 1953; Eisma et al., 1976; Killingley, 1981). Puisque la composition $\delta^{18}\text{O}$ des coquilles reflète celle de l'eau, la salinité peut être définie à partir du $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau. Il existe une relation linéaire évidente entre la salinité et le contenu relatif en oxygène-18 de l'eau (Figure 7). En effet, les processus qui affectent la composition $\delta^{18}\text{O}$ (apport d'eau douce et de fonte, évaporation et condensation) de l'eau affectent aussi la salinité de l'eau (Epstein et al., 1951). Selon cette relation, l'eau douce (salinité de 0 ‰) a un $\delta^{18}\text{O}$ de -13,5 ‰ (Epstein et al., 1951; Klein et al., 1996a). Ainsi, lorsque la salinité augmente, la composition $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau augmente sous l'effet d'évaporation (Quillmann et al., 2012).

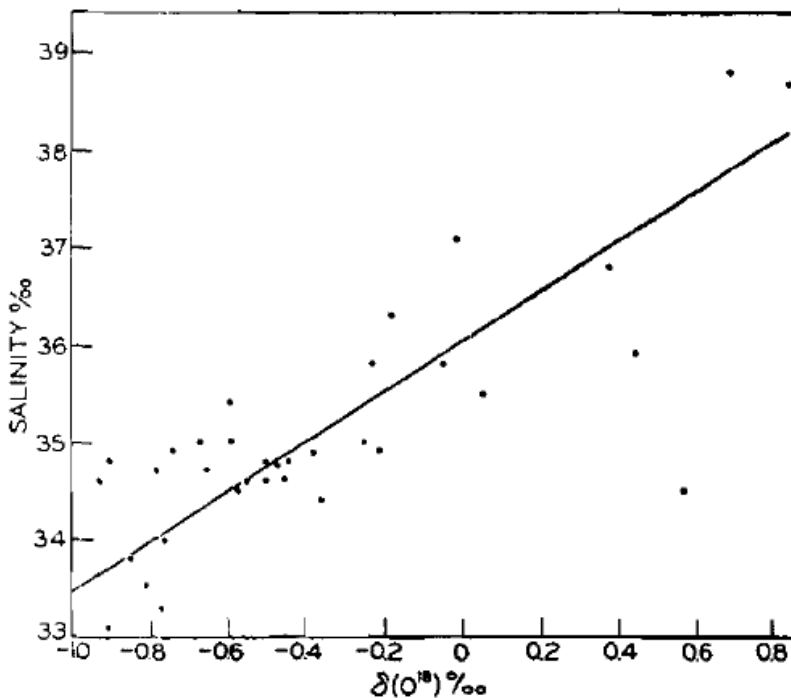


Figure 7. Graphique illustrant la relation entre la salinité (‰) et le $\delta^{18}\text{O}$ (‰) des eaux océaniques (Epstein et al., 1951)

3.8 Effets des paramètres de croissance et de l'activité métabolique des mollusques sur les archives environnementales

Les variations isotopiques et géochimiques dans la coquille des mollusques marins sont des enregistrements des conditions environnementales dans lesquelles celle-ci s'est déposée. Cependant, ces archives environnementales sont souvent modifiées par les paramètres de croissance des mollusques (Goodwin et al., 2003). Les arrêts et les changements dans le taux de croissance qui surviennent au cours de la vie d'un mollusque ont pour effet de limiter l'étendue et la précision des enregistrements environnementaux estimés à partir de la composition $\delta^{18}\text{O}$ et des concentrations en éléments mineurs. Autrement dit, ces modifications dans les paramètres de croissance des mollusques empêchent ces derniers d'enregistrer en continuité les conditions dans lesquelles ils croient. Le taux et la période de croissance de la coquille des mollusques sont contrôlés par plusieurs facteurs tels la température et la salinité de l'eau, l'âge et le cycle reproductif de l'individu, le cycle des marées et la présence de nutriments dans l'eau (Goodwin et al., 2003). Selon Goodwin et al., (2003), la température de l'eau est le facteur qui influence le plus la croissance des mollusques. Lorsque la température de l'eau excède la tolérance thermique d'une espèce, la croissance de celle-ci est arrêtée. De plus, lorsque la température de l'eau se rapproche du seuil thermique de l'espèce, sans toutefois le dépasser, le taux de croissance est réduit (Goodwin et al., 2003).

Il existe aussi des tendances latitudinales dans la croissance des coquilles de mollusques. Selon Harrington (1989), les mollusques vivant aux basses latitudes (eaux chaudes) ont un taux initial de croissance plus élevé que ceux vivant aux hautes latitudes. Parce que leur métabolisme est davantage dépendant de la température que celui des mollusques aux latitudes nordiques, les mollusques aux basses latitudes ont, dans la plupart des cas, un taux élevé de décélération de croissance et une longévité réduite (Harrington, 1989). Entre la première et la deuxième année de ces mollusques, le ralentissement de la croissance est considérable. Toujours selon Harrington (1989), le nombre annuel d'accrétions journalières diminue aussi avec le développement des mollusques (âge). Ce nombre diminue à un taux plus faible chez les mollusques aux hautes latitudes. Selon ces tendances, les archives environnementales seront plus complètes durant la première ou la deuxième saison de croissance (Harrington, 1989).

Goodwin et al. (2003) ont démontré l'effet de la réduction du taux de croissance sur le profil isotopique de l'oxygène d'un bivalve spécifique, *Chione cortezi*. Une diminution du taux

de croissance a pour effet de réduire les amplitudes isotopiques annuelles et ce, tout au long de la vie de cette espèce. Selon Goodwin et al. (2003), la réduction des amplitudes isotopiques annuelles est liée à des périodes de croissance (périodes durant lesquelles le CaCO_3 est déposé) plus courtes ou à la formation d'anneaux de largeur plus petite. Ces changements dans les paramètres de croissance du bivalve modifient ainsi l'allure du profil isotopique si bien que celle-ci ne reflète plus les variations des conditions environnementales. L'allure du profil isotopique de la plupart des bivalves sera modifiée de la façon tout juste décrite puisque les changements dans le taux de croissance sont fréquents chez les bivalves. Les meilleures estimations des conditions environnementales seront donc celles dérivées des compositions isotopiques des premières années de vie de l'animal (Goodwin et al., 2003).

Il n'y a pas que la composition $\delta^{18}\text{O}$ d'un bivalve qui peut être modifiée par les paramètres de croissance de celui-ci mais aussi les concentrations en éléments mineurs. Mouchi et al. (2013) ont observé une discrimination du calcium au dépend du magnésium chez des spécimens adultes de *Crassostrea gigas* (huîtres). Avec l'ontogenèse et la réduction du taux de croissance, l'activité métabolique du manteau de cette espèce contrôle l'incorporation des éléments mineurs (Mouchi et al., 2013). Cette discrimination du métabolisme limite l'utilisation du ratio Mg/Ca de cette espèce comme paléo-thermomètre. Les ratios Mg/Ca et Sr/Ca dans la couche d'aragonite d'*Arctica islandica* varient eux aussi avec l'âge de l'animal et la réduction du taux de croissance (Schöne et al., 2011). Ces ratios tendent à augmenter en fonction de ces deux variables.

Les paramètres de croissance n'influencent cependant pas le ratio Mg/Ca de toutes les coquilles de bivalves, comme c'est le cas pour *Mytilus edulis* (Lorens et Bender, 1980). Le ratio Sr/Ca de la couche de calcite de *Mytilus edulis* est, quant à lui, influencé par le taux d'activité métabolique du manteau, c'est-à-dire les processus de respiration et de photosynthèse (Klein et al. 1996b). La calcite sécrétée près des marges latérales de la coquille de *Mytilus edulis* est plus influencée par l'activité métabolique du manteau que celle sécrétée près de la marge centrale de la coquille (Klein et al., 1996b). Le manteau pompe le Ca vers le fluide extrapalléal, responsable de la fabrication de la coquille, ce qui engendre une réduction du Sr/Ca près des marges latérales (Klein et al., 1996b). Tout comme pour le ratio Mg/Ca , le ratio Sr/Ca n'est pas influencé par les paramètres de croissance de *Mytilus edulis* (Klein et al. 1996b; Lorens et Bender, 1980). Pour obtenir de bonnes estimations du ratio Sr/Ca de la mer à partir des concentrations en éléments

mineurs d'une coquille de *Mytilus edulis*, la calcite déposée le long de l'axe de croissance et vers la marge ventrale doit être préconisée puisqu'elle est en équilibre avec l'eau (Klein et al., 1996b). On peut donc dire que les ratios Mg/Ca et Sr/Ca varient d'un bivalve à l'autre et d'un milieu de cristallisation à l'autre (aragonite ou calcite) en fonction de différents processus.

3.9 Datation d'organismes marins au carbone-14

La datation carbone-14 au spectromètre accélérateur de masse est une des techniques les plus utilisées pour dater du matériel qui contient du carbone. Lorsqu'elle est appliquée à un organisme marin, l'âge calculé reflète l'activité du carbone-14 issue de l'organisme au moment de sa mort (Occhietti et Hillaire-Marcel, 1977). Cette activité résulte de trois facteurs. Elle dépend premièrement de la composition isotopique du réservoir marin de carbone où vivait l'animal, découlant du transfert du carbone-14 atmosphérique dans les eaux marines (Occhietti et Hillaire-Marcel, 1977). Selon Occhietti et Hillaire-Marcel (1977), la composition isotopique du réservoir marin de carbone n'est pas constante. D'une part, le transfert est incomplet dans les mers de hautes latitudes si bien qu'elles présentent un déficit en carbone-14 par rapport à l'atmosphère. D'autre part, les mers éloignées du réservoir principal de carbone sont appauvries en isotopes lourds. Enfin, dans un même bassin, les eaux marines ont généralement une composition isotopique qui varie en fonction de la profondeur (Occhietti et Hillaire-Marcel, 1977). Les eaux profondes, plus anciennes (puisque elles proviennent des océans), sont déficitaires en carbone-14. Ainsi, les espèces littorales et les espèces d'eau profonde d'un même bassin auront des âges carbone-14 différents bien que ces espèces ont réellement le même âge (Occhietti et Hillaire-Marcel, 1977).

L'activité du carbone-14 des organismes marins est aussi influencée par leur fractionnement isotopique, celui-ci variant d'une espèce à l'autre (Occhietti et Hillaire-Marcel, 1977). Certaines espèces concentrent plus de carbone radioactif si bien que leur teneur en carbone-14 est enrichie par rapport à celle de leur milieu. L'organisme donne ainsi un âge plus jeune que celui du milieu (Occhietti et Hillaire-Marcel, 1977). Finalement, l'activité du carbone-14 de l'organisme dépend du taux d'activité du carbone-14 dans l'atmosphère, résultant du champ magnétique terrestre et de l'intensité du rayonnement cosmique (Occhietti et Hillaire-Marcel, 1977). Selon l'importance de ces trois facteurs, les datations au radiocarbone auront

tendance à présenter des écarts en fonction de l'âge réel de l'animal (Occhietti et Hillaire-Marcel, 1977).

Étant donné la difficulté à déterminer la valeur de chacune de ces variables, il est préférable de dater plusieurs échantillons provenant du même endroit pour avoir la meilleure chronologie carbone-14 (Occhietti et Hillaire-Marcel, 1977). De plus, il est suggéré d'échantillonner à travers plusieurs anneaux le long de l'axe de croissance d'une coquille (Culleton et al., 2006). Lors de la datation d'une coquille marine, il est également important de prendre en considération l'effet du réservoir marin local. Cet effet est défini par la remontée à la surface de l'océan d'eaux plus vieilles et par le lent mixage des eaux (Culleton et al., 2006). Ces deux facteurs ont comme conséquence l'appauvrissement en carbone-14 de l'océan par rapport à l'atmosphère (réservoir global; Culleton et al., 2006). La datation d'un organisme marin donnera ainsi un âge carbone-14 plus vieux que l'âge réel.

3.10 La mer de Goldthwait: Communautés marines et compositions isotopiques

La faune de la mer de Goldthwait a jusqu'à aujourd'hui été beaucoup moins étudiée que celle de la mer de Champlain. Seuls quelques sites fossiles de la région de Sept-Îles, sur la Haute-Côte-Nord, ont permis d'identifier des variations faunistiques au cours de l'évolution de la mer de Goldthwait. À la suite du retrait de l'Inlandsis laurentidien, une phase glacio-marine, aux eaux très froides, débute (Hillaire-Marcel, 1980). Selon Hillaire-Marcel (1980), cette phase est caractérisée par une communauté à *Portlandia arctica* et une variété faunistique faible. Dans les assemblages fossiles de la région de Sept-Îles (9 ka $\pm$ 500 BP), on observe en moyenne 13 espèces par site (Hillaire-Marcel, 1980). La phase pléni-marine suit la phase glacio-marine. Durant cette phase, la faune est abondante et variée. On compte plus de 20 espèces dans les sites fossiles de Sept-Îles (8 $\pm$ 1 ka BP; Hillaire-Marcel, 1980). La communauté à *Macoma calcarea* prend place dans les faciès argileux et argilo-silteux profonds. Les *Astarte* et *Clinocardium ciliatum* accompagnent en grand nombre cette espèce dans la sous communauté moyenne. La communauté à *Macoma calcarea* persiste longtemps dans la mer de Goldthwait. Un exemple de cette communauté a donné des âges ^{14}C plus récents que 7 ka BP (Hillaire-Marcel, 1980). Durant cette même phase, la communauté à *Hiatella arctica* s'installe dans les faciès grossiers. La phase finale, soit celle de l'exondation, est caractérisée par un appauvrissement faunistique (Hillaire-

Marcel, 1980). En certains sites fossiles de Sept-Îles (< 7 ka BP), on observe environ une douzaine d'espèces (Hillaire-Marcel, 1980). La diminution de profondeur du bassin permet à la communauté à *Hemithiris psittacea* et à gastéropodes de coloniser les silts-argileux (Hillaire-Marcel, 1980).

Hillaire-Marcel (1977) a analysé les compositions $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ de faunes fossiles provenant des mers post-glaciaires du Québec (à l'exception du golfe de Laflamme) pour définir les compositions respectives de chacune de ces mers (Figure 8). La coquille complète de 400 faunes fossiles provenant de diverses régions du Québec a été analysée. Des échantillons de faunes provenant du golfe du Saint-Laurent actuel ont également été analysés pour des fins de comparaison (Hillaire-Marcel, 1980). Les analyses effectuées sur des coquilles de *Chlamys islandicus*, de *Cryptonatica affinis*, de *Hiatella arctica*, de *Macoma balthica*, de *Macoma calcarea*, de *Mya truncata*, de *Mytilus edulis* et de *Spisula solidissima*, échantillonnées sur la rive nord de l'estuaire maritime du Saint-Laurent (Sept-Îles et Blanc-Sablon), ont établi une composition $\delta^{18}\text{O}$ pour la mer de Goldthwait variant entre -2,2 et 2,7 ‰ ($\bar{x}$ = 0,76 ‰; moyenne calculée à partir des données d'Hillaire-Marcel, 1977). Ces valeurs $\delta^{18}\text{O}$ des coquilles ressemblent à celles du golfe du Saint-Laurent moderne ($\bar{x}$ = 1,48 ‰; valeur tirée d'Hillaire-Marcel, 1977). À titre de comparaison, les analyses effectuées sur des coquilles échantillonnées sur les deux rives du Saint-Laurent ont donné une composition $\delta^{18}\text{O}$ pour la mer de Champlain variant entre -13,2 et 3,8 ‰ ($\bar{x}$ = -4,5 ‰; moyenne calculée à partir des données d'Hillaire-Marcel, 1977). Les valeurs isotopiques des faunes de la mer d'Iberville, toutes positives, varient entre 0,5 et 2,1 ‰ ($\bar{x}$ = 1,58 ‰; moyenne calculée à partir des données d'Hillaire-Marcel, 1977). Selon Hillaire-Marcel (1977), ces valeurs sont représentatives d'une mer arctique. Finalement, les valeurs isotopiques des faunes de la mer de Tyrrell varient entre -3 et 2,9 ‰ ($\bar{x}$ = 0,52 ‰; moyenne calculée à partir des données d'Hillaire-Marcel, 1977).

L'interprétation des compositions $\delta^{18}\text{O}$ des faunes des mers post-glaciaires doit être faite en considérant certaines variables. Les compositions reflètent non seulement les compositions de l'eau dans laquelle ces faunes vivent mais aussi la température moyenne de cette dernière au moment de la sécrétion du CaCO_3 (Hillaire-Marcel, 1977). Bien que *Mytilus edulis* et *Hiatella arctica* vivent généralement dans les mêmes biocénoses, leurs compositions isotopiques ne reflèteront jamais les mêmes températures de croissance (Hillaire-Marcel, 1981). *Hiatella arctica*, étant plus adaptée aux eaux subarctiques et arctiques (températures avoisinant 0 °C),

croît durant toute l'année. Sa coquille montre alors des compositions $\delta^{18}\text{O}$ concordant avec la moyenne thermique annuelle (Hillaire-Marcel, 1977; Hillaire-Marcel, 1981). La profondeur à laquelle vit une espèce est une autre variable à examiner lors de l'interprétation des valeurs isotopiques des faunes. Alors que la température moyenne annuelle diminue avec la profondeur, le facteur de fractionnement de même que la composition en isotopes lourds de l'oxygène augmentent (Hillaire-Marcel, 1981). Cependant, il arrive que deux espèces vivant dans un même domaine bathymétrique n'aient pas les mêmes compositions isotopiques. Cet écart peut être dû au fait que les espèces ont un fractionnement isotopique différent ou que leur saison de croissance est inégale (Hillaire-Marcel, 1981). Les eaux continentales, selon leur origine, influencent également la composition $\delta^{18}\text{O}$ des faunes. Cette composition est certainement plus appauvrie par un apport en eaux de fonte ($-30\text{‰} \leq \delta^{18}\text{O} \leq -22\text{‰}$) que par un apport en eaux douces de rivières ou de lacs glaciaires (Hillaire-Marcel, 1981).

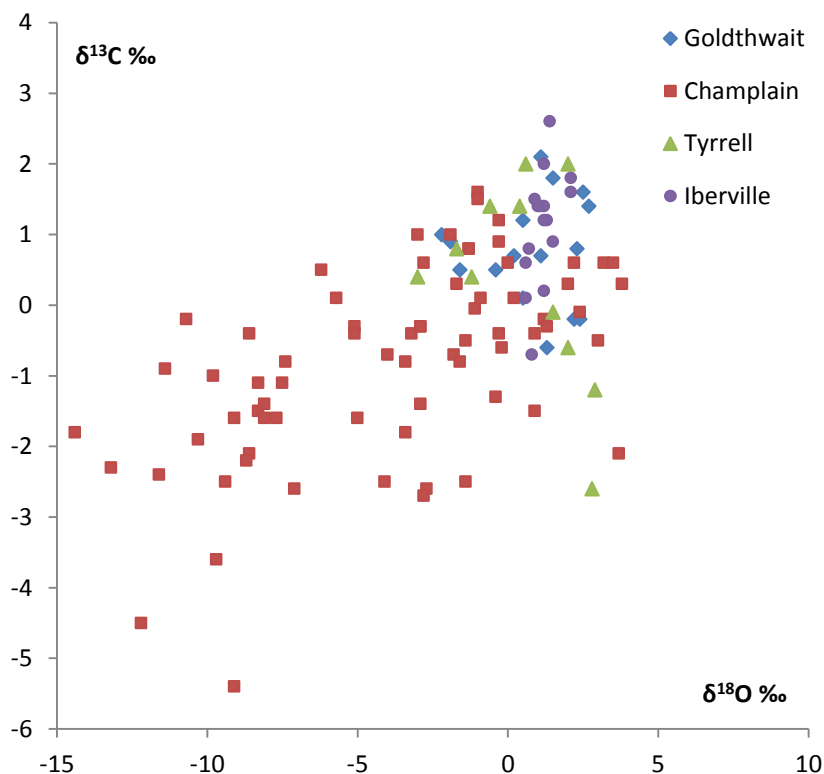


Figure 8. Compositions isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$) des mers post-glaciaires (données tirées d'Hillaire-Marcel, 1977).

4. Méthodologie

4.1 Méthodes sur le terrain

4.1.1 Échantillonnage du falun 1

En août 2012, le falun 1 de la vallée de la rivière aux Anglais (Figure 1) a été échantillonné dans le but de caractériser l'assemblage d'invertébrés marins de ce dépôt et de déterminer les conditions environnementales lors de sa formation. À l'aide d'échelles de spéléologues, le falun a été échantillonné à quatre hauteurs, soit à 1,25; 2,50; 3,75 et à 5 m de la surface (Forêt; Figure 9). À chacune de ces hauteurs, deux sacs, d'approximativement 1,5 L de volume, ont été remplis avec le matériel du dépôt (8 échantillons au total). Des coquilles de spécimens adultes de *Mytilus edulis* ont également été recueillies le long des quatre horizons pour déterminer les compositions isotopiques et géochimiques de la mer de Goldthwait au cours de la déposition du falun.

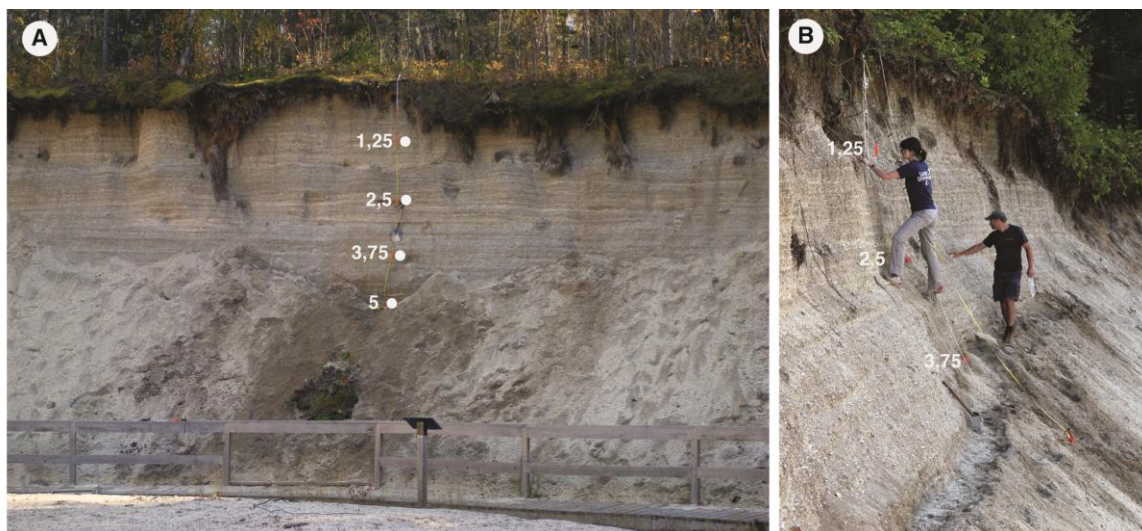


Figure 9. Les quatre sites d'échantillonnage du falun 1 (photo A prise en 2013; photo B prise en 2012 par Bernard Lauriol).

1.2 Installation de capteurs thermiques et échantillonnage de l'eau de l'estuaire maritime du Saint-Laurent

Quatre capteurs thermiques Hobo Tidbit v2 ont été installés dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent, à marée basse, dans la région de Baie-Comeau (Figure 1). Deux de ces capteurs ont été installés sur l'estran des Battures de Manicouagan ($49^{\circ}05'441''\text{N}$; $68^{\circ}14'348''\text{O}$; -0,75 m), dans le secteur Pointe Lebel au sud de la vallée de la rivière aux Anglais (Figure 1). La hauteur d'eau à ce moment de la marée était d'environ 0,4 m. Le premier capteur a été installé à environ 180 m du bord du rivage (niveau des plus hautes marées) ($49^{\circ}08'945''\text{N}$; $68^{\circ}23'975''\text{O}$; 2 m). Le deuxième a été installé à environ 10 m de distance du premier. Les deux autres capteurs ont été installés à l'Anse-à-Moreau, une petite baie peu profonde située au sud-est des faluns de Baie-Comeau, lors d'une marée d'environ 0,5 m (Figure 1). Le premier capteur ($49^{\circ}16.104'\text{N}$; $68^{\circ}03.578'\text{O}$) a été placé à l'extérieur de l'eau. Le deuxième a été mis dans une cuvette marine à environ 20 m de distance du premier. Ces quatre capteurs thermiques ont enregistré la température à chaque heure en ces deux endroits et ce, de septembre 2012 à septembre 2013. Le temps de réponse des capteurs Hobo Tidbit v2 pour enregistrer la température de l'eau est de cinq minutes alors que leur résolution est de $0,02^{\circ}\text{C}$ et la précision des données enregistrées de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Les données de température enregistrées par ces capteurs ont permis de déterminer le régime thermique de l'estuaire maritime du Saint-Laurent moderne.

Un échantillon de 30 mL d'eau de mer a été prélevé au port de Baie-Comeau à chaque mois, de septembre 2012 à septembre 2013, par Mathieu Payette du Jardin des Glaciers de Baie-Comeau. Ces échantillons ont permis de déterminer les compositions isotopiques (^{18}O et D) et géochimiques mensuelles de l'estuaire maritime du Saint-Laurent moderne.

Des diagrammes de dispersion ont été réalisés à partir des données de températures mensuelles de l'estuaire maritime du Saint-Laurent et des compositions isotopiques ainsi que géochimiques de ce dernier. Ces diagrammes ont permis de déterminer le degré de dépendance entre ces différentes variables. Des tendances générales entre les variables ont ainsi pu être dégagées. Lorsque la corrélation entre deux variables était forte une droite de régression linéaire a été ajoutée au diagramme pour traduire la relation entre ces deux variables.

4.1.3 Collecte de coquilles de *Mytilus edulis* modernes

Une douzaine de spécimens adultes vivants de *Mytilus edulis* a été recueillie aux Battures de Manicouagan ainsi qu'à l'Anse à Moreau au cours de la campagne de terrain d'août 2012. En septembre 2013, deux plongeurs de Baie-Comeau, dont Sylvain Sirois, ont prélevé dans la baie de Saint-Pancrace, au nord-est de l'Anse à Moreau, des spécimens de *Mytilus edulis* vivants dans la zone infralittoral (environ 6 m de profondeur). Tous ces échantillons ont été mis dans de l'eau bouillante afin d'en retirer leur chair et d'en conserver uniquement leur coquille. Les coquilles de ces moules modernes ont été utilisées pour comparer leurs compositions isotopiques et géochimiques à celles des coquilles recueillies au falun 1.

4.2 Méthodes en laboratoire

4.2.1 Analyses isotopiques (^{18}O -D) et géochimiques de l'estuaire maritime du Saint-Laurent

Les échantillons d'eau prélevés à chaque mois au port de Baie-Comeau, à l'exception de celui du mois de juin 2013, ont été analysés pour déterminer leurs compositions en isotopes stables de l'oxygène et en isotopes stables de l'hydrogène au laboratoire d'isotopes stables G.G. Hatch de l'Université d'Ottawa. La composition isotopique de ces deux éléments chimiques a pu être déterminée avec le même aliquote d'eau. Toutefois, l'analyse de l'oxygène a dû être faite en premier. Avant de procéder à l'analyse isotopique de l'oxygène, quelques grammes de charbon de bois et de cuivre ont été ajoutés à 2 ml de chacun des échantillons d'eau pour emprisonner, respectivement, tout sulfure d'hydrogène dissous ou matière organique présent dans les échantillons. Ces derniers ont ensuite été laissés au repos pendant cinq jours. Une fois les échantillons rincés, 0,6 ml d'eau a été prélevé pour chacun des échantillons pour ensuite être mis dans des fioles (*exetainers*) en position verticale dans un bloc. Quatre standards de composition isotopique connue ont été ajoutés au bloc pour normaliser les résultats à la valeur moyenne normalisée de l'eau océanique, VSMOW. Un mélange de 2 % de CO_2 et d'hélium a ensuite été envoyé dans les fioles à un flot de 60 à 80 ml/min et ce, pendant quatre minutes. Les échantillons d'eau et les quatre standards ont ensuite été laissés au repos dans un bain d'eau. L'équilibration du CO_2 du mélange injecté avec celui des eaux salées est atteinte après un minimum de cinq jours à 25 °C. Une fois l'équilibre atteint, l'analyse isotopique de l'oxygène des échantillons a pu être débutée. Les isotopes de l'oxygène ont été déterminés à l'aide d'un spectromètre de masse

Thermo Finnigan MAT Delta Plus XP, attaché à un Gas Bench II. Les résultats $\delta^{18}\text{O}$ ont une précision de $\pm 0,15 \text{ ‰}$. Les mêmes échantillons d'eau ont ensuite été analysés pour leur composition en isotopes de l'hydrogène. Des catalyseurs à base de platine ont été ajoutés dans les fioles. Un mélange de 2 % d'hydrogène et d'hélium a été injecté aux échantillons d'eau et aux standards de la même manière que celle décrite précédemment pour l'analyse des isotopes de l'oxygène. Les fioles ont ensuite été laissées au repos dans le Gas Bench pendant 24 heures à 25 °C. Les résultats δD ont une précision de $\pm 2 \text{ ‰}$ (Friedman et O'Neil, 1977).

Les 12 échantillons d'eau ont également été analysés au laboratoire de géochimie de l'Université pour déterminer leur concentration en certains éléments chimiques mineurs: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{+} , Ba^{2+} . Pour enlever les fines particules en suspension dans ces eaux et ne mesurer que la concentration en ions dissous, 10 mL de chacun des échantillons a été filtré avec un filtre de 0,45 μm et recueilli dans une fiole. À ce 10 mL, 100 μL de HNO_3 à 1 % a été ajouté pour réduire le pH de l'eau à une valeur inférieure à 4. Par la suite, 1 mL de chacun des échantillons acidifiés a été prélevé puis dilué par 5 avec le même acide. Les 12 échantillons ont été analysés pour leur concentration en cations avec un spectromètre Vista-Pro ICP-ES. La limite de détection du Ca^{2+} était de 0,0044 ppm; celle du Mg^{2+} était de 0,018 ppm, celle du Sr^{+} était de 0,014 ppm et celle du Ba^{2+} était de 0,009 ppm.

4.2.1 Tri des échantillons du falun 1

Le tri des huit échantillons prélevés au falun 1 a été effectué au Campus du Patrimoine naturel (Établissement des collections et de la recherche) du Musée canadien de la nature à Gatineau. Le tamisage à l'eau a été utilisé comme première technique de tri. Cette technique était idéale pour déloger les particules très fines prises dans les coquilles de spécimens adultes sans toutefois briser les spécimens. Pour chacun des échantillons prélevés, 500 mL de matériel (coquilles et matrice sableuse) a été passé au travers de quatre tamis au maillage métallique (4 mm, 2 mm, 1 mm, 500 μm). Le matériel se retrouvant au-dessus de chacun des tamis a ensuite été séparé en classes ou en embranchements d'invertébrés marins à l'aide d'un microscope binoculaire. Nous avons retenu les classes et les embranchements suivants: les bivalves, les gastéropodes, les cirripèdes, les échinidés, les brachiopodes, les foraminifères, les bryozoaires et les polychètes. Les spécimens ont été mis dans des flacons comprenant de l'éthanol à 70 % pour bien les conserver et pour les identifier ultérieurement en laboratoire.

4.2.2 Identification des espèces du falun 1-

L'identification des espèces des quatre horizons du falun 1 a été faite au Musée canadien de la nature avec l'aide du malacologiste André L. Martel et des assistantes de recherche Sheila Edwards et Geneviève Roy. Plusieurs références et guides d'identification (Abbott, 1974; Bourget, 1997; Lubinsky, 1980; Macpherson, 1971) ont été utilisés pour déterminer la famille, le genre ou l'espèce de chacun des individus. Les collections d'invertébrés marins du Musée, particulièrement celles des mollusques, ont été utilisées dans les cas où il était difficile d'identifier un spécimen. Étant donné l'intrusion marine dans les basses terres du Saint-Laurent et de l'Outaouais suite à la formation de la mer de Goldthwait, les espèces retrouvées dans les faluns de Baie-Comeau devraient ressembler à celle de la mer de Champlain. Pour cette raison, des références sur les fossiles d'invertébrés marins de la mer de Champlain ont également été utilisées (Wagner, 1970). Chaque espèce et famille différente identifiée au sein des échantillons a été photographiée à l'aide d'un système d'imagerie à haute résolution (caméra digitale PixeLink 6.6 mp) couplé à un microscope binoculaire de type Olympus SZX12 et équipé d'un objectif de 1.2X.

L'identification des espèces et des familles d'invertébrés des quatre horizons d'échantillonnage nous a permis de comparer la communauté d'invertébrés marins (principalement des mollusques) de chacun de ces horizons et de définir l'habitat physique dans lequel ces communautés ont vécu. La présence d'une espèce dans un environnement spécifique nous renseigne en effet sur la température, la salinité et la profondeur de l'eau de même que sur la nature du substrat (Hillaire-Marcel, 1980). L'identification nous a également permis de faire des comparaisons avec la communauté d'invertébrés marins qui vit présentement dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent.

4.2.3 Décompte des espèces de chacun des horizons du falun 1 et analyses statistiques

Le décompte de toutes les espèces de bivalves et de gastéropodes a été effectué avec l'aide de l'assistante de recherche Sheila Edwards du Musée canadien de la nature. Chacune des valves de bivalves qui possédait un sommet (ou umbo) a été dénombrée. Les valves qui n'avaient plus leur umbo mais qui représentaient 50 % de la coquille ont également été dénombrées. Le nombre total de valves pour chacune des espèces de bivalves a été divisé par deux afin d'avoir une estimation suffisamment réelle du nombre d'individus et de ne pas surestimer ce nombre.

Les petits fragments de coquille n'ont pas été comptés. Quant aux spécimens de gastéropodes, ceux qui possédaient un apex et quelques-uns de leurs tours de même que ceux dont 80 % de leur coquille était encore conservée mais qui ne possédaient pas d'apex ont été comptés. Tout comme pour les bivalves, les petits fragments de gastéropodes n'ont pas été comptés. Les spécimens de cirripèdes (balanes), de brachiopodes, d'échinidés (oursins), de polychètes (annélides tubicoles), de foraminifères et de bryozoaires n'ont également pas été dénombrés. Leur présence ou leur absence dans un horizon a été cependant notée. Un diagramme représentant l'abondance de chacune des espèces (en pourcentage) en fonction de la profondeur dans le falun 1 a été fait pour déterminer la variabilité de la communauté d'invertébrés marins au sein du dépôt. L'utilité de ce genre de diagramme a été démontrée dans des études sur les pollens et les dépôts éoliens (Lauriol et al., 2002).

À l'aide du logiciel Primer-E V.6, des analyses multivariées ont été menées sur les données brutes d'abondance en espèce de chacun des échantillons de 500 ml des horizons du falun 1 pour déterminer si la communauté d'invertébrés marins était la même le long du faciès. Une analyse de regroupement hiérarchique (*Cluster*) a été réalisée puisque ce genre d'analyse permet de déterminer le degré de ressemblance entre les échantillons provenant d'un horizon d'échantillonnage ainsi que le degré de ressemblance entre les échantillons provenant de différents horizons d'échantillonnage. Une analyse de positionnement multidimensionnel (*MDS*) a également été effectuée à partir des données brutes d'abondance. Ce type d'analyse, par une représentation en 2D ou en 3D des échantillons, permet aussi de déterminer si la ressemblance est plus grande au sein d'un même horizon qu'elle ne l'est d'un horizon à l'autre. En plus d'analyses multivariées, un test statistique de similarité (*ANOSIM*) a été réalisé. Ce test statistique est habituellement employé pour confirmer ou rejeter une hypothèse formulée. Pour cette recherche, l'hypothèse de départ formulée, ou H_0 , propose qu'il n'existe aucune différence dans la composition des communautés d'invertébrés marins des quatre horizons du falun 1.

4.2.4 Analyses isotopiques (^{13}C et ^{18}O) de coquilles de *Mytilus edulis*

Une coquille adulte de *Mytilus edulis* provenant de chacun des horizons d'échantillonnage (1,25; 2,50; 3,75 et 5 m), des Battures de Manicouagan, de l'Anse à Moreau et de la baie de Saint-Pancrace a été utilisée pour des analyses isotopiques du carbone-13 et de l'oxygène-18. Les moules bleues ont été choisies puisqu'elles conviennent le mieux aux reconstructions des paléo-environnements (Klein et al., 1996a). De plus, en déposant habituellement à chaque année un anneau de croissance 'hivernale' (bande étroite et plus foncée) sur sa couche prismatique externe de calcite, *Mytilus edulis* contient des enregistrements continuels de la température et de la géochimie de l'eau dans laquelle elle croît (Klein et al., 1996a).

La couche de nacre des coquilles, majoritairement composée d'aragonite, a tout d'abord été enlevée à l'aide d'un outil à meule rotative (Dremel 4200) aux laboratoires du Département de Géographie de l'Université d'Ottawa pour ne laisser que la couche de calcite. Le périostracum, couche organique externe de la coquille de *Mytilus edulis* et généralement noire, a été enlevé des coquilles modernes à l'aide d'un fin papier sablé. Pour leur part, les coquilles du falun, datant de plus de 10 ka BP (Bernatchez et al., 1999), n'ont plus cette couche organique. Puisque la matière organique des coquilles peut modifier le contenu ^{18}O du CO_2 extrait lors des analyses isotopiques de l'oxygène (Epstein, 1953), toutes les coquilles ont été submergées dans du peroxyde d'hydrogène pendant environ 24 heures afin d'enlever la matière organique volatile puis ensuite séchées à l'air libre. Au laboratoire d'isotopes stables G.G.Hatch de l'Université, la calcite de la couche prismatique externe des coquilles a été échantillonnée le long de l'axe de croissance de celles-ci (antéro-postérieur) avec une perceuse à rotation («*Craftsman rotary tool*») et une mèche de 1 mm de diamètre; une méthode standard qui a été employée sur des coquilles de *Mytilus edulis* (Klein et al., 1996a) et de *Mytilus californianus* (Killingley, 1981). Pour l'échantillonnage, les coquilles ont été montées sur une plaque de plastique avec de la résine époxyde pour qu'elles demeurent stables lors des perforations. Entre 26 et 55 perforations ont été effectuées par coquille tout dépendamment de la taille de celle-ci (Figure 10). Les échantillons de poudre de calcite ont ensuite été pesés avec une microbalance Toledo AT21 Comparator. Ces échantillons, pesant entre 0,4 mg et 0,6 mg, ont ensuite été mis dans des fioles.

Au laboratoire d'isotopes stables G.G.Hatch, les fioles contenant les échantillons de poudre de calcite ont été mises à l'horizontal dans un bloc pour l'ajout de 0,1 ml d'acide

phosphorique (H_3PO_4) de 104 % de concentration. Un flot de 60 à 80 mL/min d'hélium a été envoyé à l'intérieur des fioles pendant 6 minutes pour remplacer l'air contenu dans ces fioles par du He. Les fioles ont ensuite été placées dans un Gas Bench II à une température de 25 °C pendant 24 heures afin de dissoudre les échantillons sous conditions isothermiques. Le CO_2 produit par la dissolution de la calcite a été analysé en continu avec un spectromètre de masse Thermo Finnigan Delta Plus XP. La précision des analyses $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ est de $\pm 0,1$ ‰.

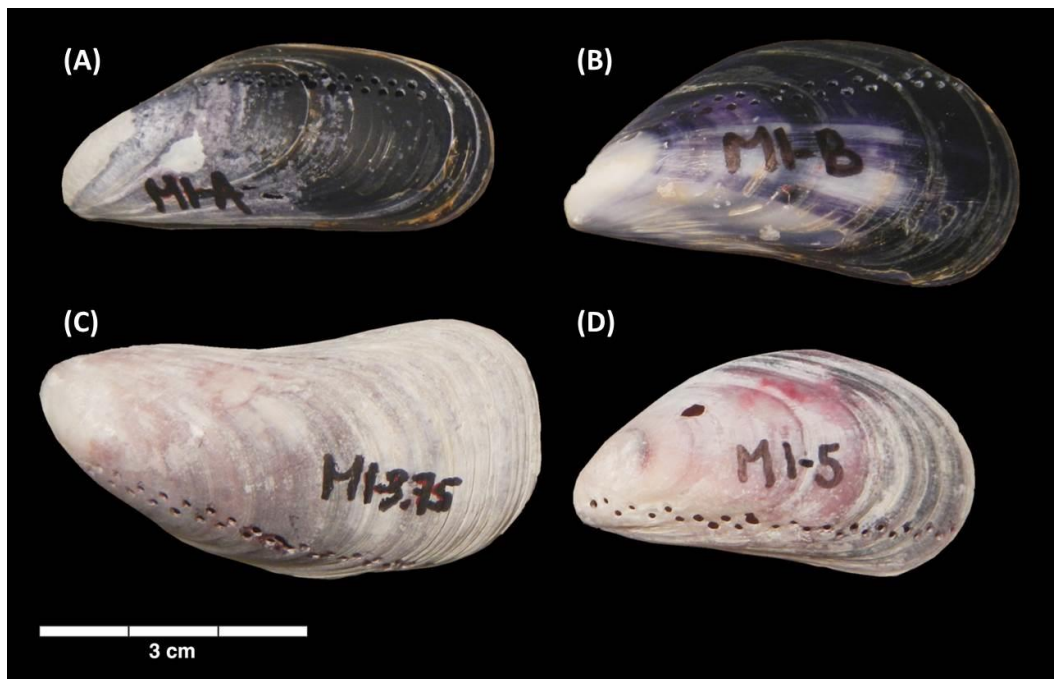


Figure 10. Exemples d'échantillonnage de la calcite le long de coquilles de *Mytilus edulis* pour des analyses isotopiques et géochimiques. (A) Moule de l'Anse à Moreau, 2012. (B) Moule des Battures de Manicouagan, 2012. (C) Moule de l'horizon 3,75 m du falun 1, ca. 10 ka ^{14}C . (D) Moule de l'horizon 5 m du falun 1, ca. 10 ka ^{14}C .

4.2.5 Analyses géochimiques de coquilles de *Mytilus edulis*

Une fois les échantillons de poudre de calcite des coquilles du falun et des coquilles modernes analysés pour leur composition isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$), leur composition géochimique a été analysée au laboratoire de géochimie de l'Université; une approche aussi employée pour les spéléothèmes (Fairchild et Baker, 2012). Les mêmes échantillons ont été dilués dans 10 mL d'acide nitrique (HNO_3) concentré à 1 %. Les fioles avec leur solution ont été pesées avant et après l'ajout de 0,1 mL d'une solution de scandium et d'yttrium, chacun concentré à 500 ppm. Les analyses géochimiques ont été réalisées à partir d'un spectromètre Vista-Pro ICP-ES. Les éléments chimiques mineurs détectés sont les suivants: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{+} , Ba^{2+} . Leur limite de détection était respectivement de 0,0062; 0,004; 0,007 et 0,008 ppm. Les résultats des analyses géochimiques ont été convertis en masse d'échantillons:

$$[1] \text{ corriger } [\text{ion}] \text{ (mg/g)} = \frac{[\text{ion}] \times \text{masse eau}}{\text{masse échantillons}}$$

5. Résultats

5.1 Conditions actuelles de l'estuaire maritime du Saint-Laurent

Du 1^{er} septembre 2012 au 31 août 2013, la température moyenne mensuelle de l'eau de l'estuaire maritime du Saint-Laurent à l'Anse à Moreau (Figure 11; A, B) varie entre -2 et 12 °C ($\bar{x} = 4,8 \pm 4,9$ °C). La température la plus élevée est atteinte en juillet alors que la plus faible est atteinte en janvier. La température moyenne mensuelle de l'eau de l'estuaire maritime aux Battures de Manicouagan (Figure 11; C, D) varie entre -2 et 15 °C ($\bar{x} = 5,9 \pm 6,1$ °C). Tout comme à l'Anse à Moreau, la température de juillet est la plus élevée alors que celle de janvier est la plus faible. Le plus grand réchauffement au cours de l'année se produit entre avril et mai. La température moyenne mensuelle de l'eau augmente de 2 à 8 °C à l'Anse à Moreau et de 3 à 9 °C aux Battures de Manicouagan.

Les compositions isotopiques et géochimiques de l'eau de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, pour la période allant de septembre 2012 à septembre 2013, à l'exception du mois de juin 2013, sont présentées à la figure 12. Le $\delta^{18}\text{O}$ de l'estuaire maritime du Saint-Laurent varie entre -10,1 ‰ (décembre) et -1,7 ‰ (novembre) avec une moyenne de $-5,2 \pm 3$ ‰. La plus grande variation inter-mensuelle du $\delta^{18}\text{O}$ est celle entre novembre et décembre. Le $\delta^{18}\text{O}$ augmente rapidement de janvier (-10 ‰) à mars (-5,3 ‰). Une deuxième augmentation rapide du $\delta^{18}\text{O}$ s'observe entre juillet (-7,6 ‰) et septembre 2013 (-2,2 ‰). Le $\delta^2\text{H}$ de l'estuaire maritime du Saint-Laurent varie entre -75,7 ‰ (décembre) et -12,7 ‰ (novembre) avec une moyenne de $-38 \pm 22,5$ ‰. Tout comme pour le $\delta^{18}\text{O}$, le $\delta^2\text{H}$ chute rapidement entre novembre et décembre puis augmente considérablement entre janvier (-73 ‰) et mars (-39,2 ‰). Une seconde augmentation rapide du $\delta^2\text{H}$ s'observe entre juillet (-56,8 ‰) et août (-14,9 ‰). Le ratio molaire de Ba/Ca de l'estuaire maritime du Saint-Laurent varie entre 0,006 (septembre 2013) et 0,04 (janvier) avec une moyenne de $0,02 \pm 0,01$. Le fait le plus marquant est l'augmentation rapide du ratio molaire entre novembre (0,009) et janvier (0,04). Après janvier, le ratio molaire Ba/Ca chute rapidement pour atteindre 0,01 en mars. Le ratio molaire Mg/Ca de l'estuaire maritime du Saint-Laurent varie entre 3,21 (décembre) et 3,51 (septembre 2012) avec une moyenne de $3,41 \pm 0,09$. La plus grande diminution du ratio molaire s'observe entre novembre (3,5) et décembre. Le ratio molaire Mg/Ca augmente rapidement après décembre pour atteindre 3,5 en février. Les valeurs Mg/Ca augmente graduellement d'avril à septembre 2013. Le ratio molaire Sr/Ca de

l'estuaire maritime du Saint-Laurent varie entre 7,65 (décembre) et 8,1 (janvier) avec une moyenne de $7,89 \pm 0,17$. Il varie grandement d'un mois à l'autre.

Des diagrammes de dispersion ont été réalisés afin de déterminer le degré de dépendance entre les différentes variables analysées dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent (Figure 13). À partir de ces diagrammes, des tendances générales entre ces variables ont pu être dégagées. On observe une corrélation linéaire positive moyenne à forte ($r = 0,6$) entre la température moyenne mensuelle de l'eau et le $\delta^{18}\text{O}$ de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. En effet, les points du diagramme de dispersion entre ces deux variables ont tendance à se rapprocher d'une droite. De plus, la corrélation est statistiquement significative (seuil de 5 %; $p = 0,04$). Une droite de régression a été ajoutée au diagramme pour traduire la relation entre ces deux variables ($y = 0,3223x - 6,9378$). Le coefficient de détermination de cette régression linéaire ($r^2 = 0,36$) indique que la température moyenne mensuelle de l'eau explique 36 % de la variation du $\delta^{18}\text{O}$ dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Il y aurait donc d'autres facteurs qui influeraient sur la variation du $\delta^{18}\text{O}$ dans l'estuaire maritime. On note également une corrélation linéaire positive moyenne à forte ($r = 0,58$) et statistiquement significative (seuil de 5 %; $p = 0,04$) entre la température moyenne mensuelle de l'eau et le $\delta^2\text{H}$ de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Cependant, deux valeurs $\delta^2\text{H}$ (-73 ‰ et -75,7 ‰) s'écartent des autres valeurs dans le diagramme de dispersion et influencent sûrement le coefficient de corrélation linéaire entre les deux variables. Une droite de régression a aussi été ajoutée à ce diagramme ($y = 2,3273x - 50,445$). La température moyenne mensuelle de l'eau explique, cette fois-ci, 33 % de la variation du $\delta^2\text{H}$ de l'estuaire maritime du Saint-Laurent ($r^2 = 0,33$). Il existe une corrélation linéaire négative moyenne ($r = -0,54$) et statistiquement significative (seuil de 10 %; $p = 0,09$) entre la température moyenne mensuelle de l'eau et le ratio molaire Ba/Ca de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Deux valeurs Ba/Ca (0,03 et 0,04) semblent influencer le coefficient de corrélation linéaire entre ces deux variables. La corrélation entre la température moyenne mensuelle de l'eau et le ratio molaire Mg/Ca de l'estuaire maritime est négative et faible ($r = 0,3$). On ne dégage aucune tendance des points de ce diagramme à prendre la forme d'une droite ou d'une courbe. Le ratio molaire Sr/Ca de l'estuaire maritime du Saint-Laurent varie très faiblement et de façon négative avec la température moyenne mensuelle de l'eau ($r = 0,15$). Encore une fois, les points du diagramme n'ont pas tendance à se rapprocher d'une droite ou d'une courbe.

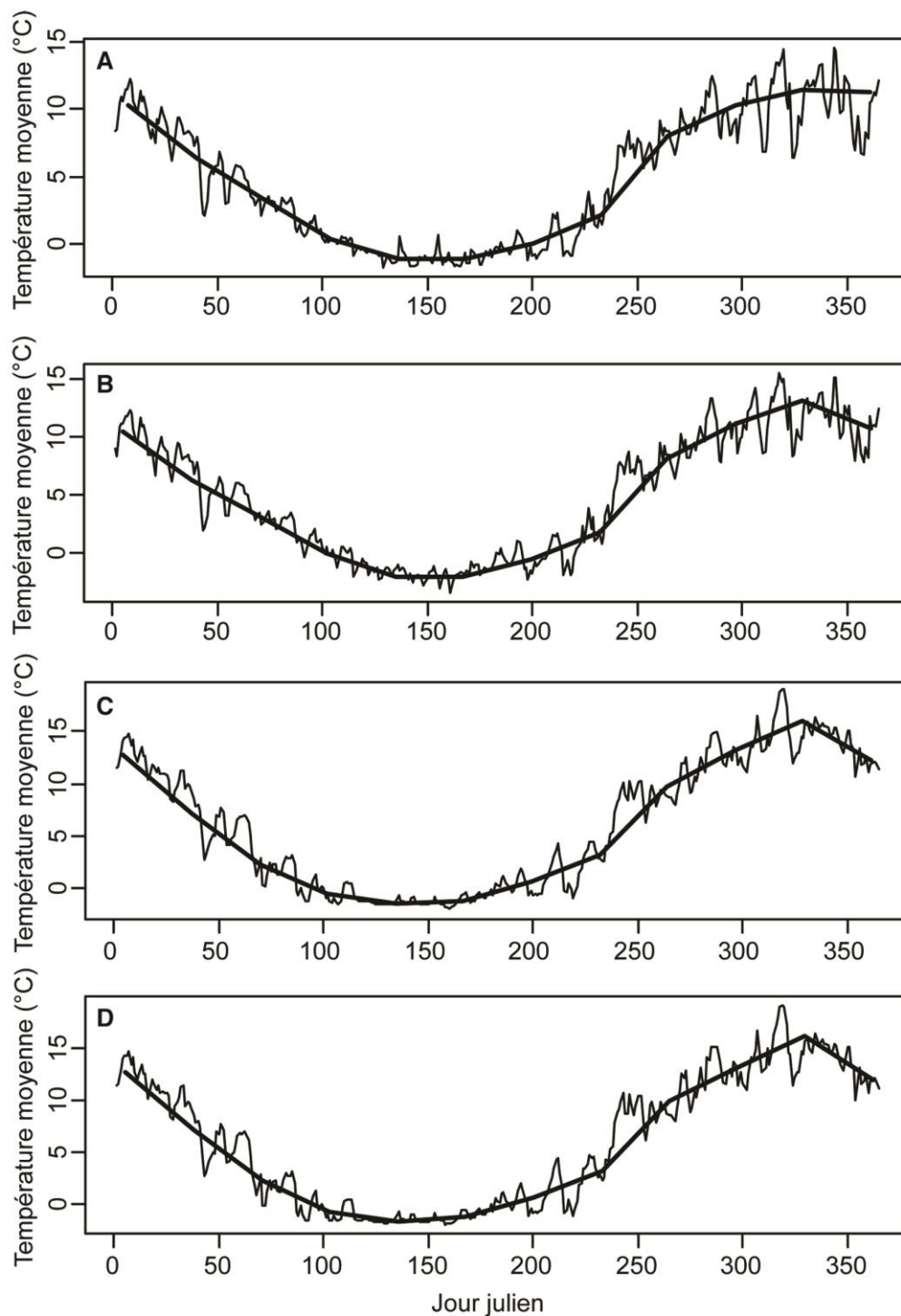


Figure 11. Températures moyennes journalières de l'eau de l'estuaire maritime du Saint-Laurent enregistrées par deux capteurs thermiques indépendants placés sur l'estran, à marée basse, à l'Anse à Moreau (A, B) ainsi qu'aux Battures de Manicouagan (C, D) du 1^{er} septembre 2012 au 31 août 2013. Les lignes pleines représentent la température moyenne mensuelle.

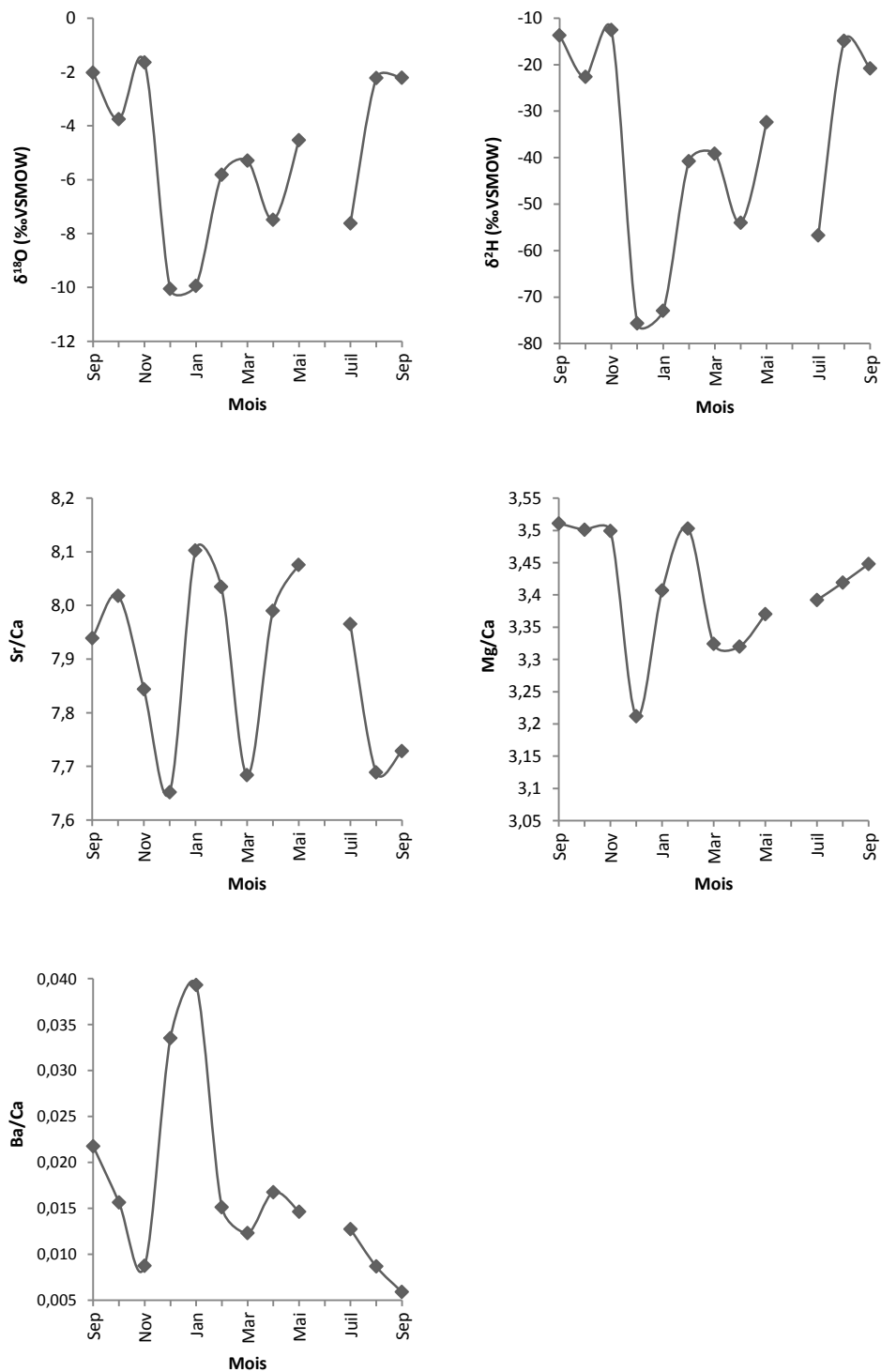


Figure 12. Compositions isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) et géochimiques (ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca et Sr/Ca) de l'eau de l'estuaire maritime du Saint-Laurent de septembre 2012 à septembre 2013 à l'exception du mois de juin.

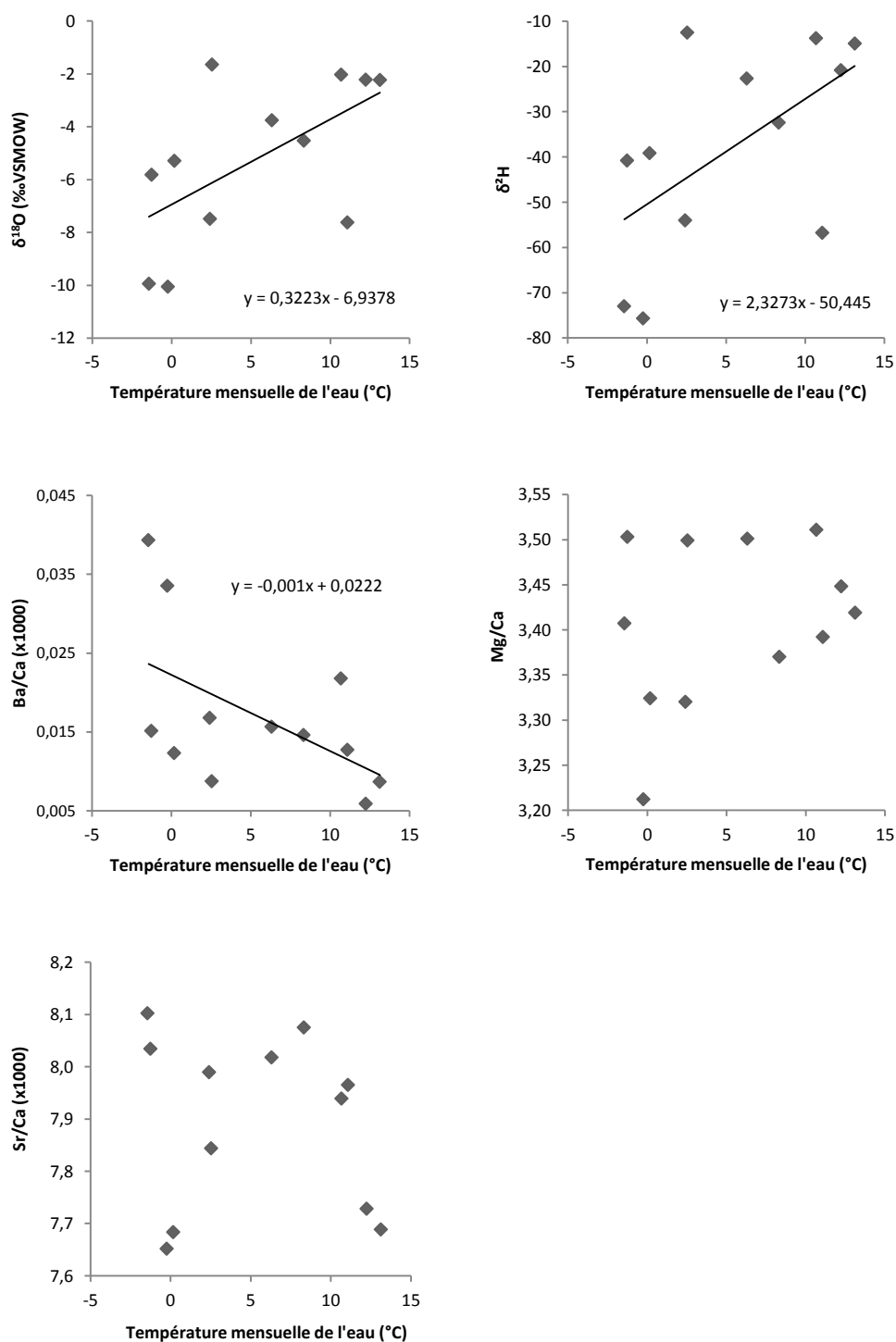


Figure 13. Diagrammes de dispersion illustrant les corrélations entre les compositions isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) ainsi que géochimiques (ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca) et la température mensuelle de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Une droite de régression linéaire a été ajoutée aux diagrammes du $\delta^{18}\text{O}$, du $\delta^2\text{H}$ et du ratio molaire Ba/Ca.

5.2 Les invertébrés marins du falun 1

Dans le falun 1 de Baie-Comeau, Bernatchez et al. (1999) ainsi que Coutu et Bernatchez (2005) ont dénombré quatre embranchements d'invertébrés marins regroupant 21 espèces (Tableau 2). Ils ont identifié parmi les mollusques: 9 espèces de gastéropodes, 8 espèces de bivalves; les crustacés: 2 espèces de cirripèdes (balanes); les brachiopodes: 1 espèce; les échinodermes: 1 espèce.

À partir des échantillons que nous avons recueillis en août 2012 et en portant une attention particulière aux micro-mollusques, incluant les stades juvéniles, nous avons recensé au total sept embranchements d'invertébrés marins comprenant 25 espèces ou taxons (Tableau 3). Plus précisément, nous avons identifié 9 gastéropodes identifiés à l'espèce ainsi que 2 groupes identifiés à la famille (*Buccinidae spp.* et *Naticidae spp.*), 7 bivalves, 2 cirripèdes, 1 brachiopode, 1 échinidé, 1 foraminifère, 1 annélide tubicole (polychète) et 1 bryzoaire (Figure 14, 15, 16). Les spécimens de *Buccinidae* et de *Naticidae* étaient trop petits (stades juvéniles) pour leur attribuer un nom d'espèce. Sans attribuer un nom spécifique à chacun de ces individus, nous pouvons dire que l'ensemble des *Buccinidae* et des *Naticidae* identifié par Bernatchez et al. (1999), par Coutu et Bernatchez (2005) et par le Jardin des Glaciers de Baie-Comeau a été observé dans nos échantillons (Figure 17). Aucun spécimen de *Serripes groenlandicus* et de *Zirfaea crispata*, identifié par ces derniers (stades juvéniles), n'a cependant été trouvé dans nos échantillons (Figure 17).

À la liste de Bernatchez et al. (1999) et de Coutu et Bernatchez (2005) s'est ajouté six nouveaux gastéropodes, dont *Boreocingula cf. castanea*, *Boreotrophon clathratus*, *Moelleria costulata*, *Puncturella noachina*, *Testudinalia cf. testudinalis* et *Velutina sp.* Une modification taxonomique s'avère nécessaire: les spécimens de *Tachyrhynchus erosum*, identifiés par Bernatchez et al. (1999) et Coutu et Bernatchez (2005), seraient plutôt des *Acirsa borealis*; confirmation obtenue suite à l'analyse des protoconques. Une nouvelle espèce de bivalve a aussi été identifiée. Il s'agit de *Musculus sp.* (possiblement *Mosculus discor*). Les autres chercheurs peuvent ne pas avoir identifié cette espèce étant donné la petitesse (stade juvénile) des spécimens retrouvés, la fragilité de sa coquille et sa ressemblance à *Mytilus edulis*. Les individus appartenant à cette espèce, trouvés le long du faciès du falun, ne sont guère plus gros que 1 ou 2 mm, d'où l'importance de faire le tri du matériel microscopique. Trois nouveaux embranchements (foraminifères, bryozoaires et annélides) se sont aussi ajoutés à la liste. Nous

n'avons pu attribuer un taxon aux foraminifères et aux bryozoaires vu leur taille et la difficulté d'identification. Le genre *Spirorbis* est celui que nous avons attribué aux annélides tubicoles.

Le nombre d'individus pour chacune des espèces ou familles de bivalves, de gastéropodes et de brachiopodes et ce, pour chacun des horizons d'échantillonnage dans le faciès du falun, est présenté au tableau 4. Bien que nous avons noté la présence de différentes espèces de buccins (*Buccinum glaciale*, *Buccinum scalariforme*, *Buccinum undatum* et *Plicifusus kroeyeri*) ainsi que de natices (*Amauropsis islandica*, *Cryptonatica affinis*, *Euspira pallida*) au stade adulte dans le falun, il a été difficile de les dénombrer avec certitude étant donné la dominance des stades juvéniles (très petite dimension) et l'état de certains individus. Nous avons donc regroupé l'ensemble des espèces de buccins (*Buccinidae* spp.) et de natices (*Naticidae* spp.) pour effectuer le décompte. Étant donné leur grande abondance et leur état habituellement fragmenté, les individus de *Balanus balanus* et de *Balanus crenatus* n'ont pas été dénombrés. Ils n'ont d'ailleurs pas été identifiés faute de temps. Cependant, il est nécessaire de mentionner que le volume des fragments de balanes et des balanes complètes représente, à lui seul, 70 à 75 % du volume total par échantillon (500 ml) pour chacune des hauteurs du dépôt.

L'abondance (en %) de chacune des espèces dénombrées et ce pour chacune des hauteurs du falun est présentée à la figure 18. Sur ce diagramme, on remarque qu'*Acirsa borealis* et les *Buccinidae* sont plus abondants dans le haut du falun (125 et 250 cm). Les *Naticidae* et *Puncturella noachina* sont aussi plus abondants dans le haut du dépôt (125 cm). *Boreotrophon clathratus*, *Velutina* sp. et *Testidunalia* cf. *testudinalis* sont, quant à eux, plus abondants dans le bas du falun (500 cm). Un seul individu a cependant été dénombré pour ces trois espèces. L'abondance de *Boreocingula* cf. *castanea* et de *Moelleria costulata* demeure relativement stable à l'exception d'une légère augmentation à 375 cm. L'abondance de *Margarites groenlandicus* augmente à 250 et 375 cm alors que celle de *Littorina saxatilis* diminue à ces profondeurs. Chez les bivalves, on remarque qu'*Astarte* cf. *montagui* est uniquement présent dans le bas du falun (375 et 500 cm). L'abondance de *Musculus* sp. et de *Mya truncata* augmente à 375 cm. L'abondance de *Hiatella arctica* augmente légèrement dans le bas du falun (375 et 500 cm). *Macoma balthica* est surtout présent dans le haut du falun (125 cm). L'abondance de *Mytilus edulis* décroît vers 375 cm. *Chlamys* cf. *islandica* est uniquement présent à 250 cm. Par contre, un seul individu de cette espèce a été inventorié. *Hemithiris psittacea* est uniquement présent dans la partie inférieure du dépôt (500 cm). Les espèces les plus fréquentes dans le falun, mis à

part les balanes (*Balanus balanus* et *Balanus crenatus*), sont les mollusques *Hiatella arctica* et *Mytilus edulis*. Bernatchez et al. (1999) ont fait la même observation. On remarque également que la communauté d'invertébrés marins se diversifie dans la partie la plus inférieure du falun. Une plus grande diversité d'espèces est observable à 500 cm.

Plusieurs particularités du falun 1 de Baie-Comeau font de lui un dépôt naturel holocène unique. Premièrement, plusieurs coquilles adultes sont très bien conservées suggérant un transport et un brassage faible avant et au moment de leur mise en place. Les anneaux de croissance de la plupart des coquilles de *Mytilus edulis* sont bien visibles. La base calcaire de *Balanus* est parfois encore imprégnée sur la coquille d'un autre mollusque. Plusieurs *Balanus* sont complets ou encore attachés à d'autres coquilles et certains *Mytilus edulis* ont leurs deux valves jointes. Les brachiopodes retrouvés ont souvent leur valve supérieure encore attachée à leur valve inférieure, la charnière non brisée. On retrouve fréquemment des Buccinidae encore formés de leur spire, de leur tour terminal et de leur canal siphonal, sans pratiquement aucune cassure. De plus, plusieurs *Boreoncingula cf. castanea* ont une perforation bien circulaire indiquant la prédation par les Naticidae (Figure 16). Deuxièmement, les stades juvéniles sont très bien préservés sur plusieurs espèces de gastéropodes et de bivalves. Chez certains bivalves, la coquille larvaire (prodissoconque) et la coquille sécrétée peu de temps après la métamorphose (dissoconque) sont bien distinguables (Figure 16). Chez certains gastéropodes, sans stade planctotrophe, la coquille larvaire et la démarcation à l'éclosion sont facilement discernables (Figure 16). Troisièmement, tant chez les bivalves que chez les gastéropodes, les micro-mollusques (incluant les stades juvéniles) sont plus abondants et diversifiés que les macro-mollusques. En plus de toutes ces particularités, le falun 1 de Baie-Comeau renferme un bon nombre de perles, fort probablement sécrétées par *Mytilus edulis*, provenant de la mer de Goldthwait. À notre connaissance, jamais de telles perles datant de l'Holocène n'avaient été retrouvées auparavant (Figure 16).

Tableau 2. Taxons identifiés au falun 1 par Bernatchez et al. (1999) ainsi que par Coutu et Bernatchez (2005).

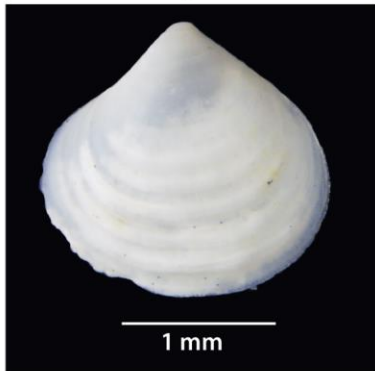
Espèces et classes/embranchements				
Gastéropodes	Bivalves	Cirripèdes	Brachiopodes	Échinidés
<i>Acirsa borealis</i> ^a	<i>Astarte montagui</i>	<i>Balanus balanus</i>	<i>Hemithiris psittacea</i>	<i>Strongylocentrotus droebachiensis</i>
<i>Amauropsis islandica</i>	<i>Chlamys islandica</i>	<i>Balanus crenatus</i>		
<i>Buccinum glaciale</i>	<i>Hiatella arctica</i>			
<i>Buccinum scalariforme</i>	<i>Macoma balthica</i>			
<i>Buccinum undatum</i>	<i>Mya truncata</i>			
<i>Cryptonatica affinis</i>	<i>Mytilus edulis</i>			
<i>Euspira pallida</i>	<i>Serripes</i>			
<i>Littorina saxatilis</i>	<i>groenlandicus</i>			
<i>Margarites</i>	<i>Zirfaea crispata</i>			
<i>groenlandicus</i>				

^aEspèce identifiée par Bernatchez et al. (1999) comme étant
Tachyrhynchus erosum

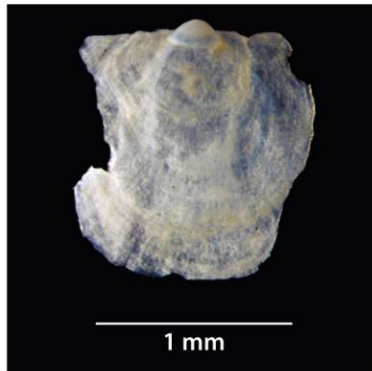
Tableau 3. Taxons composant le falun 1 de Baie-Comeau.

Espèces et classes/embranchements				
Gastéropodes	Bivalves	Cirripèdes	Brachiopodes	Échinidés
<i>Acirsa borealis</i>	<i>Astarte cf. montagui</i>	<i>Balanus balanus</i>	<i>Hemithiris psittacea</i>	<i>Strongylocentrotus droebachiensis</i>
	<i>Chlamys cf. islandica</i>	<i>Balanus crenatus</i>		
<i>Boreocingula cf. castanea</i>	<i>Hiatella arctica</i>			
<i>Boreotrophon clathratus</i>	<i>Macoma balthica</i>			Polychètes
<i>Buccinidae spp.</i>	<i>Musculus sp.</i>			<i>Spirorbis sp.</i>
<i>Littorina saxatilis</i>	<i>Mya truncata</i>			
<i>Margarites groenlandicus</i>	<i>Mytilus edulis</i>			Foraminifères
<i>Moelleria costulata</i>				Espèce non déterminée
<i>Naticidae spp.</i>				
<i>Puncturella noachina</i>				Bryozoaires
<i>Testudinalia cf. testudinalis</i>				Espèce non déterminée
<i>Velutina sp.</i>				

Astarte cf. montagui



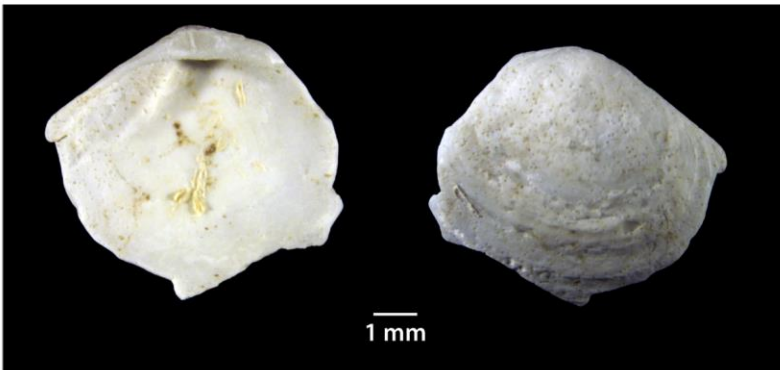
Chlamys cf. islandica



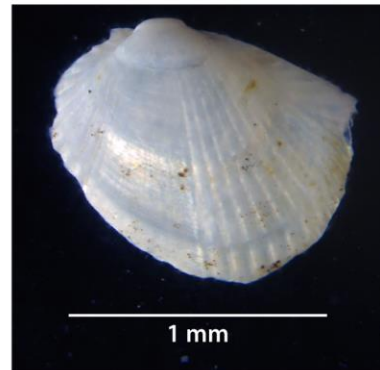
Hiatella arctica



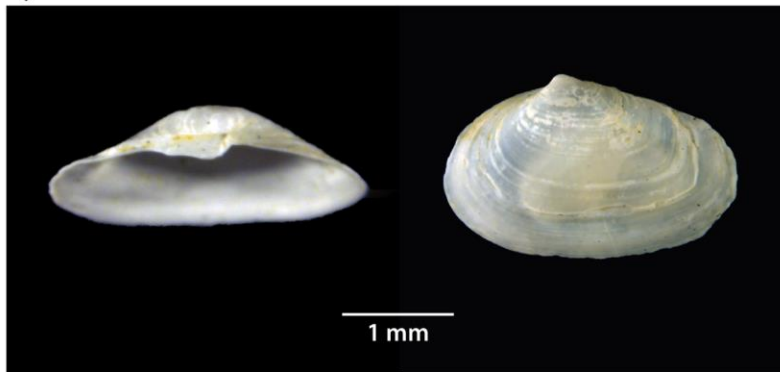
Macoma balthica



Musculus sp.



Mya truncata



Mytilus edulis



Figure 14. Montage de photographies illustrant les différents taxons de bivalves identifiés dans le falun 1 (échantillons de 2012).

Acirsa borealis



Boreocingula cf. castanea



Boreotrophon clathratus



Buccinidae spp.



Littorina saxatilis



Velutina sp.



Margarites groenlandicus



Moelleria costulata



Naticidae sp.



Puncturella noachina



Testudinalia cf testudinalis

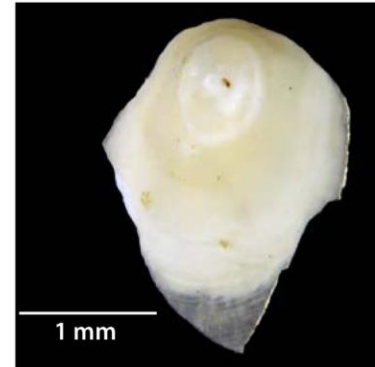


Figure 15. Montage de photographies illustrant les différents taxons de gastéropodes identifiés dans le falun 1 (échantillons de 2012).

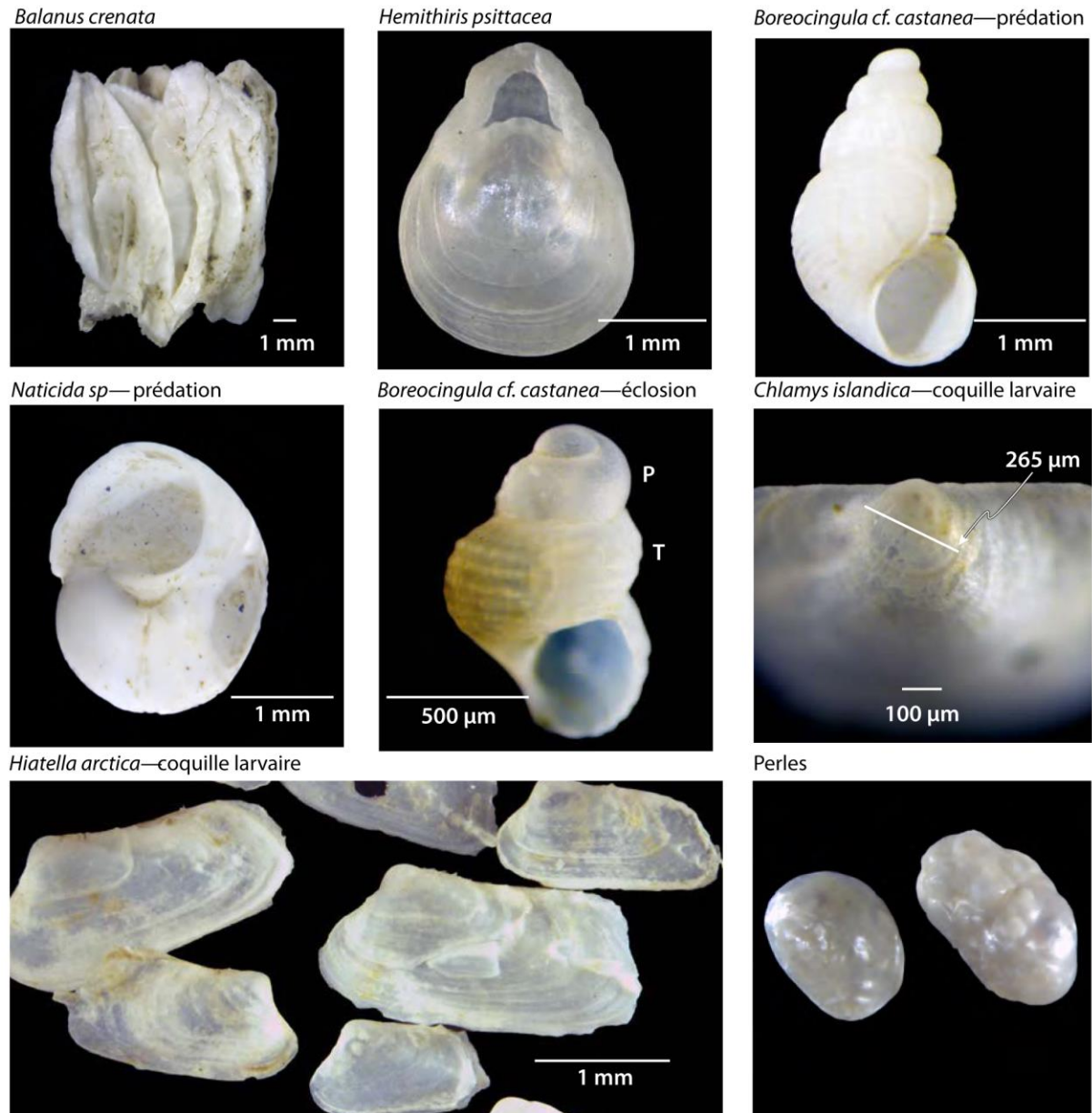


Figure 16. Montage de photographies illustrant les autres espèces retrouvées d'invertébrés marins dans le falun1 et des particularités propres au dépôt.

Amauropsis islandica



Buccinum glaciale



Buccinum undatum



Plicifusus kroeyeri



Cryptonatica affinis



Euspira pallida



Serripes groenlandicus



Zirfaea crispata



Figure 17. Montage de photographies illustrant les Buccinidae et les Naticidae identifiés par Bernatchez et *al.* (1999) ainsi que deux espèces de bivalves uniquement identifiées en 1999.

Tableau 4. Nombre d'individus dénombrés pour chacune des espèces ou familles en fonction de la hauteur d'échantillonnage dans le falun 1 de Baie-Comeau (échantillons de 500 ml).

Espèces/ Familles	Hauteurs d'échantillonnage/Échantillons							
	1.25-1	1.25-2	2.5-1	2.5-2	3.75-1	3.75-2	5.0-1	5.0-2
<i>Acirsa borealis</i>	0	4	7	4	1	3	0	2
<i>Astarte cf. montagui</i>	0	0	0	0	0	1	0	3
<i>Boreocingula cf. castanea</i>	9	9	16	25	41	29	6	12
<i>Boreotrophon clathratus</i>	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Buccinidae spp.</i>	1	5	3	2	1	0	0	3
<i>Chlamys cf. islandica</i>	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Hemithiris psittacea</i>	0	0	0	0	0	0	11	6
<i>Hiatella arctica</i>	560	579	868	868	1226	1511	890	769
<i>Littorina saxatilis</i>	2	4	1	4	3	3	3	6
<i>Macoma balthica</i>	1	2	0	1	1	0	0	0
<i>Margarites groenlandicus</i>	2	1	7	4	8	9	1	2
<i>Moelleria costulata</i>	5	6	13	9	25	18	6	3
<i>Musculus sp.</i>	1	0	0	1	5	5	1	2
<i>Mya truncata</i>	1	2	2	2	11	17	5	7
<i>Mytilus edulis</i>	23	24	48	25	32	31	11	12
<i>Naticidae spp.</i>	12	11	9	19	23	19	12	15
<i>Puncturella noachina</i>	2	1	0	0	0	1	0	2
<i>Testudinalia cf. testudinalis</i>	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Velutina sp.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1
Nombre d'espèces	13		13		14		17	
Nombre total d'individus	1267		1939		3024		1793	

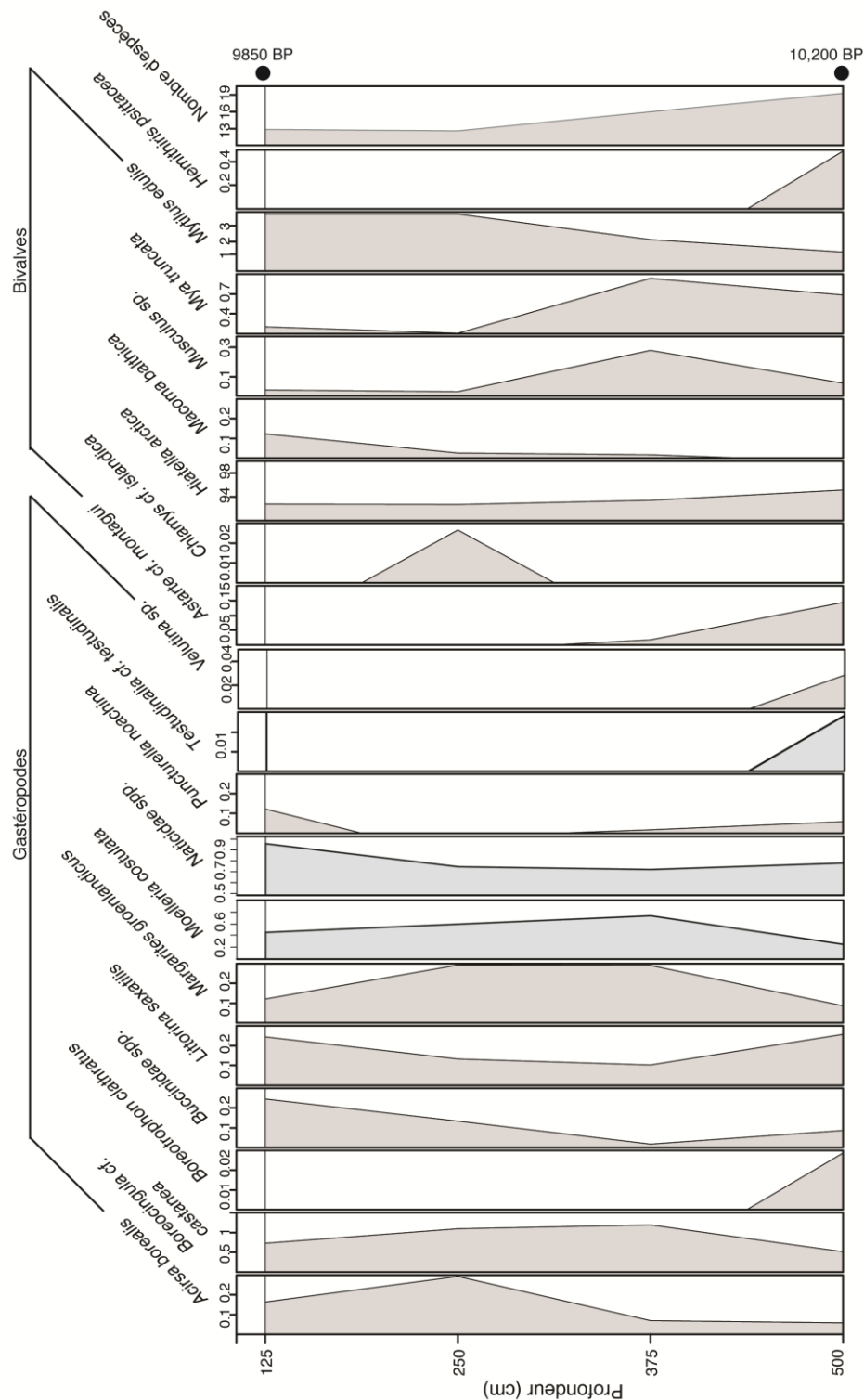


Figure 18. Diagramme représentant l'abondance des espèces ou familles dénombrées en fonction de la profondeur dans le falun 1. L'axe des X, de gauche à droite, illustre la profondeur (cm) dans le dépôt alors que l'axe de Y, de haut en bas, reporte le pourcentage des espèces et le nombre d'espèces présentes.

5.3 Analyses isotopiques et géochimiques des coquilles de *Mytilus edulis* modernes

Étant donné que la coquille de *Mytilus edulis* de la baie de St-Pancrace a été perforée plusieurs fois sur le même anneau de croissance, il est difficile de discerner des tendances saisonnières et annuelles à partir des compositions isotopiques et géochimiques de cette coquille. Les compositions, ne reflétant pas avec précision les conditions environnementales de l'habitat dans lequel la moule de la baie de St-Pancrace a crû, ne sont donc pas présentées dans cette section.

Les compositions isotopiques et géochimiques de la coquille de *Mytilus edulis* de l'Anse à Moreau (M1-A), recueillie en août 2012, sont présentées à la figure 19. Les trois derniers ratios molaires du Ba/Ca, du Mg/Ca et du Sr/Ca, étant abberants, ne sont pas présentés sur cette figure. En effet, ces ratios molaires s'écartent grandement des autres ratios molaires du Ba/Ca, du Mg/Ca et du Sr/Ca. Le $\delta^{18}\text{O}$ de M1-A varie entre -3,22 et 0,14 ‰ avec une moyenne de $-1,42 \pm 0,97$ ‰. Il varie beaucoup le long de l'axe de croissance de la coquille. À la mi-chemin de l'axe (31 mm), l'amplitude saisonnière du $\delta^{18}\text{O}$ s'accroît. Le $\delta^{18}\text{O}$ passe de -0,32 ‰ à -3,22 ‰ (38 mm) et de -3,2 ‰ (40 mm) à 0,14 ‰ (45 mm). Le $\delta^{13}\text{C}$ de M1-A varie entre -1,6 et 0,2 ‰ avec une moyenne de $-0,69 \pm 0,48$ ‰. Il diminue graduellement le long de l'axe de croissance de la coquille. Par contre, à la mi-chemin de l'axe, le $\delta^{13}\text{C}$ diminue rapidement (-0,3 à -1,6 ‰). Il plafonne dans les dix derniers millimètres. Le ratio molaire Ba/Ca de M1-A varie entre 0,013 et 0,032 avec une moyenne de $0,02 \pm 0,005$. Celui-ci demeure relativement stable le long de l'axe de croissance de la coquille. On observe aucune grande augmentation ou diminution de ce ratio. Le ratio molaire Mg/Ca de M1-A varie entre 1,6 et 5,23 avec une moyenne de $3,16 \pm 0,98$. Il augmente graduellement le long de l'axe de croissance de la coquille. Le ratio molaire Mg/Ca augmente rapidement entre 31 (2,88) et 40 mm (5,23). Il diminue ensuite rapidement pour atteindre 2,88 à 44 mm. Le ratio molaire Sr/Ca de M1-A varie entre 1,002 et 1,6 avec une moyenne de $1,24 \pm 0,18$. Il diminue rapidement entre 20 (1,6) et 28 mm (1,002). Le ratio molaire Sr/Ca augmente par la suite graduellement entre 31 (1,08) et 40 mm (1,3).

Les compositions isotopiques et géochimiques de la coquille de *Mytilus edulis* des Battures de Manicouagan (M1-B), recueillie en août 2012, sont présentées à la figure 20. Le $\delta^{18}\text{O}$ de M1-B varie entre -4,12 et -1,33 ‰ avec une moyenne de $-3 \pm 0,93$ ‰. Il varie de façon cyclique le long de l'axe de croissance de la coquille en s'éloignant de l'umbo. L'amplitude entre

les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ d'un sommet à un creux diminue le long de l'axe. Le $\delta^{13}\text{C}$ de M1-B varie entre -1,21 et 0,15 ‰ avec une moyenne de $-0,49 \pm 0,39$ ‰. Ce ratio diminue graduellement le long de l'axe de croissance de la coquille. Par contre, à la mi-chemin de l'axe, le $\delta^{13}\text{C}$ augmente légèrement, passant de -0,4 (24 mm) à 0,15 ‰ (32 mm). Le $\delta^{13}\text{C}$ chute ensuite pour atteindre -0,88 ‰ à 37 mm. Le ratio molaire Ba/Ca de M1-B varie entre 0,02 et 0,34 avec une moyenne de $0,06 \pm 0,09$. Celui-ci varie grandement le long de l'axe de croissance de la coquille. Entre 24 et 25 mm, le ratio molaire Ba/Ca augmente de 0,03 à 0,34. Il chute ensuite rapidement pour atteindre à nouveau 0,03 à 30 mm. Le ratio molaire Ba/Ca augmente encore rapidement pour atteindre 0,28 à 32 mm, puis chute pour atteindre 0,2 à 33 mm. Le ratio molaire Mg/Ca de M1-B varie entre 3,16 et 6,25 avec une moyenne de $4,58 \pm 0,84$. Au début de la croissance de la coquille, le ratio diminue rapidement de 6,25 (17 mm) à 3,16 (25 mm). Il augmente ensuite considérablement jusqu'à 30 mm où il atteint 5,72. Le ratio molaire Mg/Ca diminue à nouveau entre 32 mm (5,7) et 35 mm (3,89). Le ratio molaire Sr/Ca de M1-B varie entre 0,91 et 1,19 avec une moyenne de $1,06 \pm 0,08$. Il est relativement stable le long de l'axe de croissance de la coquille. On observe deux seuils le long de l'axe. Un premier, entre 21 et 25 mm, où le ratio se maintient entre 0,91 et 0,94. Un second, entre 27 et 33 mm, où le ratio se maintient entre 1,1 et 1,16. On observe la formation d'un plateau entre 35 et 46 mm, où le ratio se maintient entre 1,01 et 1,12.

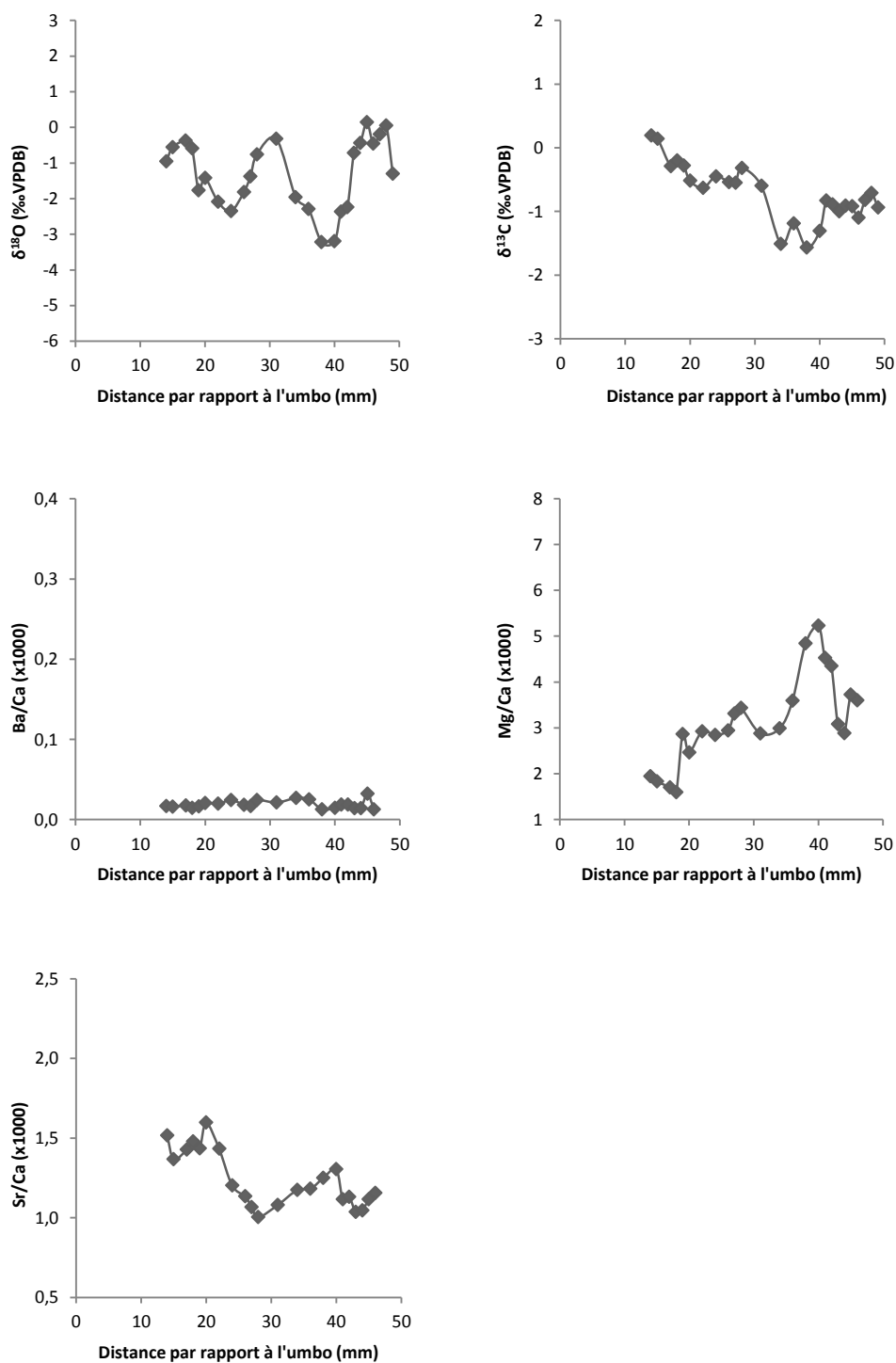


Figure 19. Compositions isotopiques et géochimiques de la coquille moderne M1-A, prélevée en 2012 à l'Anse à Moreau, en fonction de la distance par rapport à l'umbo. Les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ ont une précision de $\pm 0,15$ ‰ alors que les ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca et Sr/Ca ont une précision de 5%.

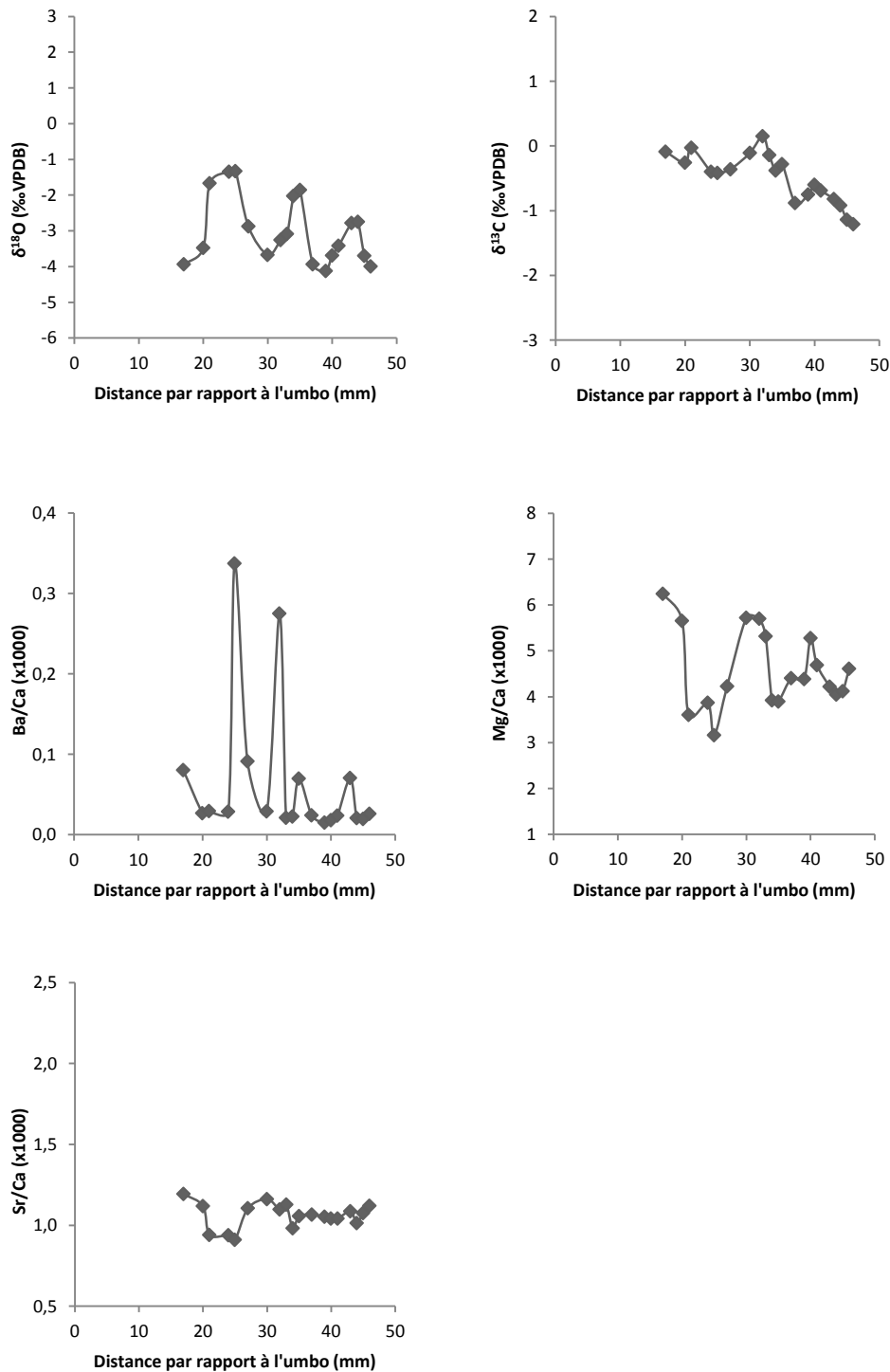


Figure 20. Compositions isotopiques et géochimiques de la coquille moderne M1-B, prélevée en 2012 aux Battures de Manicouagan, en fonction de la distance par rapport à l'umbo. Les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ ont une précision de $\pm 0,15$ ‰ alors que les ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca et Sr/Ca ont une précision de 5%.

5.4 Analyses isotopiques et géochimiques des coquilles de *Mytilus edulis* du falun 1

5.4.1 Hauteur 1,25 m

Les compositions isotopiques et géochimiques de la coquille de *Mytilus edulis* recueillie en août 2012 à 1,25 m de hauteur (M1-1.25) dans le falun 1 sont présentées à la figure 21. Le $\delta^{18}\text{O}$ de M1-1.25 varie entre -2,4 et 1,59 ‰ avec une moyenne de $-0,43 \pm 1,04$. Tout au long de la croissance de la coquille, le $\delta^{18}\text{O}$ varie de façon cyclique et tend à augmenter. Il augmente rapidement entre 11,5 mm (-2,4 ‰) et 21 mm (1,21 ‰). Le $\delta^{18}\text{O}$ chute ensuite pour atteindre -1,57 ‰ à 28 mm. À la fin de la croissance de la coquille, il se stabilise autour de -0,1 et 0,2 ‰. Le $\delta^{13}\text{C}$ de M1-1.25 varie entre -2,07 et 1,32 ‰ avec une moyenne de $-1 \pm 0,73$ ‰. De façon générale, le $\delta^{13}\text{C}$ diminue en suivant l'axe de croissance de la coquille. Il passe rapidement de 1,32 ‰ (2 mm) à -1,65 ‰ (21 mm). Le $\delta^{13}\text{C}$ augmente ensuite légèrement et atteint -0,63 ‰ à la mi-chemin de l'axe de croissance de la coquille. Il diminue à nouveau jusqu'à -2,07 ‰ (33 mm). Le $\delta^{13}\text{C}$ fluctue moins vers la fin de la croissance de la coquille. Le ratio molaire Ba/Ca de M1-1.25 varie entre 0,02 et 0,32 avec une moyenne de $0,05 \pm 0,05$. Au début de la croissance de la coquille, le ratio molaire Ba/Ca demeure relativement stable, entre 0,02 et 0,06. Il augmente drastiquement entre 27 mm (0,03) et 30 mm (0,32). Le ratio molaire diminue ensuite rapidement pour atteindre à nouveau 0,03 à 31 mm. On observe une autre augmentation considérable entre 35 mm (0,04) et 36,5 mm (0,14). Le ratio molaire Mg/Ca de M1-1.25 varie entre 2,4 et 3,75 avec une moyenne de $3,16 \pm 0,32$. Tout comme pour le ratio molaire Ba/Ca, le ratio molaire Mg/Ca demeure relativement stable au début de la croissance de la coquille. À partir de 30 mm (3,75), il diminue graduellement et atteint 2,4 à 42 mm. Il augmente par la suite pour atteindre 3,66 à 45 mm. Le ratio molaire Sr/Ca de M1-1.25 varie entre 1,13 et 1,83 avec une moyenne de $1,25 \pm 0,11$. Ce ratio diminue rapidement au début de la croissance de la coquille, passant de 1,83 (2 mm) à 1,13 (6,5 mm). Vers 10 mm et ce, tout au long de la croissance de la coquille, le ratio molaire Sr/Ca se stabilise autour de 1,14 et 1,33.

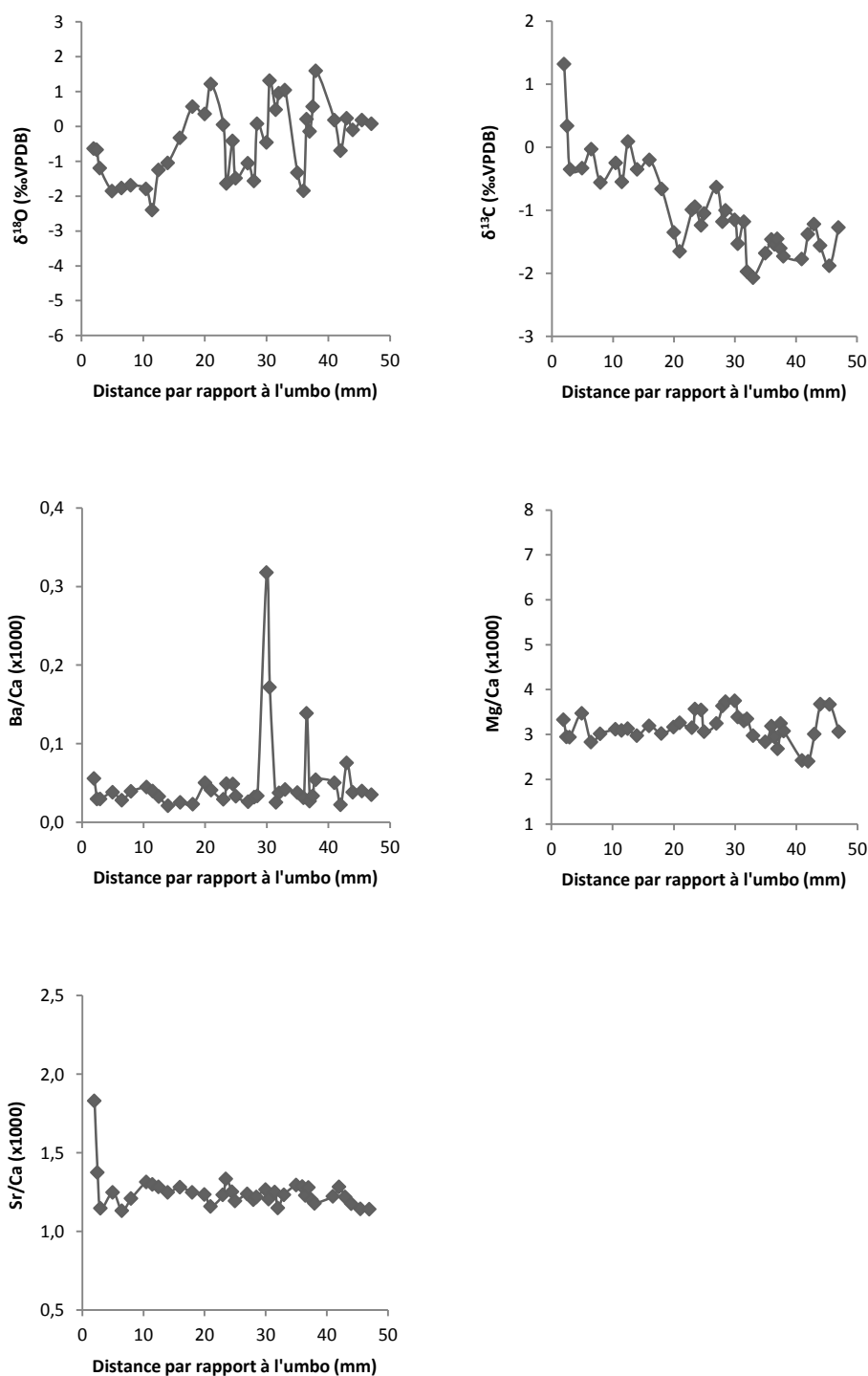


Figure 21. Compositions isotopiques et géochimiques de la coquille M1-1.25, prélevée en 2012 au falun 1, en fonction de la distance par rapport à l'umbo. Les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ ont une précision de $\pm 0,15$ ‰ alors que les ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca et Sr/Ca ont une précision de 5%.

5.4.2 Hauteur 3,75 m

Les compositions isotopiques et géochimiques de la coquille de *Mytilus edulis* recueillie en août 2012 à 3,75 m de hauteur (M1-3.75) dans le falun1 sont présentées à la figure 22. Le $\delta^{18}\text{O}$ de M1-3.75 varie entre -5,09 et 2,28 ‰ avec une moyenne de $-1,56 \pm 1,75$ ‰. Au début de la croissance de la coquille, le $\delta^{18}\text{O}$ augmente rapidement de -3,14 ‰ (10 mm) à 2,28 ‰ (17 mm). Il chute ensuite drastiquement jusqu'à 23 mm où il atteint -5,09 ‰. Le $\delta^{18}\text{O}$ croît à nouveau jusqu'à atteindre 0,91 ‰ à mi-distance avec l'umbo. Il décroît encore une fois rapidement entre 26 mm (0,83 ‰) et 29 mm (3,91 ‰). Le $\delta^{18}\text{O}$ se stabilise à la fin de la croissance de la coquille. Le $\delta^{13}\text{C}$ de M1-3.75 varie entre -1,59 et 0,01 ‰ avec une moyenne de $-0,77 \pm 0,46$ ‰. Au début de la croissance de la coquille (entre 10 et 17 mm), le $\delta^{13}\text{C}$ demeure autour de -0,1 et 0,01 ‰. Il chute ensuite rapidement pour atteindre -1,34 ‰ à 23 mm. Vers la fin de la croissance de la coquille, le $\delta^{13}\text{C}$ augmente graduellement de -1,59 ‰ (31 mm) à -0,47 ‰ (45 mm). Le ratio molaire Ba/Ca de M1-3.75 varie entre 0,01 et 0,35 avec une moyenne de $0,06 \pm 0,08$. Tout au long de la croissance de la coquille, ce ratio varie grandement. Il augmente considérablement entre 13 et 15 mm, où il passe de 0,02 à 0,31. Le ratio molaire Ba/Ca décroît ensuite rapidement et atteint à nouveau 0,02 à 17 mm. Vers la fin de la croissance de la coquille, le ratio molaire augmente encore une fois de façon considérable en passant de 0,02 (35 mm) à 0,35 (37 mm). Le ratio molaire Mg/Ca de M1-3.75 varie entre 3,1 et 7,5 avec une moyenne de $4,83 \pm 0,85$. Tout au long de la croissance de la coquille, ce ratio tend à augmenter. Entre 30 et 39 mm, il augmente de 4,5 à 7,5. Le ratio molaire Mg/Ca se stabilise vers la fin de la croissance de la coquille. Le ratio molaire Sr/Ca de M1-3.75 varie entre 1,06 et 2,27 avec une moyenne de $1,31 \pm 0,33$. Ce ratio varie beaucoup au début de la croissance de la coquille. Le ratio molaire Sr/Ca diminue une première fois de 10 à 13 mm, où il passe de 2,22 à 1,45. Il augmente ensuite jusqu'à 2,23 (14 mm), puis décroît jusqu'à 1,19 (17 mm). À partir de ce point et ce jusqu'à la fin de la croissance de la coquille, le ratio molaire Sr/Ca diminue graduellement.

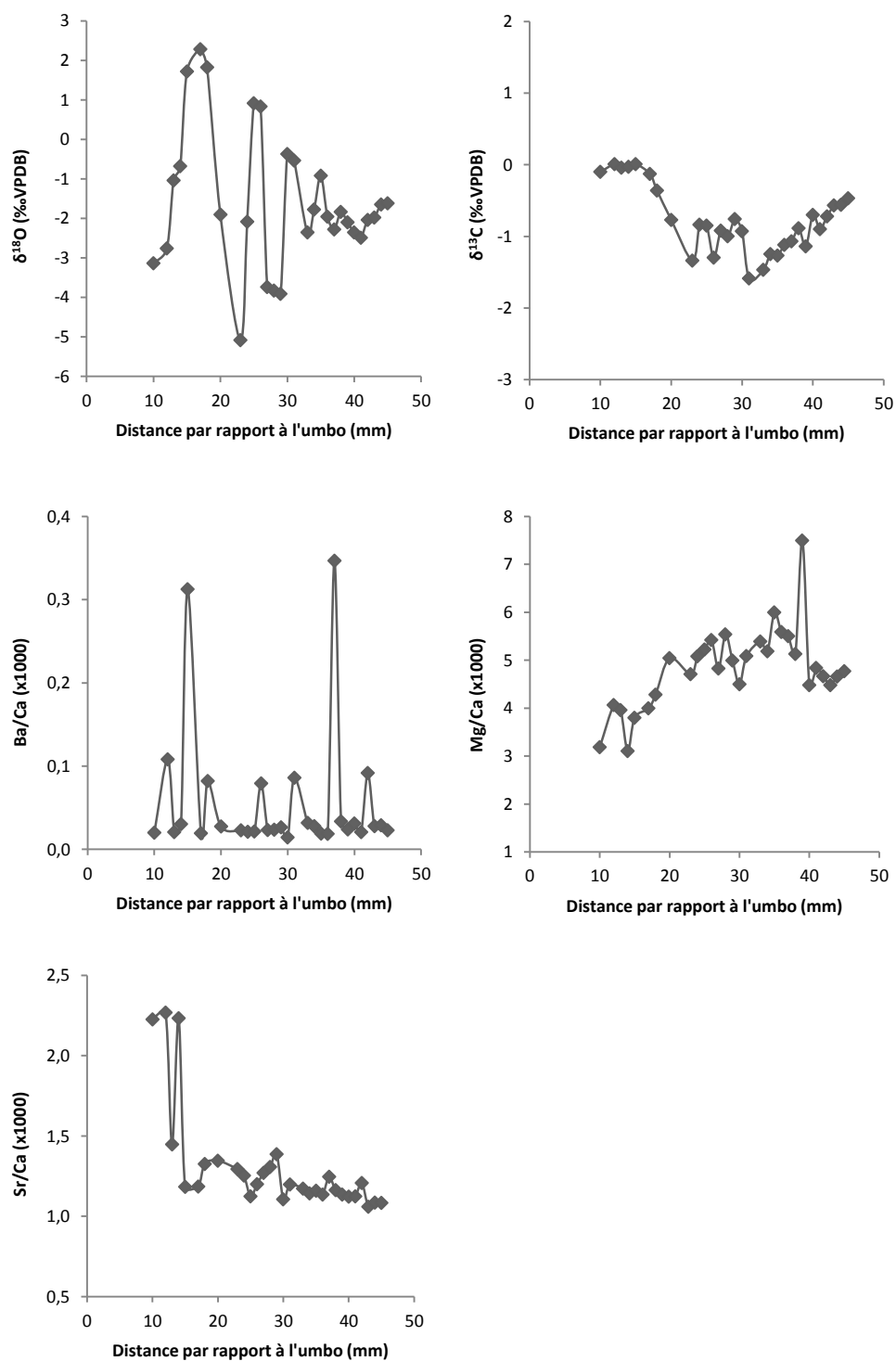


Figure 22. Compositions isotopiques et géochimiques de la coquille M1-3.75, prélevée en 2012 au falun 1, en fonction de la distance par rapport à l'umbo. Les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ ont une précision de $\pm 0,15$ ‰ alors que les ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca et Sr/Ca ont une précision de 5%.

5.4.3 Hauteur 5 m

Les compositions isotopiques et géochimiques de la coquille de *Mytilus edulis* recueillie en août 2012 à 5 m de hauteur (M1-5) dans le falun 1 sont présentées à la figure 23. Le $\delta^{18}\text{O}$ de M1-5 varie entre -3,76 et 0,33 ‰ avec une moyenne de $-1,61 \pm 1$ ‰. Le $\delta^{18}\text{O}$ est relativement stable au début de la croissance de la coquille (entre 2,5 et 12 mm). Entre 17 et 20 mm, il diminue rapidement de -0,82 et -3,76 ‰. Le $\delta^{18}\text{O}$ augmente ensuite rapidement jusqu'à 28 mm où il atteint 0,33 ‰. Il décroît à nouveau jusqu'à 36 mm où il atteint -3,5 ‰. Le ratio augmente graduellement à la fin de la croissance de la coquille. Le $\delta^{13}\text{C}$ de M1-5 varie entre -1,77 et 0,36 ‰ avec une moyenne de $-0,74 \pm 0,59$ ‰. Il tend à diminuer tout au long de la croissance. On observe une décroissance plus soutenue entre 18 mm (-0,15 ‰) et 36 mm (-1,77 ‰). Le ratio molaire Ba/Ca de M1-5 varie entre 0,01 et 0,07 avec une moyenne de $0,03 \pm 0,02$. Ce ratio varie grandement le long de l'axe de croissance de la coquille. Le fait le plus marquant est la présence de quatre plateaux où le ratio molaire Ba/Ca demeure autour de 0,01 et 0,02. Le ratio molaire Mg/Ca de M1-5 varie entre 1,25 et 4,13 avec une moyenne de $2,85 \pm 0,71$. Il tend à augmenter tout au long de la croissance. Le ratio molaire Sr/Ca de M1-5 varie entre 0,96 et 2,27 avec une moyenne de $1,25 \pm 0,33$. Ce ratio diminue rapidement au début de la croissance, passant de 2,27 (3,5 mm) à 1,15 (12 mm). Il se stabilise ensuite et ce jusqu'à la fin de la croissance autour de 0,96 et 1,2.

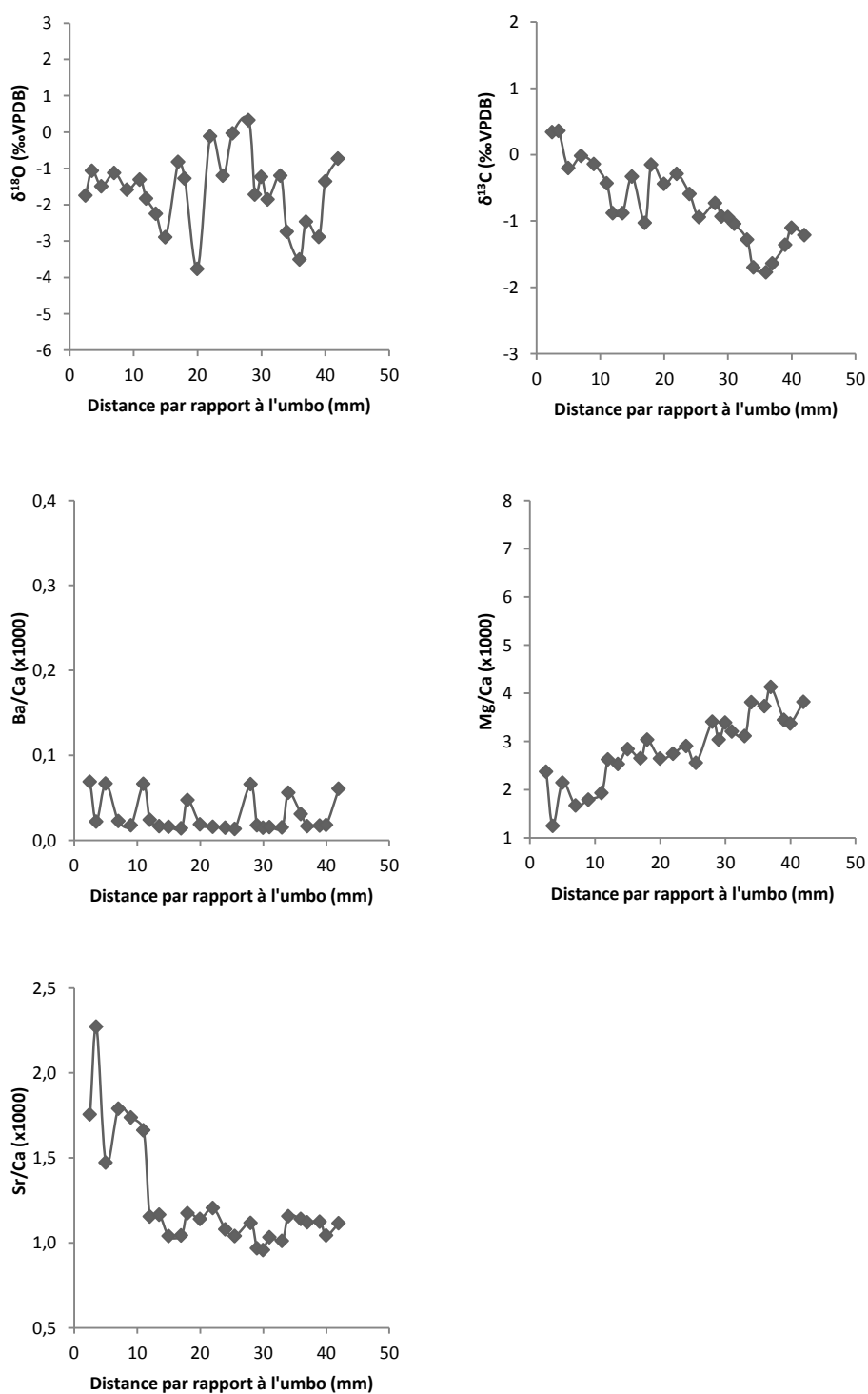


Figure 23. Compositions isotopiques et géochimiques de la coquille M1-5, recueillie en 2012 au falun 1, en fonction de la distance par rapport à l'umbo (mm). Les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ ont une précision de $\pm 0,15$ ‰ alors que les ratios molaires Ba/Ca, Mg/Ca et Sr/Ca ont une précision de 5%.

6. Discussion

6.1 Invertébrés marins du falun 1

La liste d'invertébrés marins du falun que présente cette recherche est plus exhaustive et comporte plus d'espèces que celle dressée par Bernatchez et al. (1999) et par Coutu et Bernatchez (2005). L'identification de plusieurs nouvelles espèces de gastéropodes et des premiers spécimens de *Musculus sp.*, de bryozoaires, de foraminifères et de polychètes confirme l'importance de faire un tamisage fin et un tri du matériel microscopique afin de trouver davantage d'espèces. La présente étude démontre entre autre le très grand nombre de stades juvéniles appartenant à plusieurs espèces de bivalves et de gastéropodes. En effet, on constate que le tamisage de nos échantillons avec les tamis de 1 mm et de 500 μ m a permis d'identifier six nouvelles espèces de gastéropodes.

6.1.1 Analyses multivariées de l'abondance des espèces du falun 1

À partir du logiciel Primer-E V.6, des analyses multivariées ont été menées sur les données brutes d'abondance en espèce (Tableau 4) de chacun des échantillons de 500 ml des horizons du falun 1 (1,25; 2,5; 3,75 et 5 m). L'objectif était de déterminer si la composition de la communauté d'invertébrés marins des différents horizons était la même. Afin de réduire l'importance des valeurs d'abondance les plus élevées et d'augmenter celle des valeurs les plus faibles (Krebs, 1999), les données ont été transformées par la racine carrée ($\sqrt{x}$). Cette transformation permet également d'atténuer l'effet d'ilot lorsqu'une espèce est très abondante dans un échantillon (Krebs, 1999). Afin de déterminer le degré de similarité entre les communautés d'invertébrés marins d'un horizon à l'autre, le coefficient de distance *Bray-Curtis* (Krebs, 1999) qui s'étend de 0 (dissimilaire) à 100 (similaire) a été utilisé.

Une analyse de regroupement hiérarchique (*Cluster Analysis*) a tout d'abord été menée sur les données brutes d'abondance en espèce (Tableau 4) transformées par la racine carrée. Ce genre d'analyse permet de déterminer le degré de ressemblance entre les échantillons d'un même horizon d'échantillonnage (ex.: 1.25-1 et 1.25-2) et le degré de ressemblance entre les échantillons d'un horizon à l'autre. On remarque sur la figure 24 que les deux échantillons les plus semblables sont ceux de l'horizon 1,25 m. Ils sont semblables à 93 %. La deuxième paire d'échantillons la plus semblable est celle de l'horizon 3,75 m. Ces échantillons se ressemblent à 92,5 %. La troisième paire d'échantillons la plus semblable est celle de l'horizon 2,50 m avec

une similarité de 92 %. Les échantillons de l'horizon 5 m sont ceux qui ont le moins grand coefficient de similarité soit 87 %. À partir de l'analyse de regroupement hiérarchique, on peut également constater que la ressemblance des échantillons d'un horizon à l'autre est moins marquée que la ressemblance des échantillons provenant d'un même horizon. En effet, la communauté de l'horizon 1,25 m est similaire à celle de 2,50 m à seulement 85,5 %. La communauté de l'horizon 5 m ressemble aux deux premières à 83,5 %. La communauté de l'horizon 3,75 m coïncide avec la communauté des trois autres horizons à seulement 79 %. En analysant l'ensemble de ces mesures de similarité, on peut conclure que la composition de la communauté d'invertébrés marins de l'horizon 3,75 m s'écarte de celle des horizons supérieurs et de l'horizon inférieur.

Une analyse de positionnement multidimensionnel (*MDS*) a ensuite été menée sur les données brutes d'abondance en espèce (Tableau 4) transformées par la racine carrée ($\sqrt{x}$). Ce type d'analyse permet aussi de déterminer le degré de ressemblance des échantillons au sein d'un même horizon d'échantillonnage et le degré de ressemblance des échantillons d'un horizon à l'autre. À partir de la représentation en 2D des 8 échantillons (Figure 25), quatre groupes distincts émergent et ce, en accord avec l'analyse de regroupement hiérarchique. On peut également dire que cette représentation en 2D des 8 échantillons est fidèle à la réalité en raison de sa faible valeur de stress. La valeur de stress obtenue (0,05), étant plus petite que 0,1, correspond à une bonne représentation des degrés de similarité entre les échantillons avec aucune perspective d'erreur d'interprétation (Clarke et Warwick, 2001). En examinant la représentation bidimensionnelle, on remarque que les distances intragroupes sont plus petites que les distances intergroupes. On peut ainsi affirmer que le degré de ressemblance entre les échantillons d'un même horizon est plus élevé que celui entre les échantillons d'un horizon à l'autre. Ainsi, la composition de la communauté d'invertébrés marins est différente d'un horizon à l'autre au sein du falun 1.

Un test statistique des similarités (*ANOSIM*) a ensuite été réalisé. L'hypothèse formulée pour ce test (H_0), selon laquelle il existe aucune différence dans la composition de la communauté d'invertébrés marins des quatre horizons du falun 1, peut être rejetée. En effet, la valeur R obtenue pour les données brutes d'abondance en espèce transformées par la racine carrée (0,979) nous indique qu'il existe une différence significative dans la composition de la

communauté d'invertébrés marins des quatre horizons du dépôt. De plus, il y a seulement 1 % de chance de se tromper en rejetant l'hypothèse H_0 puisque le niveau de significativité p est de 0,01.

Les analyses multivariées et le test ANOSIM présentés dans cette section confirme que la composition de la communauté d'invertébrés marins varie d'un horizon à l'autre du falun 1 de Baie-Comeau. De plus, la composition de la communauté des horizons 3,75 et 5 m diffère significativement de celle des horizons supérieurs.

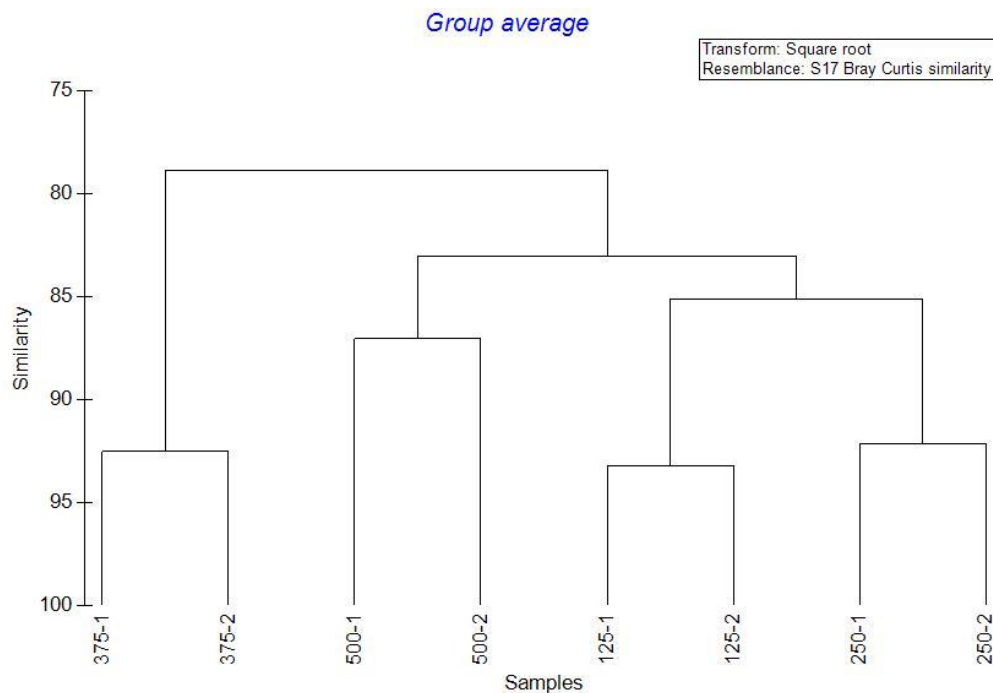


Figure 24. Analyse de regroupement hiérarchique (*Cluster Analysis*) des données brutes d'abondance en espèce de chacun des horizons du falun 1 (transformation ($\sqrt{x}$)).

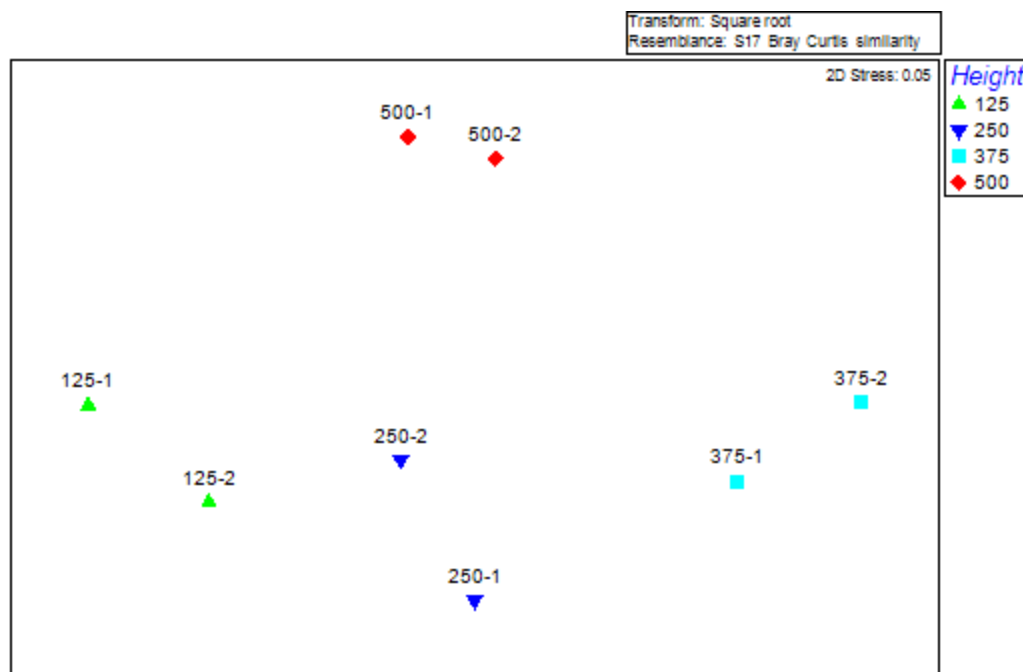


Figure 25. Analyse multivariée de positionnement multidimensionnel (MDS) des données brutes d'abondance en espèce de chacun des horizons du falun 1 (transformation: $(\sqrt{x})$).

6.2 Comparaison des compositions isotopiques et géochimiques des coquilles modernes de *Mytilus edulis* en fonction de l'âge des coquilles

Dans la section qui suit, les compositions isotopiques de même que les compositions géochimiques des coquilles provenant de l'Anse à Moreau (M1-A) et des Battures de Manicouagan (M1-B) sont comparées en fonction de l'âge des coquilles (Figure 26). Étant donné la difficulté à distinguer les cernes annuels les plus éloignés de l'umbo de la coquille M1-A, seules les compositions isotopiques et géochimiques obtenues entre la première et la troisième année et demie de vie de cette coquille sont présentées.

Le $\delta^{18}\text{O}$ de ces deux coquilles varie de façon cyclique jusqu'à trois ans et demi. Ces variations permettent de bien distinguer des saisons. Tel que mentionné précédemment, les meilleures estimations des conditions environnementales sont celles dérivées des compositions isotopiques des premières années de vie de l'animal (Goodwin et al., 2003). Ainsi, les compositions isotopiques entre la première et la deuxième année de croissance de ces deux coquilles devraient nous renseigner le plus sur la variabilité saisonnière. La variabilité saisonnière est plus grande pour M1-B puisque son amplitude isotopique est plus élevée

(2,34 ‰) que celle de M1-A (1,98 ‰). De plus, la composition moyenne $\delta^{18}\text{O}$ de M1-A ($-1,42 \pm 0,97$ ‰) est plus élevée que celle de M1-B ($-3 \pm 0,93$ ‰). La différence entre ces deux compositions moyennes isotopiques est statistiquement significative (Tableau 5, 7). Selon l'équation d'Epstein et al. (1951; 1953), la température de l'eau dans laquelle la coquille de l'Anse à Moreau a crû était légèrement plus froide que celle dans laquelle la coquille des Battures de Manicouagan a crû. Cette affirmation est confirmée par la différence entre la moyenne des températures mensuelles enregistrées par les capteurs à l'Anse à Moreau ($\bar{x} = 4,8 \pm 4,9$ °C) et celle des températures mensuelles enregistrées par les capteurs aux Battures de Manicouagan ($\bar{x} = 5,9 \pm 6,1$ °C) (Figure 11).

Les trois derniers ratios molaires du Ba/Ca, du Mg/Ca et du Sr/Ca de M1-A ne sont pas utilisés pour la comparaison de la géochimie des coquilles modernes puisqu'ils s'écartent grandement des autres ratios molaires. Le ratio molaire Ba/Ca de M1-A varie peu tout au long de sa croissance contrairement à celui de M1-B. Le ratio molaire Ba/Ca augmente à tous les printemps ou étés durant la croissance de M1-B mais de façon plus considérable au cours de l'été, entre la 1^e et la 2^e année de vie, et au cours du printemps, entre la 2^e et la 3^e année. Quant au ratio molaire Mg/Ca, celui de M1-B (4,58) est plus élevé en moyenne que celui de M1-A (3,14). Au début de la 1^e année de vie, l'écart entre le ratio molaire Mg/Ca de M1-A (1,95) et celui de M1-B (6,25) est très prononcé. Cependant, vers la fin de la 1^e année de vie, le ratio molaire Mg/Ca de M1-A augmente considérablement. Il se rapproche de celui de M1-B vers la fin de la 2^e année. Les profils Sr/Ca des deux coquilles modernes se ressemblent davantage que ceux des autres rapports au Ca. La ressemblance entre le ratio molaire moyen Sr/Ca de M1-A (1,24) et celui de M1-B (1,06) illustre ce constat. Entre la 1^e et la 2^e année de vie, le ratio molaire Sr/Ca des deux coquilles varie de façon cyclique mais celui de M1-A est plus élevé. À partir de la 2^e année de vie de M1-A, le ratio molaire Sr/Ca se rapproche de celui de M1-B.

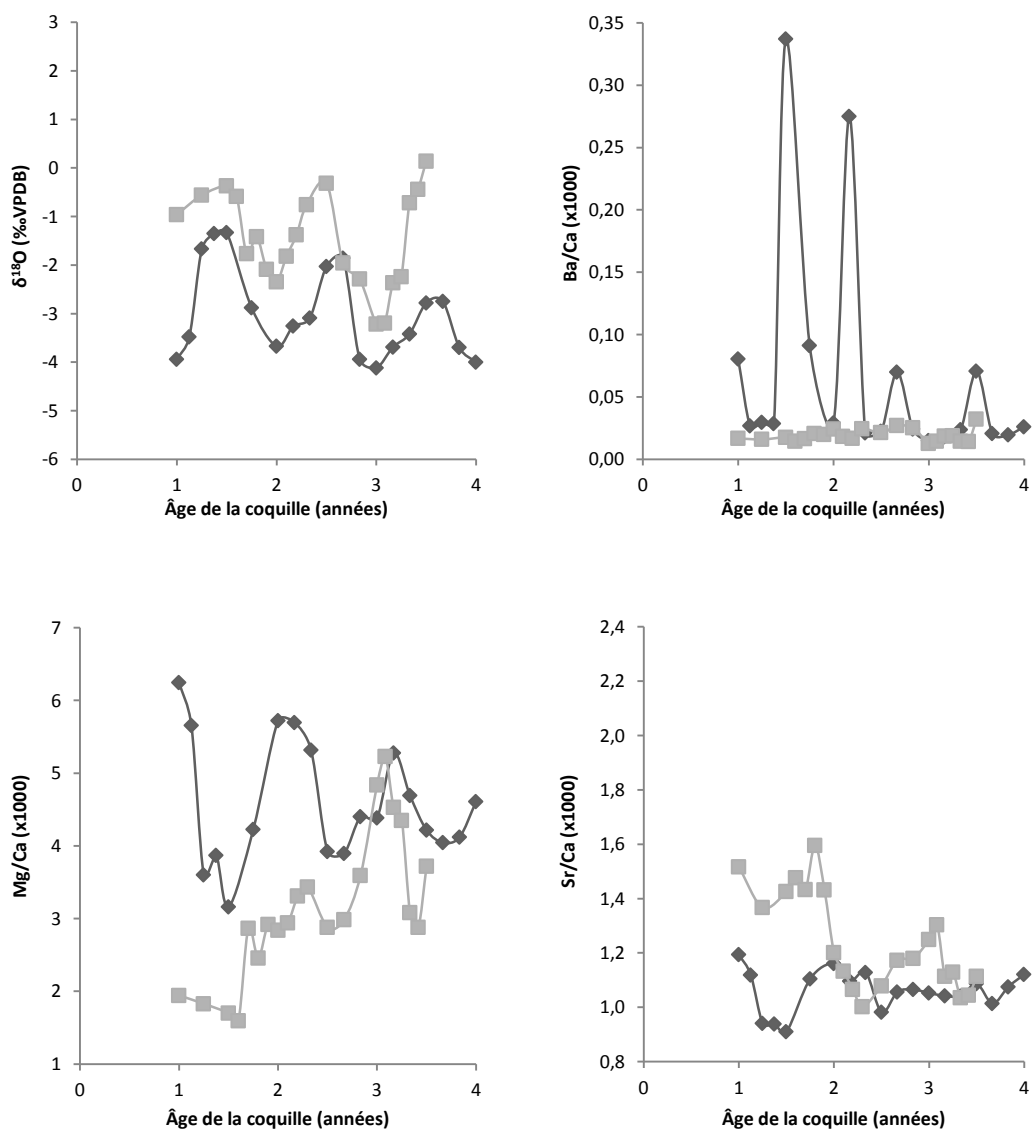


Figure 26. Compositions isotopiques et géochimiques des coquilles modernes en fonction de l'âge des coquilles (années). Les compositions de M1-B sont représentées par les losanges alors que celles de M1-A sont représentées par les carrés.

6.3 Comparaison des compositions isotopiques et géochimiques des coquilles de *Mytilus edulis* du falun 1

Dans la section qui suit, les compositions isotopiques de même que les compositions géochimiques des coquilles prélevées au sein du falun 1 à 1,25; 3,75 et 5 m de hauteur sont comparées en fonction de l'âge des coquilles (Figure 27). Les compositions isotopiques et géochimiques présentées pour les coquilles M1-1.25 et M1-3.75 sont celles obtenues pour leur première année de vie jusqu'à leur troisième année et demie. Les compositions présentées pour la coquille M1-5 sont celles obtenues entre la première année et demie et la quatrième année de vie.

Le $\delta^{18}\text{O}$ des trois coquilles du falun varie de façon cyclique tout au long de leur croissance. Le $\delta^{18}\text{O}$ de M1-3.75 tend à diminuer avec les années alors que le $\delta^{18}\text{O}$ de M1-1.25 tend à augmenter. La composition moyenne en oxygène-18 la plus élevée est celle de la coquille M1-1.25 ($-0,43 \pm 1,04 \text{ ‰}$) alors que la plus faible est celle de M1-5 ($-1,61 \pm 1 \text{ ‰}$). Ces compositions suggèrent une décroissance des valeurs isotopiques du haut du falun (1,25 m) vers sa base (5 m). La différence entre la composition moyenne en oxygène-18 de la coquille de 1,25 m et celles des coquilles de 3,75 et 5 m est très statistiquement significative (Tableau 5, 7). Selon la relation d'Epstein et al. (1951; 1953), la température de l'eau dans laquelle les coquilles M1-3.75 et M1-5 ont crû était en moyenne plus chaude que celle de l'eau dans laquelle la coquille M1-1.25 a crû. La plus grande variabilité saisonnière de la température de l'eau est celle enregistrée par la coquille M1-3.75. Au début de sa croissance, l'amplitude isotopique est de 7,37 ‰.

Le ratio molaire Mg/Ca de M1-3.75 se démarque grandement du ratio des deux autres coquilles. Il augmente fortement tout au long de la vie de cette coquille alors que le ratio de M1-1.25 et de M1-5 demeure plus stable. De plus, le ratio molaire moyen Mg/Ca de M1-3.75 est le plus élevé (4,52). Le ratio molaire moyen de M1-5 est de 2,69 alors qu'il est de 3,22 pour M1-1.25. Selon la relation proposée par Dodd et al. (1965; 1967), l'augmentation du ratio molaire moyen Mg/Ca entre 5 et 3,75 m suggère une diminution de la salinité de l'eau. Cette augmentation peut aussi indiquer une augmentation de la température selon la relation observée par Klein et al. (1996a). Le ratio molaire Ba/Ca varie beaucoup en début de croissance chez M1-3.75 alors qu'il varie beaucoup en fin de croissance chez M1-1.25. Quant au profil du ratio molaire Sr/Ca des trois coquilles, celui-ci est presque identique vers la deuxième année de

croissance. Cependant, les profils de M1-3.75 et de M1-5 s'écartent de celui de M1-1.25 en début de croissance. Le ratio molaire Sr/Ca de M1-3.75 varie beaucoup, passant de 2,22 (1 an) à 1,19 (1 an et demi). Le ratio molaire Sr/Ca de M1-5 varie lui aussi entre la 1^e année et demie (1,79) et la 2^e année de vie (1,04). Ces fluctuations du ratio molaire Sr/Ca suggèrent une variation possible de la salinité de l'eau au début de la croissance de ces deux coquilles selon Eisma et al. (1976) ainsi que Putten et al. (2000).

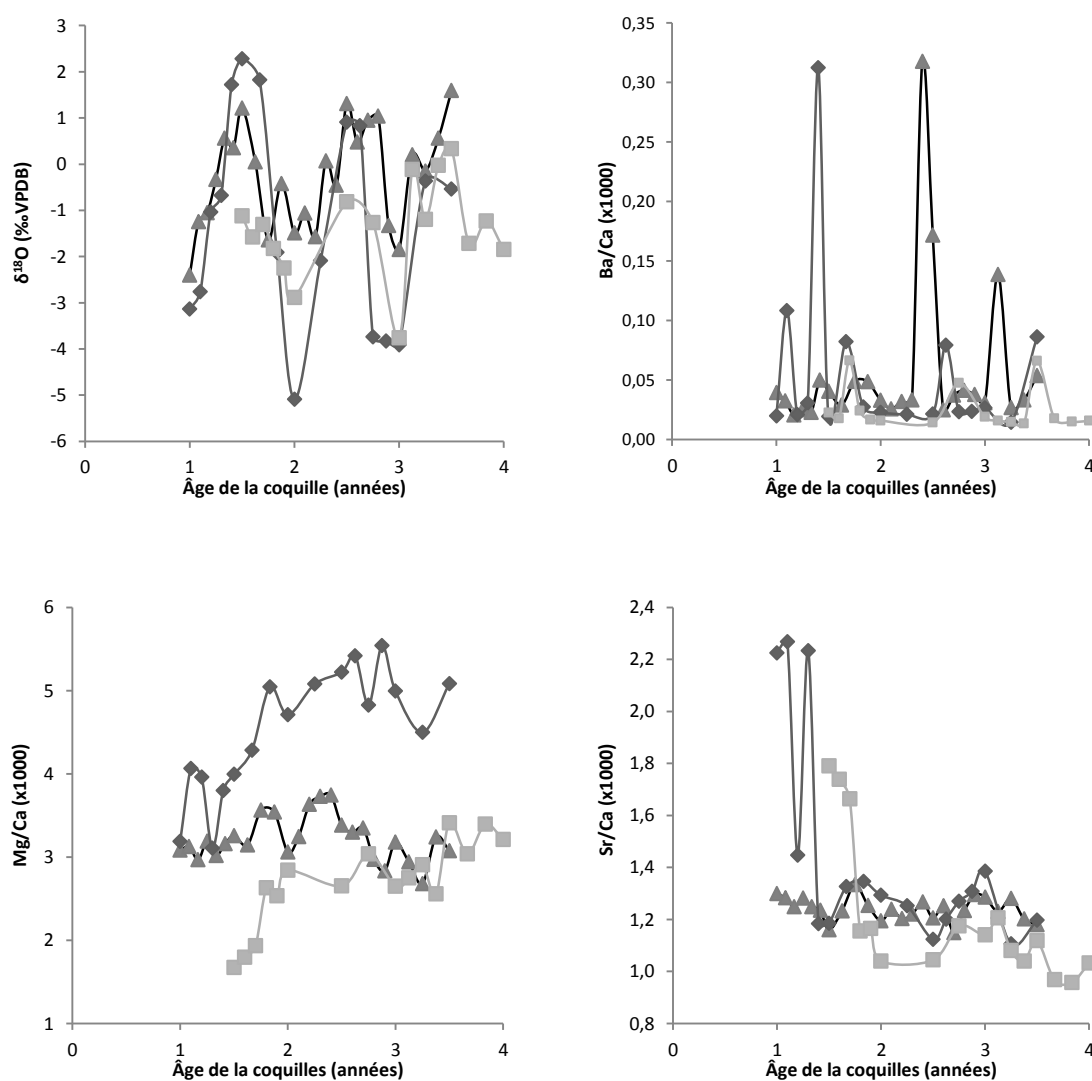


Figure 27. Compositions isotopiques et géochimiques des coquilles du falun 1 en fonction de l'âge des coquilles (années). Les compositions de M1-1.25 sont représentées par les triangles, celles de M1-3.75 par les losanges et celles de M1-5 par les carrés.

6.4 Comparaison entre les compositions isotopiques et géochimiques des coquilles de *Mytilus edulis* modernes et celles du falun 1

Dans la section qui suit, les compositions isotopiques et géochimiques des coquilles de *Mytilus edulis* modernes sont comparées à celles du falun 1 en fonction de l'âge des coquilles (Figure 28). On remarque tout d'abord que la composition moyenne en oxygène-18 est plus faible pour les coquilles modernes (M1-A = $-1,42 \pm 0,97$ ‰; M1-B = $-3 \pm 0,93$ ‰) que pour les coquilles du dépôt (M1-1.25 = $-0,43 \pm 1,04$ ‰; M1-3.75 = $-1,56 \pm 1,75$ ‰; M1-5 = $-1,61 \pm 1$ ‰). La composition moyenne en oxygène-18 des coquilles du falun est environ 1,23 ‰ plus élevée que celle des coquilles de l'estuaire maritime du Saint-Laurent moderne. Selon la relation d'Epstein et al. (1951-1953), cette différence isotopique suggère une température 6 °C plus froide de l'eau dans laquelle les coquilles du falun ont crû que celle de l'estuaire maritime du Saint-Laurent moderne. L'amplitude isotopique en début de croissance des coquilles du falun est plus élevée (3,93 ‰) que celle des coquilles modernes (2,16 ‰) ce qui suggère que la variabilité saisonnière de la température de l'eau, il y a environ 10 ka BP, était plus grande que celle que l'on observe aujourd'hui dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent. En comparant les profils isotopiques des 5 coquilles, on peut avancer que les hivers étaient plus froids et les étés plus chauds vers la fin de la déposition du falun (~9-10 ka BP) que ceux d'aujourd'hui.

Le ratio molaire moyen Ba/Ca des coquilles du falun (0,05) est similaire à celui des coquilles modernes (0,04). Tout au long de la croissance, le ratio molaire Ba/Ca des coquilles du falun varie de façon cyclique tout comme le ratio molaire de M1-B. C'est toutefois le profil de M1-3.75 qui coïncide le plus avec celui de M1-B. Le ratio molaire moyen Mg/Ca des coquilles du dépôt (3,48) ressemble aussi à celui des coquilles modernes (3,86). Le ratio molaire de M1-3.75 et de M1-5 varie moins d'une année à l'autre que celui des coquilles modernes. Il augmente plutôt de façon soutenu avec l'âge des coquilles. Selon Dodd (1965; 1967), cette tendance suggère une salinité différente de l'eau dans laquelle les coquilles de la partie inférieure du falun ont crû. Le ratio molaire moyen Sr/Ca des coquilles du falun (1,25) ressemble également à celui des coquilles des Battures de Manicouagan et de l'Anse à Moreau (1,15). Tout comme le ratio des coquilles modernes, le ratio molaire de M1-3.75 et de M1-5 varie grandement entre la 1^e et la 2^e année de vie. Celui-ci est cependant plus élevé que le ratio molaire de M1-A et de M1-B. Selon la relation positive décrite par Eisma et al. (1976) ainsi que par Putten et al. (2000) entre la salinité de l'eau et le ratio molaire Sr/Ca des coquilles de *Mytilus edulis*, la

salinité de l'eau au début de la déposition du falun était possiblement plus élevée que celle de l'estuaire maritime du Saint-Laurent moderne.

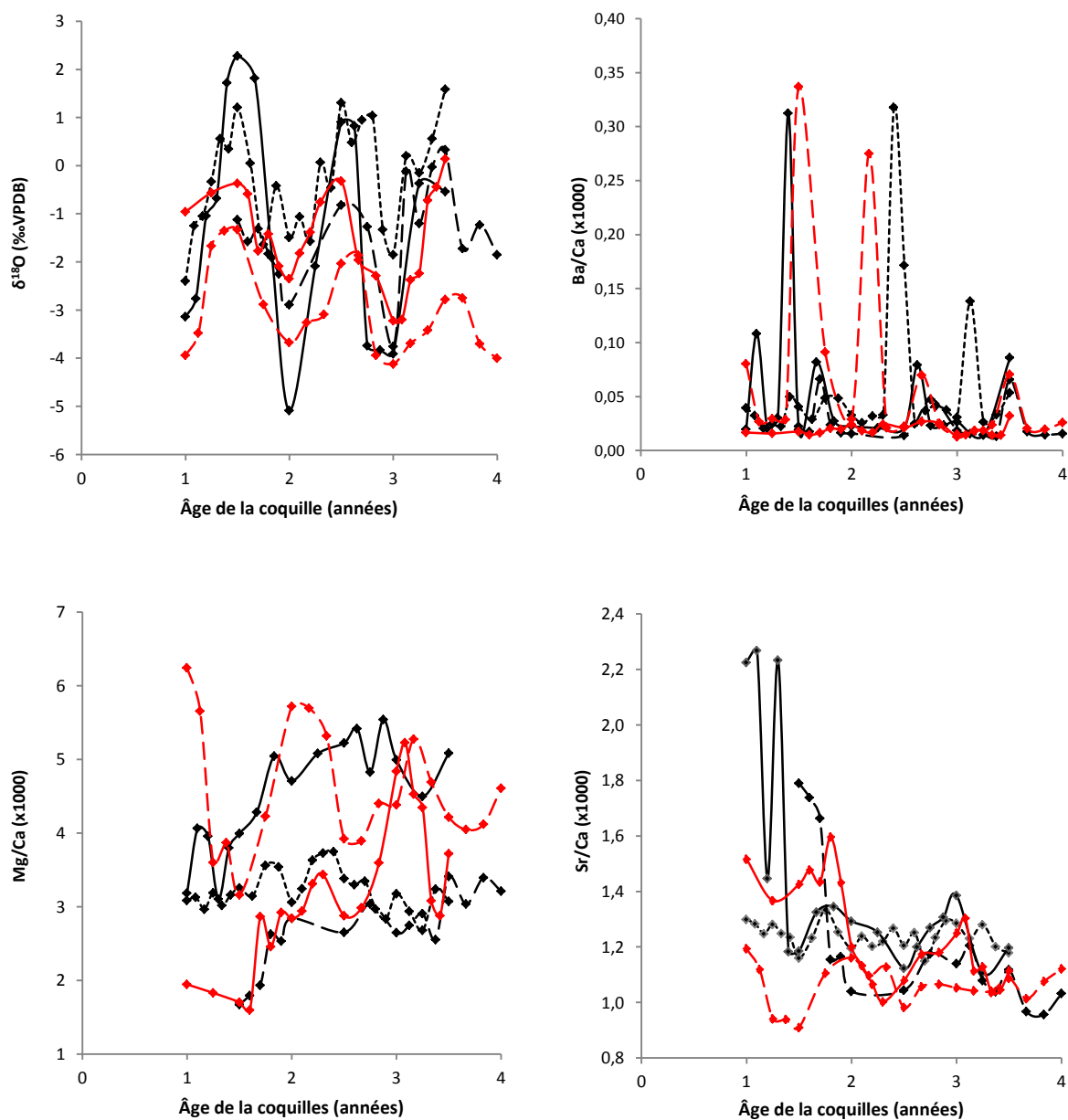


Figure 28. Comparaison des compositions isotopiques et géochimiques des cinq coquilles. La courbe pleine en rouge est celle de M1-A; la courbe hachurée en rouge est celle de M1-B; la courbe pointillée en noir est celle de M1-1.25; la courbe pleine en noir est celle de M1-3.75 et la courbe hachurée en noir est celle de M1-5.

La plus grande variabilité saisonnière des températures de l'eau de la mer de Goldthwait par rapport à celle des températures de l'eau de l'estuaire maritime du Saint-Laurent actuel pourrait résulter d'un changement dans l'obliquité de l'axe terrestre. L'obliquité de l'axe terrestre varie entre 24,5 et 22,1° (Figure 29; NASA, 2014). Lorsque celui-ci est à son maximum, les deux hémisphères de la terre reçoivent un maximum de radiation solaire en été et un minimum de radiation en hiver. La différence entre les températures de l'hiver et de l'été est alors plus grande. Selon les données climatiques de NOAA (2014), l'angle de la terre était de 24,2° vers 10 ka BP (âge du falun 1 de Baie-Comeau) alors qu'elle est de 23,45° aujourd'hui (Figure 29). Étant près de son maximum, l'obliquité de l'axe terrestre au début de l'Holocène contribuait à augmenter la radiation solaire durant l'été.

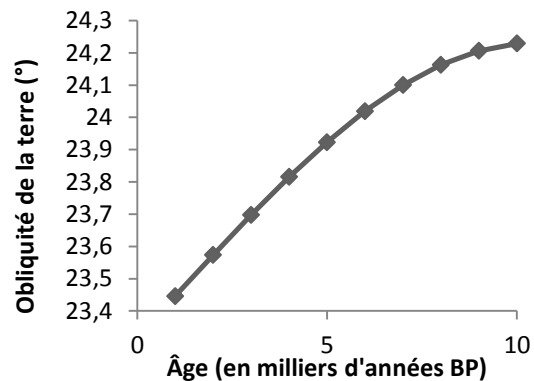
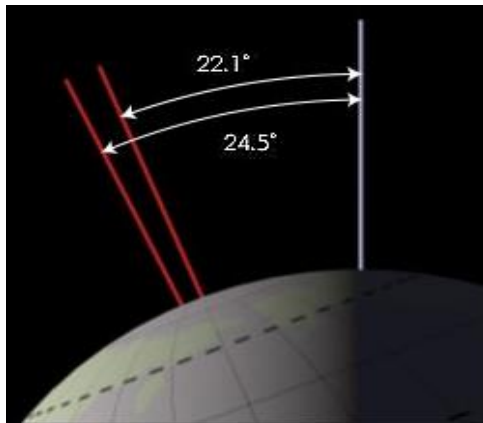


Figure 29. Variation dans l'obliquité de l'axe terrestre en fonction de l'âge (image: NASA, 2014; données: NOAA, 2014).

6.5 Comparaison entre les compositions isotopiques moyennes ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) des coquilles du falun 1 et celles des faunes fossiles des mers post-glaciaires

Dans la section qui suit, les compositions isotopiques moyennes ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) des coquilles de *Mytilus edulis* du falun 1 sont comparées aux compositions isotopiques moyennes des faunes fossiles des mers post-glaciaires analysées par Hillaire-Marcel en 1977. On observe à la Figure 30 que les compositions isotopiques moyennes ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) des coquilles du falun 1, et même celles des coquilles de l'estuaire maritime du Saint-Laurent actuel, semblent avoir une certaine similitude avec les compositions isotopiques moyennes ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) des faunes fossiles de la mer de Goldthwait (Figure 30). En réalisant des tests *t*, on constate que les compositions isotopiques moyennes ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) des coquilles du falun s'éloignent en réalité des compositions isotopiques moyennes ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) de la mer de Goldthwait (différence statistiquement significative entre les compositions isotopiques moyennes des coquilles du falun et celles de la mer, Tableau 5, 6, 7). L'écart des compositions isotopiques moyennes peut être expliqué par le fait que seules des coquilles de *Mytilus edulis* ont été analysées pour cette recherche alors que plusieurs autres espèces ont été analysées par Hillaire-Marcel (1977) telles *Hiatella arctica*, *Macoma balthica*, *Macoma calcaria*, *Mya truncata* et *Chlamys islandica*. En effet, il existe des écarts de fractionnement isotopiques entre certaines espèces de bivalves (Hillaire-Marcel, 1977). Les compositions isotopiques moyennes ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) des coquilles du falun 1 semblent se rapprocher des compositions isotopiques moyennes ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) des faunes fossiles de la mer de Champlain (Figure 30). Il existe cependant une différence statistiquement significative entre les compositions moyennes $\delta^{18}\text{O}$ des coquilles du falun 1 (M1-1.25; M1-3.75 et M1-5) avec celles des faunes fossiles de la mer de Champlain (Tableau 5, 7).

Les comparaisons faites entre les compositions isotopiques moyennes suggèrent que les invertébrés marins du falun 1 de Baie-Comeau ont vécu dans un environnement marin différent de ceux des mers de Goldthwait et de Champlain. La vallée de la rivière aux Anglais était possiblement un bras de mer, légèrement fermé et peu profond, de la mer de Goldthwait, tel que suggéré par la cartographie de l'extension de cette-ci (Figure 1).

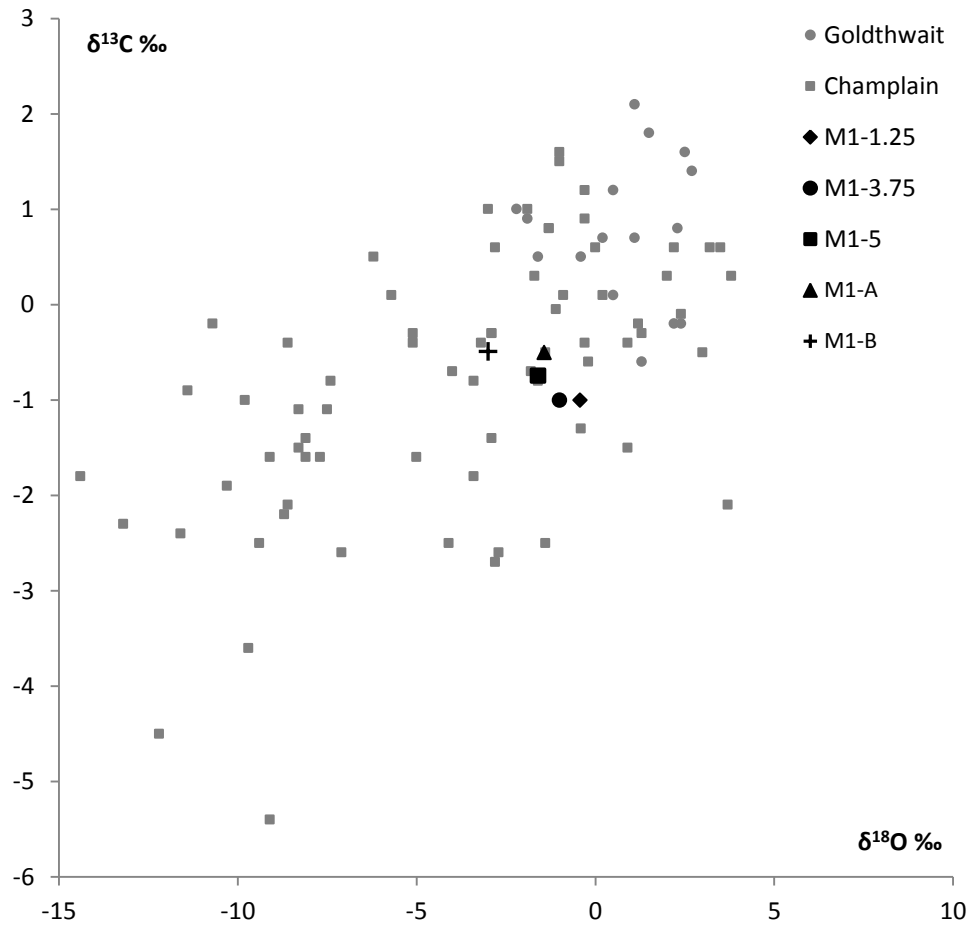


Figure 30. Comparaison entre les compositions isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) de la mer de Goldthwait, de la mer de Champlain et les compositions isotopiques moyennes ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) des coquilles du falun 1, de l'Anse à Moreau ainsi que des Battures de Manicouagan (données des mers tirées d'Hillaire-Marcel, 1977).

Tableau 5. Valeurs moyennes $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ de chacune des coquilles de *Mytilus edulis* analysées et celles des mers de Goldthwait et de Champlain (valeurs des mers tirées d'Hillaire-Marcel, 1977).

Coquille ou mer	N	$\bar{x} (\sigma) \delta^{18}\text{O}$	$\bar{x} (\sigma) \delta^{13}\text{C}$
M1-1.25	38	-0,43 (1,04)	-1 (0,73)
M1-3.75	30	-1,56 (1,75)	-0,77 (0,46)
M1-5	26	-1,61 (1)	-0,74 (0,59)
M1-A	22	-1,42 (0,97)	-0,69 (0,48)
M1-B	19	-3 (0,93)	-0,49 (0,39)
Mer de Goldthwait	16	0,76 (1,6)	0,77 (0,45)
Mer de Champlain	^{13}C (71) ; ^{18}O (72)	-3,82 (4,6)	-0,83 (1,36)

Tableau 6. Résultats des tests *t* comparant les compositions moyennes $\delta^{13}\text{C}$ des coquilles du falun, des coquilles de l'estuaire maritime du Saint-Laurent moderne et des faunes fossiles des mers post-glaciaires (les valeurs en gras représentent des différences très significatives).

Échantillons	M1-1.25	M1.3.75	M1-5	M1-A	M1-B	Mer de Goldthwait	Mer de Champlain
M1-1.25		t=1,5071 p=0,1366	t=1,5162 p=0,1345	t=1,7602 p=0,0837	t=2,8500 p=0,0061	t=8,0799 p=0,0001	t=0,7252 p=0,4699
M1-3.75	t=1,5071 p=0,1366		t=1,5162 p=0,1345	t=1,7602 p=0,0837	t=2,8500 p=0,0061	t=8,0799 p=0,0001	t=0,7252 p=0,4699
M1-5	t=1,5162 p=0,1345	t=0,2134 p=0,8318		t=0,2903 p=0,7729	t=1,6079 p=0,1152	t=7,2503 p=0,0001	t=0,3154 p=0,7531
M1-A	t=1,7602 p=0,0837	t=0,5715 p=0,5702	t=0,2903 p=0,7729		t=1,4808 p=0,1467	t=7,3137 p=0,0001	t=0,4469 p=0,6560
M1-B	t=2,8500 p=0,0061	t=2,1814 p=0,0342	t=1,6079 p=0,1152	t=1,4808 p=0,1467		t=6,3652 p=0,0001	t=1,0591; p=0,2925
Mer de Goldthwait	t=8,0799 p=0,0001	t=8,5759 p=0,0001	t=7,2503 p=0,0001	t=7,3137 p=0,0001	t=6,3652 p=0,0001		t=4,5116 p=0,0001
Mer de Champlain	t=0,7252 p=0,4699	t=0,2246 p=0,8227	t=0,3154 p=0,7531	t=0,4469 p=0,6560	t=1,0591 p=0,2925	t=4,5116 p=0,0001	

Tableau 7. Résultats des tests t comparant les compositions moyennes $\delta^{18}\text{O}$ des coquilles du falun, des coquilles de l'estuaire maritime du Saint-Laurent moderne et des faunes fossiles des mers post-glaciaires (les valeurs en gras représentent des différences significatives).

Échantillons	M1-1.25	M1.3.75	M1-5	M1-A	M1-B	Mer de Goldthwait	Mer de Champlain
M1-1.25		t=3,3168 p=0,0015	t=4,5259 p=0,0001	t=3,6271 p=0,0006	t=9,1020 p=0,0001	t=3,2654 p=0,0019	t=4,4851 p=0,0001
M1-3.75	t=3,3168 p=0,0015		t=0,1286 p=0,8982	t=0,3487 p=0,7288	t=3,2952 p=0,0019	t=4,4205 p=0,0001	t=2,6146 p=0,0103
M1-5	t=4,5259 p=0,0001	t=0,1286 p=0,8982		t=0,6774 p=0,5015	t=4,7243 p=0,0001	t=5,9321 p=0,0001	t=2,4283 p=0,0170
M1-A	t=3,6271 p=0,0006	t=0,3487 p=0,7288	t=0,6774 p=0,5015		t=5,3028 p=0,0001	t=5,2225 p=0,0001	t=2,4329 p=0,0169
M1-B	t=9,1020 p=0,0001	t=3,2952 p=0,0019	t=4,7243 p=0,0001	t=5,3028 p=0,0001		t=8,6827 p=0,0001	t=0,7754 p=0,4402
Mer de Goldthwait	t=3,2654 p=0,0019	t=4,4205 p=0,0001	t=5,9321 p=0,0001	t=5,2225 p=0,0001	t=8,6827 p=0,0001		t=3,9265 p=0,0002
Mer de Champlain	t=4,4851 p=0,0001	t=2,6146 p=0,0103	t=2,4283 p=0,0170	t=2,4329 p=0,0169	t=0,7754 p=0,4402	t=3,9265 p=0,0002	

6.6 Reconstructions paléo-environnementales à partir des invertébrés marins et des compositions isotopiques du falun 1

La diversité des espèces identifiées au falun 1 de Baie-Comeau suggère un milieu de vie bien oxygéné avec une haute productivité planctonique (phytoplancton, détritus, bactéries) favorable aux invertébrés marins filtreurs. L'amélioration climatique qui a suivi le Dryas récent (saison estivale plus longue et chaude) a sans doute favorisé la productivité biologique des espèces subarctiques et boréales (Bernatchez et al., 1999). Ce réchauffement climatique post Dryas a été démontré à partir de kystes de dinoflagellés (de Vernal et al., 1996). Malgré ce réchauffement climatique par rapport à la période précédente, les eaux de la mer de Goldthwait devaient être assez froides et salées puisque la plupart des espèces retrouvées dans le falun préfèrent ces conditions. L'abondance dans le dépôt de *Hiattella arctica*, espèce vivant dans des eaux de salinité supérieure à 20 ‰ (Hillaire-Marcel, 1980), confirme que l'eau de la mer devait être assez salée. Les compositions isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ des coquilles de *Mytilus edulis* échantillonnées au falun suggèrent aussi que ces espèces ont vécu dans un environnement marin froid. Par ailleurs, ces compositions isotopiques en comparaison avec celles des coquilles prélevées dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent moderne, proposent une température moyenne annuelle de l'eau plus froide (environ 6 °C) dans la mer de Goldthwait. L'ensemble des espèces identifiées propose aussi un milieu marin peu profond. L'environnement marin devait notamment être stable puisque les espèces observées ne sont pas caractéristiques de milieux où les eaux sont turbulentes et exposées aux fortes vagues. En effet, les espèces identifiées au falun ont tous un mode de vie nécessitant un environnement marin relativement calme (Tableau 8).

La grande diversité des espèces que l'on observe à 5 m (17 espèces; Figure 17) de profondeur dans le dépôt suggère que la partie la plus inférieure du dépôt a été déposée lors de la phase pléni-marine de la mer de Goldthwait. Hillaire-Marcel (1980) a établi, à partir des assemblages fossiles de la région de Sept-Îles, que durant la phase pléni-marine de la mer de Goldthwait la faune était abondante et variée. La dominance de *Hiattella arctica* (Figure 17) dans l'ensemble du falun suggère que la communauté du même nom primait dans la mer de Goldthwait tout au long de la déposition. Cette communauté type a aussi été identifiée par Bernatchez et al. (1999). L'abondance de *Mytilus edulis* et des balanes dans l'ensemble du dépôt confirme que ces espèces devaient constituer la sous-communauté supérieure. La biodiversité faunistique et l'abondance en certaines espèces diminuent dans les horizons supérieurs du dépôt.

À 3,75 m de profondeur, on compte 14 espèces différentes (Figure 17), comprenant des mollusques et un brachiopode. *Boreocingula cf. costulata*, *Margarites groenlandicus* et *Moelleria costulata* sont plus abondants à cet horizon. L'abondance des Buccinidae et des *Acirsa borealis* augmente dans le haut du falun (1,25 et 2,5 m; Figure 17) alors que l'abondance des Naticidae augmente dans la partie sommitale (1,25 m; Figure 17) du falun. Ces changements suggèrent que la phase d'exondation de la mer de Goldthwait était commencée lors de la déposition de la partie supérieure du dépôt. Hillaire-Marcel (1980) a démontré que lors de cette phase la faune était moins variée que durant la phase pléni-marine. Bien que la communauté à *Hiatella arctica* devait toujours être présente au moment de la déposition de la partie supérieure du dépôt, une communauté à gastéropodes a dû s'installer, tel que suggéré par les espèces retrouvées à 1,25 m et 3 m de profondeur. L'absence de *Portlandia arctica* dans le dépôt propose, quant à elle, que la fonte de l'Inlandsis laurentidien était déjà bien entamée lors de la formation de celui-ci dans la mer de Goldthwait. Cette espèce, préférant une eau froide ne dépassant 0 °C, est habituellement retrouvée au front des glaciers dans l'argile grise et meuble (Hillaire-Marcel, 1980). Elle est la première espèce à coloniser les bassins après le retrait des glaciers (Hillaire-Marcel, 1980). L'Inlandsis laurentidien en retrait devait ainsi se situer en amont du falun 1. Le taux de sédimentation devait donc être faible.

Plusieurs caractéristiques biophysiques (sédimentologie et taphonomie) propres au falun 1 permettent d'interpréter les conditions environnementales lors de sa formation. La présence de plusieurs individus complets (faible degré de fragmentation) et de balanes encore fixées sur un substrat, la granulométrie relativement uniforme et l'absence de matrice grossière dans le falun 1 suggèrent que l'agent de transport devait être faible et le régime hydrologique plutôt régulier (Bernatchez et al., 1999). Le fort degré d'articulation des coquilles de *Mytilus edulis*, d'*Astarte montagui* et d'*Hemithyris psittacea* propose que le temps de résidence de ces individus dans le fond marin a été écourté (Bernatchez et al., 1999). D'après Schäfer (1972), la désarticulation des bivalves et des brachiopodes se fait rapidement dans un environnement marin bien oxygéné. Selon Henderson et Frey (1986), la présence de plusieurs coquilles articulées dans un dépôt indique aussi la proximité du site de vie des spécimens. L'absence de sédiments dans les valves de *Mytilus edulis* et de *Hiatella arctica* vient rajouter à l'idée que les invertébrés marins ont été enfouis rapidement dans leur biotope ou transportés vivants (Bernatchez et al., 1999). L'analyse statistique sur l'orientation et la position des valves de *Mytilus edulis* du falun 1 et 2 effectuée

par Bernatchez et al. (1999) montre une orientation diversifiée et une dominance des valves avec le côté concave vers le bas dans le falun 1. La diversité des orientations des valves de *Mytilus edulis* indique une mise en place de ces individus dans des eaux peu profondes où les vagues étaient dominées par des courants oscillatoires (Bernatchez et al., 1999). La dominance des valves de *Mytilus edulis* avec le côté concave vers le bas suggère que le dépôt a été mis en place dans des chenaux de marée (Bernatchez et al., 1999).

Selon Bernatchez et al. (1999), un estran englacé pendant une certaine période de l'année et des hivers très rigoureux, successifs auraient contribué à décimer les invertébrés marins de Baie-Comeau. Cependant, la taille importante de certains individus (spécimens adultes) retrouvés dans le falun 1 suggère que ces hivers rigoureux devaient être assez espacés ce qui aurait permis à ces individus d'atteindre un développement optimal avant de mourir (Bernatchez et al., 1999).

Après la formation des dépôts coquilliers de Baie-Comeau et suite à un léger réchauffement de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, des espèces boréales-tempérées ont colonisé les eaux peu profondes de l'estuaire maritime, incluant le secteur de Baie-Comeau. Ces espèces ne sont donc pas été retrouvées dans les faluns de Baie-Comeau incluant le falun 1. En effet, les bivalves *Mactromeris polynyma*, *Ensis directus*, *Mesodesma arctatum* et *Cyrtodaria siliqua* y sont absents de même qu les gastéropodes *Lacuna vincta*, *Littorina littorea* et *Euspira heros*.

Tableau 8. Mode de vie des espèces identifiées dans le falun 1 de Baie-Comeau.

Épibenthique libre	Épibenthique fixé	Endobenthique
<i>Acirsa borealis</i>	<i>Balanus balanus</i>	<i>Astarte montagui</i>
<i>Boreocingula cf. castanea</i>	<i>Balanus crenatus</i>	<i>Macoma balthica</i>
<i>Boreotrophon clathratus</i>	<i>Chlamys cf. islandica</i>	<i>Mya truncata</i>
<i>Buccinidae spp.</i>	<i>Hemithiris psittacea</i>	
<i>Littorina saxatilis</i>	<i>Hiatella arctica</i>	
<i>Margarites groenlandicus</i>	<i>Musculus sp.</i>	
<i>Moelleria costulata</i>	<i>Mytilus edulis</i>	
<i>Naticidae spp.</i>		
<i>Puncturella noachina</i>		
<i>Testudinalia cf. testudinalis</i>		
<i>Velutina sp.</i>		

Conclusion

À ce jour, aucun dépôt coquillier aussi grand et aussi riche en coquilles bien préservées que le falun 1 de Baie-Comeau n'a été répertorié au Canada. Les conditions environnementales de l'habitat dans lequel ces invertébrés ont vécu, tant la température que la salinité de l'eau de la mer de Goldthwait, n'étaient pas connues jusqu'à aujourd'hui. Une étude détaillée des espèces marines composant le dépôt ainsi que des analyses isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) et géochimiques (Mg/Ca, Sr/Ca et Ba/Ca) effectuées sur des coquilles adultes de *Mytilus edulis* ont permis de préciser ces conditions.

La liste d'invertébrés marins que dresse cette recherche est plus exhaustive que celle établie par Bernatchez et al. (1999) et Bernatchez et Coutu (2005). Le tri et le tamisage fin de tous les individus, tant microscopiques que macroscopiques, ont permis d'identifier de nouvelles espèces d'invertébrés marins qui n'avaient pas été observées auparavant dans le falun (ainsi que les autres faluns retrouvés dans la vallée de la rivière aux Anglais). Les espèces subarctiques et boréales identifiées au falun 1 sont toutes présentes dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent moderne. Elles peuvent aussi être regroupées en une seule communauté type, la communauté à *Hiatella arctica*. Celle-ci suggère que les invertébrés marins du dépôt ont vécu dans un milieu marin assez stable, froid, peu profond et de salinité supérieure à 20 ‰.

Les données d'abondance en espèce ont démontré que la composition de la communauté d'invertébrés marins n'était pas la même d'un horizon à l'autre du falun. La grande diversité de la faune de la partie la plus inférieure du dépôt suggère que celle-ci aurait été déposée durant la phase pléni-marine de la mer de Goldthwait. Les couches supérieures du dépôt, moins diversifiées, auraient, quant à elles, été déposées au début de la phase d'exondation de cette mer. L'amélioration climatique qui a suivi le Dryas récent a sans doute favorisé la productivité biologique des espèces subarctiques et boréales.

Les compositions $\delta^{18}\text{O}$ des coquilles de *Mytilus edulis* échantillonnées au dépôt, en comparaison avec celles des coquilles de *Mytilus edulis* prélevées dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent moderne, ont démontré que la température moyenne annuelle de l'eau dans la mer de Goldthwait devait être environ 6 °C plus froide qu'aujourd'hui. Ces compositions ont également permis d'établir que la variabilité saisonnière de la température de l'eau, il y a ~10 ka BP, était plus grande que celle observée aujourd'hui dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent.

Les comparaisons faites entre les compositions isotopiques moyennes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) des coquilles de *Mytilus edulis* du falun et celles établies pour les mers de Goldthwait et de Champlain suggèrent que les invertébrés marins du falun 1 de Baie-Comeau ont vécu dans un environnement marin différent de ceux des mers de Goldthwait et de Champlain. La vallée de la rivière aux Anglais était possiblement un bras de mer, légèrement fermé et peu profond, de la mer de Goldthwait.

Les caractéristiques biophysiques propres au falun proposent que les invertébrés marins du falun n'ont pas résidé longtemps dans le fond marin et qu'ils ont été déposé près de leur biotope. Elles suggèrent aussi que le falun a été mis en place dans un milieu littoral peu profond de type ria où les courants de marée et les vagues dominaient. Finalement, un estran englacé pendant une certaine période de l'année et des hivers très rigoureux, mais espacés, auraient contribué à décimer les invertébrés marins de Baie-Comeau (Bernatchez et al., 1999).

Bibliographie

- Abbott, R.T. (1974). *American Seashells: The Marine Mollusca of the Atlantic and Pacific Coasts of North America*. 2nd ed. New York, United States: Van Nostrand Reinhold Compagny. 663 p.
- Albertzart, L.S., & Wilkinson, B.H. (1990). Barrier Backbeach Shell Assemblages from the Central Texas Gulf Coast. *Palaios*, 5 (4), 346-355.
- Aliotta, S., & Farinati, E. (1990). Stratigraphy of Holocene sand-shell ridges in the Bahia Blanca Estuary, Argentina. *Marine Geology*, 94, 353-360.
- Banerjee, I., & Kidwell, S.M. (1991). Significance of molluscan shell beds in sequence stratigraphy : An example from the Lower Cretaceous Mannville Group of Canada. *Sedimentology*, 38, 913-934.
- Bédard, P., Hillaire-Marcel, C., & Pagé, P. (1981). ^{18}O modelling of freshwater inputs in Baffin Bay and Canadian Arctic coastal waters. *Nature*, 293, 287-289.
- Bernatchez, P., Dubois, J.M.M., & Dionne J.C. (1999) Les dépôts coquilliers (faluns) holocènes de Baie-Comeau, Côte-Nord de l'estuaire du Saint-Laurent, Québec. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 36, 519-531.
- Bourget, E. (1997). Chapitre IV: Les aspects taxonomiques. Dans Communications Science-Impact. (Eds.), *Les animaux littoraux du Saint-Laurent: Guide d'identification*. Québec, Canada: Les Presses de l'Université Laval, p. 28-85.
- Chave, K.E. (1954). Aspects of the Biogeochemistry of Magnesium 1. Calcareous Marine Organisms. *Journal of Geology*. 62 (3), 266-283.
- Clarke, K.R., & Warwick, R.M. (2001). *Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation*. 2nd ed. Plymouth, United Kingdom: Primer-E Ltd. 172 p.
- Coutu, M., & Bernatchez, P. (2005). Cahier d'identification des invertébrés fossiles présents dans les dépôts coquilliers de la vallée de la rivière aux Anglais. Université du Québec à Rimouski. 1-40.
- Craig, A.K., & Psuty, N.P. (1971). Paleoecology of Shell Mounds at Otuma, Peru. *American Geographical Society*. 61 (1), 125-132.
- Culleton, B.J., Kennett, D.J., Ingram, B.L., Erlandson, J.M., & Southon, J.R. (2006). Intrashell Radiocarbon Variability in Marine Mollusks. *Radiocarbon*. 48 (3), 387-400.

- de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., & Bilodeau, G. (1996). Reduced meltwater outflow from the Laurentide ice margin during the Younger Dryas. *Nature*. 388, 774-777.
- Dionne, J.C. (1977). La mer de Goldthwait au Québec. *Cahier de géographie du Québec*. 31 (1-2), 61-80.
- Dionne, J.C. (1972). La dénomination des mers du postglaciaire au Québec. *Cahier de géographie du Québec*. 16 (39), 483-487.
- Dodd, J.R. (1967). Magnesium and Strontium in Calcareous Skeletons: A review. *Journal of Paleontology*. 41 (6), 1313-1329.
- Dodd, J.R. (1965). Environmental control of strontium and magnesium in *Mytilus*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 29, 385-398.
- Dubois, J.M. (1977). La déglaciation de la Côte Nord du Saint-Laurent: analyse sommaire. *Géographie physique et Quaternaire*. 31 (3-4), 229-246.
- Dyke, A.S., & Prest, V.K. (1987). Late Wisconsinan and Holocene History of the Laurentide Ice Sheet. *Géographie physique et Quaternaire*. 41 (2), 237-263.
- Eisma, D., Mook, W.G., & Das, H.A. (1976). Shell Characteristics, Isotopic Composition and Trace-Element Contents of Some Euryhaline Molluscs as Indicators of Salinity. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 19, 39-62.
- Elson, J.A. (1969). Late Quaternary marine submergence of Quebec. *Revue de Géographie de Montréal*. 23 (3), 247-258.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H., & Urey, H.C. (1951). Carbonate-Water Isotopic Temperature Scale. *Geological society of America*. 62, 417-426.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H.A., & Urey, H.C (1953). Revised Carbonate-Water Isotopic Temperature Scale. *Geological society of America*. 64, 1315-1326.
- Environnement Canada, Gouvernement du Canada. (2014). *Normales climatiques canadiennes*. http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/index_f.html. (Site consulté le 29 septembre 2014).
- Fairchild, I.J., & Baker, A. (2012). *Speleothem Science: From Process to Past Environments*. 1st ed. Oxford, United Kingdom: Wiley-Blackwell. 416 p.
- Friedman, I., & O'Neil, J.R. (1977). Compilation of Stable Isotope Fractionation Factors of Geochemical Interest. *Data of geochemistry*. 1-12.

- Gentry, D.K., Sosdian, S., Grossman, E.L., Rosenthal, Y., Hicks, D., & Lear, C.H. (2008). Stable Isotope and Sr/Ca Profiles from the Marine Gastropod *Conus Ermineus*: Testing a Multiproxy Approach for Inferring Paleotemperature and Paleosalinity. *Palaaios*. 23, 195-209.
- Gibbons, G.S. (1967). Shell Content in Quartzose Beach and Dune Sands, Dee Why, New South Wales. *Journal of Sedimentary Petrology*. 37 (3), 869-878.
- Goodwin, D.H., Schöne, B.R., & Dettman, D.L. (2003). Resolution and Fidelity of Oxygen Isotopes as Paleotemperature Proxies in Bivalve Mollusk Shells: Models and Observations. *Palaaios*. 18, 110-125.
- Greensmith, J.T., & Tucker, E.V. (1969). The Origin of Holocene Shell Deposits in the Chenier Plain Facies of Essex (Great Britain). *Marine Geology*. 7, 403-425.
- Harrington, R.J. (1989). Aspects of Growth Deceleration in Bivalves: Clues to Understanding the Seasonal $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ Record - A Comment on Krantz et al. (1987) *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 70, 399-407.
- Henderson, S.W., & Frey, R.W. (1986). Taphonomic Redistribution of Mollusk Shells in a Tidal Inlet Channel, Sapelo Island, Georgia. *Society for Sedimentary Geology*. 1 (1), 3-16.
- Hillaire-Marcel, C. (1980). Les faunes des mers post-glaciaires du Québec : Quelques considérations paléocéologiques. *Géographie physique et Quaternaire*. 34 (1), 3-59.
- Hillaire-Marcel, C. (1981). Paléo-océanographie isotopique des mers post-glaciaires du Québec. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 35, 63-119.
- Hillaire-Marcel, C. (1977). Les isotopes du carbone et de l'oxygène dans les mers post-glaciaires du Québec. *Géographie physique et Quaternaire*. 31 (1-2), 81-106.
- Israelson, C., Buchardt, B., Funder, S., Hubberten, H.W. (1994). Oxygen and carbon isotope composition of Quaternary Bivalve shells as a water mass indicator: Last interglacial and Holocene, East Greenland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 111 (1-2), 119-134.
- Jones, D.S. (1983). Sclerochronology: Reading the Record of the Molluscan Shell: Annual growth increments in the shells of bivalve molluscs record marine climatic changes and reveal surprising longevity. *American Scientist*. 71 (4), 384-391.
- Kidwell, S.M. (1989). Stratigraphic Condensation of Marine Transgressive Records: Origin of Major Shell Deposits in the Miocene of Maryland. *The Journal of Geology*. 97 (1), 1-24.

- Kidwell, S.M. (1988). Taphonomic Comparison of Passive and Active Continental Margins: Neogene Shell Beds of the Atlantic Coastal Plain and Northern Gulf of California. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 63, 201-223.
- Killingley, J. (1981). Seasonality of Mollusk Collecting Determined from O-18 Profiles of Midden Shells. *American Antiquity*. 48 (1):152-158.
- Klein, R.T., Lohmann, K.C., & Thayer, C.W. (1996a). Bivalve skeletons record sea-surface temperature and $\delta^{18}\text{O}$ via Mg/Ca and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios. *Geology*. 24, 415-418.
- Klein, R.T., Lohmann, K.C., & Thayer, C.W. (1996b) Sr/Ca and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in skeletal calcite of *Mytilus trossulus*: Covariation with metabolic rate, salinity, and carbon isotopic composition of seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 60 (21), 4207-4221.
- Krantz, D.E., Williams, D.F., & Jones, D.S. (1987). Ecological and Paleoenvironmental Information Using Stable Isotope Profiles from Living and Fossil Molluscs. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 58, 249-266.
- Krebs, C.J. (1999). Chapter 12 Similarity Coefficients and Cluster Analysis. Dans Cumming, B. (Ed.), *Ecological methodology*. 2nd ed. Menlo Park, California, United States: Addison-Wesley Longman, Inc. p. 486-527.
- Kreisa, R.D. (1981). Storm-generated sedimentary structures in subtidal marine facies with examples from the Middle and Upper Ordovician of southwestern Virginia. *Journal of Sedimentary Petrology*. 51 (3), 823-848.
- Kreisa, R.D., & Bambach, R.K. (1982). Einsele, G. & Seilacher, A. (Eds.) *Cyclic and Event Stratification*. 1st ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Kulp, J.L., Turekian, K.K., & Boyd, D.W. (1952). Sr content of limestones and fossils. *Geological society of america bulletin*. 63, 701-716.
- Lauriol, B., Cabana, Y., Cinq Mars, J., Geurts, M.A., & Grimm, F.W. (2002). Cliff-top eolian deposits and associated molluscan assemblages as indicators of Late Pleistocene and Holocene environments in Beringia. *Quaternary International*. 87, 59-79.
- Lauriol, B., Gray, J.T., Héту, B., & Cyr, André. (1970). Le cadre chronologique et paléogéographique de l'évolution marine depuis la déglaciation dans la région d'Aupaluk, Nouveau-Québec. *Géographie physique et Quaternaire*. 33 (2), 189-203.
- Lorens, R.B., & Bender, M.L. (1980). The impact of solution chemistry on *Mytilus edulis* calcite and aragonite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 44, 1265-1278.

- Lubinsky, I. (1980). *Marine bivalve molluscs of the Canadian Central and Eastern Arctic: Faunal composition and zoogeography*. Issue 207. Ottawa, Canada: Department of Fisheries and Oceans. 111 p.
- Macpherson, E. (1971). *The Marine Molluscs of Arctic Canada: Prosobranch, Gastropods, Chitons and Scaphopods*. Issue 3. Ottawa, Canada: National Museums of Canada. 149 p.
- Mathieu, C., & Lozet, J. (2011). Tec D. (Eds.) *Dictionnaire encyclopédique de science du sol*. Paris, France: Lavoisier, p. 221.
- Meldahl, K.H. (1993). Geographic gradients in the formation of shell concentrations: Plio-Pleistocene marine deposits, Gulf of California. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 101, 1-25.
- Meldahl, K.H., & Cutler, A.H. (1992). Neotectonics and Taphonomy: Pleistocene Molluscan Shell Accumulations in the Northern Gulf of California. *Palaios*. 7, 187-197.
- Moore, H.B. (1958). *Marine Ecology*, Wiley, New York, United States. 493 p.
- Mouchi, V., de Rafélis, M., Lartaud, F., Fialin, M., & Verrecchia, E. (2013). Chemical labelling of oyster shells used for time-calibrated high-resolution Mg/Ca ratios: A tool for estimation of past seasonal temperature variations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 373, 66-74.
- Observatoire global du Saint-Laurent-OGSL. (2012) <http://ogsl.ca>; <http://eole.osl.gc.ca/thermo/stations/BaieComeau.html>. (Sites consultés le 20 mai 2014).
- Occhietti, S. (1987). Dynamique de l'Inlandsis laurentidien du Sangamonien à l'Holocène. *Géographie physique et Quaternaire*. 41 (2), 301-313.
- Occhietti, S., & Hilaire-Marcel, C. (1977). Chronologie ^{14}C des événements paléogéographiques du Québec depuis 14 000 ans. *Géographie physique et Quaternaire*. 31 (1-2), 123-133.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., & McMahon, T.A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. 11, 1633-1644.
- Pfister, C.A., McCoy, S.J., Wootton, J.T., Martin, P.A., Colman, A.S., & Archer, D. (2011). Rapid Environmental Change Over the Past Decade Revealed by Isotopic Analysis of the California Mussel in the Northeast Pacific. *Plos One*. 6 (10), 1-8.
- Putten, E.V., Dehairs, F., Keppens, E., & Baeyens, W. (2000). High resolution distribution of trace elements in the calcite shell layer of modern *Mytilus edulis*: Environmental and biological controls. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 64 (6), 997-1011.

- Quillmann, U., Marchitto, T.M., Jennings, A.E., Andrews, J.T., & Friestad, B.F. (2012). Cooling and freshening at 8.2 ka on the NW Iceland Shelf recorded in paired $\delta^{18}\text{O}$ and Mg/Ca measurements of the benthic foraminifer *Cibicides lobatulus*. *Quaternary Research*. 78, 528-539.
- Royer, C., Thébault, J., Chauvaud, L., & Olivier, F. (2013). Structural analysis and paleoenvironmental potential of dog cockle shells (*Glycymeris glycymeris*) in Brittany, northwest France. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 373, 123-132.
- Rucker, J.B., & Valentine, J.W. (1961). Salinity Response of Trace Element Concentration in *Crassostrea virginica*. *Nature*. 190, 1099-1100.
- Schäfer, W. (1972). Craig, G.Y., & Oertel, I. (Eds.) *Ecology and paleoecology of marine environments*. Chicago, Illinois: University of Chicago Press.
- Schöne, B.R., Fiebig, J., Pfeiffer, M., Gleß, R., Hickson, J., Johnson, A.L.A., Dreyer, W., & Oschmann, W. (2005). Climate records from a bivalved Methuselah (*Arctica islandica*, Mollusca; Iceland). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 228, 130-148.
- Schöne, B.R., Zhang, Z., Radermacher, P., Thébault, J., Jacob, D.E., Nunn, V.E., & Maurer, A.F. (2011). Sr/Ca and Mg/Ca ratios of ontogenetically old, long-lived bivalve shells (*Arctica islandica*) and their function as paleotemperature proxies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 302, 52-64.
- Shackleton, N.J. (1973). Oxygen Isotope Analysis as a Means of Determining Season of Occupation of Prehistoric Midden Sites. *Archaeometry*. 15 (1), 133-141.
- Soote-Ryen, T. (1955). A report on the family Mytilidae (Pelecypoda). *Allan Hancock Pacif Exp.* 20, 1-175.
- Stone, T. (1995). Shell mound formation in coastal northern Australia. *Marine Geology*. 129 (1-2):77-100.
- Urey, H.C. (1947). The Thermodynamic Properties of Isotopic Substances. *Journal of the Chemical Society*. 562-581.
- Wagner, F.J.E. (1970). *Faunas of the Pleistocene Champlain Sea Volume 181 of Bulletin (Geological Survey of Canada)*. Ottawa, Canada: Department of Energy, Mines and Resources. 104 p.

Zwiebel, J.A., & Johnson, M.E. (1995). Late Pleistocene Mytilid and Petricolid Bivalves from the Open Rocky Shores of Pacific Baja California (Mexico): Unusual Preservation of Macrofossils. *Journal of Coastal Research*. 11 (3), 704-716.

Annexe 1. Compositions isotopiques et géochimiques des échantillons d'eau

Mois	Delta 18O x 1000	Delta 2H x 1000	Ba	Ca	Mg	Sr	Température
	vsmow	vsmow	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C
09/2012	-2,03	-13,74	0,0056	75,48	160,7	1,310	10,68
10/2012	-3,76	-22,66	0,0032	59,50	126,3	1,043	6,31
11/2012	-1,65	-12,56	0,0023	75,68	160,6	1,298	2,54
12/2012	-10,06	-75,65	0,0032	28,03	54,6	0,469	-0,24
01/2013	-9,94	-72,98	0,0035	25,66	53,0	0,455	-1,44
02/2013	-5,82	-40,82	0,0027	52,52	111,6	0,923	-1,26
03/2013	-5,29	-39,16	0,0024	55,87	112,6	0,938	0,17
04/2013	-7,49	-54,03	0,0023	39,28	79,1	0,686	2,41
05/2013	-4,53	-32,4	0,0029	58,27	119,1	1,029	8,33
07/2013	-7,62	-56,76	0,0017	39,69	81,6	0,691	11,08
08/2013	-2,23	-14,92	0,0022	73,34	152,1	1,233	13,13
09/2013	-2,22	-20,82	0,0015	76,49	160,0	1,292	12,25

Annexe 2. Compositions isotopiques et géochimiques des coquilles modernes (M1-B correspond à la coquille des Battures de Manicouagan; M1-A à celle de l'Anse à Moreau; M1-SP à celle de la baie de Saint-Pancrace)

N° échantillon	Distance à l'umbo mm	Âge années	Delta 13C x 1000 vpdb	Delta 18O x 1000 vpdb	Ba mg/g	Ca mg/g	Mg mg/g	Sr mg/g
M1-B4-B5	17	1,0	-0,09	-3,94	0,15	543,28	2,06	1,42
M1-B6-7	20	1,1	-0,26	-3,48	0,05	559,64	1,92	1,37
M1-B8	21	1,3	-0,03	-1,67	0,06	560,38	1,22	1,15
M1-B9-10	24	1,4	-0,40	-1,35	0,05	538,41	1,26	1,10
M1-B11	25	1,5	-0,42	-1,33	0,64	552,22	1,06	1,10
M1-B12-13	27	1,8	-0,36	-2,88	0,17	541,01	1,39	1,31
M1-B14-15	30	2,0	-0,11	-3,67	0,06	589,30	2,04	1,50
M1-B16	32	2,2	0,15	-3,26	0,52	551,19	1,90	1,32
M1-B17	33	2,3	-0,14	-3,09	0,03	484,71	1,56	1,20
M1-B18	34	2,5	-0,38	-2,03	0,04	539,76	1,28	1,16
M1-B19	35	2,7	-0,28	-1,86	0,12	519,73	1,23	1,20
M1-B20	37	2,8	-0,88	-3,94	0,04	538,74	1,44	1,25
M1-B21	39	3,0	-0,75	-4,12	0,03	558,25	1,48	1,28
M1-B22	40	3,2	-0,60	-3,69	0,03	482,14	1,54	1,10
M1-B23	41	3,3	-0,69	-3,42	0,04	550,35	1,57	1,25
M1-B24	43	3,5	-0,82	-2,78	0,14	561,35	1,44	1,33
M1-B25	44	3,7	-0,92	-2,75	0,04	518,81	1,27	1,15
M1-B26	45	3,8	-1,14	-3,70	0,04	547,50	1,37	1,29
M1-B27	46	4,0	-1,21	-4,00	0,05	543,55	1,52	1,33

N° échantillon	Distance à l'umbo mm	Âge années	Delta 13C x 1000 vpdb	Delta 18O x 1000 vpdb	Ba mg/g	Ca mg/g	Mg mg/g	Sr mg/g
M1-A-1	14	1,0	0,19	-0,96	0,02	351,35	0,41	1,16
M1-A-2	15	1,3	0,14	-0,56	0,02	360,78	0,40	1,08
M1-A-3	17	1,5	-0,29	-0,37	0,02	362,29	0,37	1,13
M1-A-4	18	1,6	-0,20	-0,59	0,02	355,53	0,34	1,15
M1-A-5	19	1,7	-0,28	-1,77	0,02	366,81	0,64	1,15
M1-A-6	20	1,8	-0,52	-1,42	0,03	361,17	0,54	1,26
M1-A-7-8	22	1,9	-0,63	-2,09	0,02	353,55	0,63	1,11
M1-A-9-10	24	2,0	-0,45	-2,35	0,03	352,29	0,61	0,92
M1-A-11-12	26	2,1	-0,54	-1,82	0,02	351,72	0,63	0,87
M1-A-13-14	27	2,2	-0,55	-1,38	0,02	356,13	0,71	0,83
M1-A-15-16	28	2,3	-0,32	-0,76	0,03	347,14	0,72	0,76
M1-A-17-18- 19	31	2,5	-0,60	-0,32	0,03	426,21	0,74	1,01
M1-A-20-21- 22	34	2,7	-1,51	-1,96	0,03	329,21	0,60	0,84
M1-A-23-24	36	2,8	-1,19	-2,29	0,03	337,96	0,74	0,87
M1-A-25-26	38	3,0	-1,57	-3,22	0,02	356,45	1,05	0,97
M1-A-27-28	40	3,1	-1,31	-3,20	0,02	347,36	1,10	0,99
M1-A-29	41	3,2	-0,83	-2,37	0,02	359,58	0,99	0,88
M1-A-30	42	3,3	-0,89	-2,24	0,02	357,77	0,94	0,88
M1-A-31	43	3,3	-1,00	-0,72	0,02	361,57	0,68	0,82
M1-A-32	44	3,4	-0,91	-0,44	0,02	360,23	0,63	0,82
M1-A-33	45	3,5	-0,92	0,14	0,04	355,22	0,80	0,86
M1-A-34	46	-	-1,10	-0,46	0,02	358,14	0,78	0,90
M1-A-35	47	-	-0,82	-0,20	0,04	144,09	1,04	1,23
M1-A-36	48	-	-0,71	0,05	0,03	112,15	1,23	1,61
M1-A-37	49	-	-0,94	-1,30	0,05	84,85	1,48	1,89

N° échantillon	Distance à l'umbo mm	Âge années	Delta 13C x 1000 vpdb	Delta 18O x 1000 vpdb	Ba mg/g	Ca mg/g	Mg mg/g	Sr mg/g
M1-SP-1	2	-	-0,11	-2,22	0,09	369,63	0,85	1,14
M1-SP-2	4	-	0,38	-1,02	0,02	456,15	0,75	1,39
M1-SP-3	5,5	-	-0,14	-0,95	0,01	411,18	0,59	0,97
M1-SP-4	7,5	-	-0,52	-1,12	0,02	347,21	0,54	0,79
M1-SP-5	9	-	-0,33	0,24	0,02	412,81	0,78	0,93
M1-SP-6	10,5	-	-0,93	-1,77	0,07	380,67	0,64	1,02
M1-SP-7	12,5	-	-0,71	-0,59	0,02	413,20	0,59	0,92
M1-SP-8	14	-	-1,11	-1,71	0,03	343,32	0,55	0,83
M1-SP-9	16	-	-0,80	-0,93	0,02	352,03	0,44	0,76
M1-SP-10	17,5	-	-1,37	-2,22	0,03	349,61	0,66	0,95
M1-SP-11	19,5	-	-0,87	-0,98	0,10	353,29	0,61	0,88
M1-SP-12	21,5	-	-1,33	-2,34	0,03	351,03	0,73	0,98
M1-SP-13	23	-	-1,42	-2,18	0,02	351,71	0,76	1,00
M1-SP-14	25,5	-	-0,93	-1,58	0,02	347,11	0,62	0,93
M1-SP-15	27,5	-	-1,06	-1,67	0,03	343,01	0,65	1,01
M1-SP-16	29	-	-1,01	-0,75	0,07	353,34	0,58	0,97
M1-SP-17	31	-	-0,95	-0,52	0,02	348,91	0,54	0,97
M1-SP-18	32,5	-	-1,58	-0,98	0,02	338,10	0,60	0,91
M1-SP-19	34	-	-1,25	0,08	0,02	336,22	0,54	0,89
M1-SP-20	35	-	-1,55	-1,57	0,02	352,22	0,72	1,05
M1-SP-21	36	-	-1,22	-1,67	0,10	321,87	0,76	1,03
M1-SP-22	37,5	-	-1,49	-1,56	0,02	345,13	0,59	1,02
M1-SP-23	39	-	-1,25	-1,57	0,03	422,01	0,73	1,20
M1-SP-24	41	-	-1,12	-1,12	0,02	348,36	0,69	1,03
M1-SP-25	43	-	-1,05	-0,90	0,02	439,40	0,85	1,30
M1-SP-26	44	-	-0,93	-0,07	0,09	349,87	0,60	1,04
M1-SP-27	46	-	-1,14	0,43	0,02	423,97	0,57	1,22
M1-SP-28	47,5	-	-1,09	-0,68	0,02	353,19	0,55	0,92
M1-SP-29	49	-	-0,88	-0,73	0,01	341,68	0,39	0,86
M1-SP-30	49,5	-	-0,67	-0,43	0,02	320,81	0,39	0,84

Annexe 3. Compositions isotopiques et géochimiques des coquilles du falun 1 (M1-1.25 correspond à la coquille de 1,25 m; M1-2.50 à celle de 2,5 m; M1-3.75 à celle de 3,75 m; M1-5 à celle de 5 m)

N° échantillon	Distance à l'umbo mm	Âge années	Delta 13C x 1000 vpdb	Delta 18O x 1000 vpdb	Ba mg/g	Ca mg/g	Mg mg/g	Sr mg/g
M1-1.25-1	2	-	1,32	-0,64	0,06	340,13	0,69	1,36
M1-1.25-2	2,5	-	0,34	-0,67	0,04	352,78	0,63	1,06
M1-1.25-3	3	-	-0,35	-1,2	0,04	365,61	0,65	0,92
M1-1.25-4-5-6	5	-	-0,33	-1,86	0,05	369,95	0,78	1,01
M1-1.25-7	6,5	-	-0,03	-1,77	0,03	368,68	0,63	0,91
M1-1.25-8-9	8	-	-0,56	-1,69	0,05	358,05	0,65	0,95
M1-1.25-11-12	10,5	-	-0,25	-1,8	0,05	356,4	0,67	1,03
M1-1.25-13	11,5	1,0	-0,55	-2,4	0,05	363,45	0,68	1,03
M1-1.25-14	12,5	1,1	0,09	-1,25	0,04	360,36	0,68	1,01
M1-1.25-15-16	14	1,2	-0,35	-1,05	0,03	360,05	0,65	0,98
M1-1.25-17-18	16	1,3	-0,2	-0,33	0,03	350,34	0,68	0,98
M1-1.25-19-20	18	1,3	-0,66	0,56	0,03	351,31	0,64	0,96
M1-1.25-21-22	20	1,4	-1,35	0,35	0,05	313,02	0,6	0,85
M1-1.25-23	21	1,5	-1,65	1,21	0,05	349,67	0,69	0,89
M1-1.25-24-25	23	1,6	-0,99	0,05	0,03	331,59	0,63	0,89
M1-1.25-26	23,5	1,8	-0,94	-1,64	0,06	337,54	0,73	0,98
M1-1.25-27	24,5	1,9	-1,24	-0,42	0,06	334,02	0,72	0,92
M1-1.25-28	25	2,0	-1,05	-1,49	0,04	338,8	0,63	0,88
M1-1.25-29-30	27	2,1	-0,63	-1,06	0,03	345,74	0,68	0,94
M1-1.25-31	28	2,2	-1,18	-1,57	0,04	349,14	0,77	0,92
M1-1.25-32	28,5	2,3	-1	0,07	0,04	346,91	0,78	0,92
M1-1.25-33	30	2,4	-1,15	-0,46	0,38	350,93	0,8	0,97
M1-1.25-34	30,5	2,5	-1,53	1,31	0,21	362,34	0,74	0,95
M1-1.25-35	31,5	2,6	-1,18	0,48	0,03	356,87	0,71	0,98
M1-1.25-36	32	2,7	-1,97	0,95	0,05	357,81	0,73	0,9
M1-1.25-37	33	2,8	-2,07	1,04	0,05	350,7	0,63	0,95
M1-1.25-39-40	35	2,9	-1,68	-1,33	0,04	333,26	0,57	0,94
M1-1.25-41	36	3,0	-1,46	-1,85	0,04	357,88	0,69	1,01
M1-1.25-42	36,5	3,1	-1,54	0,2	0,17	364,56	0,65	0,98
M1-1.25-43	37	3,3	-1,45	-0,15	0,03	358,87	0,58	1
M1-1.25-44	37,5	3,4	-1,6	0,56	0,04	354,68	0,7	0,93
M1-1.25-45	38	3,5	-1,73	1,59	0,07	357,8	0,67	0,92
M1-1.25-46-47	41	-	-1,77	0,18	0,06	355,25	0,52	0,95
M1-1.25-48-49	42	-	-1,38	-0,7	0,03	357,1	0,52	1
M1-1.25-50	43	-	-1,22	0,23	0,09	362,02	0,66	0,97
M1-1.25-51-52	44	-	-1,56	-0,1	0,05	368,54	0,82	0,95

M1-1.25-53-54	45,5	-	-1,88	0,18	0,05	364,31	0,81	0,91
M1-1.25-55	47	-	-1,27	0,07	0,04	333,6	0,62	0,83

N° échantillon	Distance à l'umbo mm	Âge années	Delta 13C x 1000 vpdb	Delta 18O x 1000 vpdb	Ba mg/g	Ca mg/g	Mg mg/g	Sr mg/g
M1-2.50-1	5	-	-0,42	-2,22	0,03	364,04	0,47	1,09
M1-2.50-2	6	-	-0,48	-2,80	0,12	349,50	0,62	0,94
M1-2.50-3	7	-	-0,76	-2,31	0,03	344,94	0,63	0,85
M1-2.50-4	8	-	-0,97	-2,96	0,04	316,51	0,56	0,84
M1-2.50-5	9	-	-0,72	-1,75	0,03	327,06	0,52	0,78
M1-2.50-6	10	-	-0,75	-3,45	0,03	351,94	0,56	0,92
M1-2.50-7	11	-	-0,70	-2,57	0,04	351,61	0,59	0,91
M1-2.50-8	12	-	-0,62	-3,57	0,03	359,43	0,60	0,92
M1-2.50-9	13	-	-0,76	-2,31	0,03	359,74	0,61	0,97
M1-2.50-10	14	-	-0,96	-2,79	0,03	352,07	0,65	0,87
M1-2.50-11-12	16	-	-1,02	-2,26	0,04	345,37	0,61	0,89
M1-2.50-13	17	-	-1,00	-1,95	0,03	362,63	0,61	0,90
M1-2.50-14	18	-	-0,78	-2,09	0,03	360,16	0,62	0,93
M1-2.50-15	18,5	-	-1,18	-1,81	0,03	350,92	0,63	0,90
M1-2.50-16	19	-	-1,07	-3,30	0,03	363,89	0,62	0,93
M1-2.50-17	20	-	-1,06	-3,20	0,06	357,61	0,60	0,99
M1-2.50-18	21	-	-1,08	-2,17	0,03	366,60	0,67	0,83
M1-2.50-19	22	-	-1,14	-2,21	0,05	375,61	0,74	0,91
M1-2.50-20-21	24	-	-1,17	-2,17	0,04	313,29	0,57	0,80
M1-2.50-22	25	-	-1,12	-2,03	0,03	356,13	0,62	0,90
M1-2.50-23	26	-	-1,00	-2,78	0,04	363,74	0,59	1,00
M1-2.50-24-25	28	-	-1,26	-3,04	0,04	331,22	0,55	0,95
M1-2.50-26	29	-	-0,98	-2,00	0,03	353,92	0,84	0,94
M1-2.50-27-29	32	-	-1,22	-1,57	0,02	259,70	0,61	0,70
M1-2.50-30	33	-	-1,58	-4,60	0,04	335,56	0,83	0,98
M1-2.50-31-33	36	-	-1,28	-4,00	0,03	325,51	0,68	0,95
M12.50 35-36-37	38	-	-1,74	0,01	0,23	352,73	0,70	0,99
M1-2.50-38-39	41	-	-1,72	-2,80	0,05	351,13	0,72	0,92
M1-2.50-40	42	-	-1,48	-2,20	0,07	320,39	0,76	0,85
M1-2.50-41	43	-	-1,35	-0,71	0,21	357,04	0,66	0,96
M1-2.50-42	44	-	-0,96	-0,98	0,04	365,50	0,73	0,89
M1-2.50-43	45	-	-1,28	-1,62	0,19	347,34	1,55	0,96
M1-2.50-44	46	-	-0,96	-0,93	0,03	334,28	0,64	0,90
M1-2.50-45-46	47	-	-1,15	-0,47	0,04	353,29	0,71	0,96
M1-2.50-47	48	-	-1,11	-2,81	0,04	339,24	0,69	0,93
M1-2.50-48	49	-	-0,99	-1,31	0,04	364,14	0,63	1,00

M1-2.50-49	50	-	-1,28	-1,62	0,04	373,14	0,63	1,03
M1-2.50-50	51	-	-1,14	-3,09	0,03	363,99	0,58	1,07
M1-2.50-51	52	-	-1,15	-2,24	0,04	354,56	0,68	0,94
M1-2.50-52	54	-	-1,45	-1,30	0,04	347,91	0,69	0,90

N° échantillon	Distance à l'umbo mm	Âge années	Delta 13C x 1000 vpdb	Delta 18O x 1000 vpdb	Ba mg/g	Ca mg/g	Mg mg/g	Sr mg/g
M1-3.75-1	10	1,0	-0,10	-3,14	0,04	532,35	1,03	2,59
M1-3.75-2	12	1,1	0,01	-2,76	0,19	520,15	1,28	2,58
M1-3.75-3	13	1,2	-0,04	-1,04	0,04	550,65	1,32	1,74
M1-3.75-4	14	1,3	-0,03	-0,68	0,06	535,53	1,01	2,61
M1-3.75-5	15	1,4	0,01	1,72	0,59	554,08	1,28	1,43
M1-3.75-6	17	1,5	-0,13	2,28	0,04	556,57	1,35	1,44
M1-3.75-7	18	1,7	-0,36	1,82	0,15	539,21	1,40	1,56
M1-3.75-8-9	20	1,8	-0,77	-1,91	0,05	498,56	1,52	1,47
M1-3.75-10-11	23	2,0	-1,34	-5,09	0,04	537,09	1,53	1,52
M1-3.75-12	24	2,3	-0,84	-2,09	0,04	524,24	1,61	1,44
M1-3.75-13	25	2,5	-0,85	0,91	0,04	531,49	1,68	1,30
M1-3.75-14	26	2,6	-1,30	0,83	0,15	567,88	1,87	1,49
M1-3.75-15	27	2,8	-0,92	-3,74	0,04	520,73	1,52	1,45
M1-3.75-16	28	2,9	-1,00	-3,83	0,04	551,05	1,85	1,57
M1-3.75-17	29	3,0	-0,76	-3,91	0,05	569,19	1,72	1,72
M1-3.75-18	30	3,3	-0,93	-0,37	0,03	571,55	1,56	1,38
M1-3.75-19	31	3,5	-1,59	-0,54	0,17	565,62	1,74	1,48
M1-3.75-20	33		-1,47	-2,36	0,06	547,18	1,79	1,40
M1-3.75-21	34		-1,25	-1,78	0,05	570,40	1,79	1,42
M1-3.75-22	35		-1,27	-0,92	0,04	555,34	2,02	1,41
M1-3.75-23	36		-1,12	-1,96	0,04	575,46	1,95	1,43
M1-3.75-24	37		-1,07	-2,28	0,66	552,51	1,84	1,50
M1-3.75-25	38		-0,89	-1,84	0,06	553,52	1,72	1,41
M1-3.75-26	39		-1,14	-2,10	0,05	565,84	2,57	1,40
M1-3.75-27	40		-0,70	-2,36	0,06	565,55	1,54	1,39
M1-3.75-28	41		-0,90	-2,49	0,04	554,78	1,63	1,36
M1-3.75-29	42		-0,72	-2,04	0,18	563,96	1,60	1,49
M1-3.75-30	43		-0,57	-1,98	0,05	554,23	1,51	1,28
M1-3.75-31	44		-0,56	-1,65	0,06	574,58	1,62	1,36
M1-3.75-32	45		-0,47	-1,62	0,04	559,12	1,62	1,32

N° échantillon	Distance à l'umbo mm	Âge années	Delta 13C x 1000 vpdb	Delta 18O x 1000 vpdb	Ba mg/g	Ca mg/g	Mg mg/g	Sr mg/g
M1-5-1	2,5	-	0,34	-1,74	0,08	353,00	0,51	1,35
M1-5-2	3,5	-	0,36	-1,06	0,03	351,16	0,27	1,74
M1-5-3	5	-	-0,20	-1,49	0,08	354,83	0,46	1,14
M1-5-4	7	1,5	-0,02	-1,12	0,03	357,17	0,36	1,40
M1-5-5	9	1,6	-0,14	-1,58	0,02	346,15	0,38	1,32
M1-5-6	11	1,7	-0,43	-1,31	0,08	350,32	0,41	1,27
M1-5-7	12	1,8	-0,88	-1,83	0,03	357,54	0,57	0,90
M1-5-8	13,5	1,9	-0,88	-2,25	0,02	354,95	0,55	0,90
M1-5-9	15	2,0	-0,33	-2,89	0,02	364,18	0,63	0,83
M1-5-10	17	2,5	-1,03	-0,82	0,02	325,96	0,52	0,74
M1-5-11	18	2,8	-0,15	-1,27	0,06	367,05	0,68	0,94
M1-5-12	20	3,0	-0,44	-3,76	0,02	376,84	0,60	0,94
M1-5-13	22	3,1	-0,29	-0,12	0,02	380,10	0,63	1,00
M1-5-14	24	3,3	-0,59	-1,20	0,02	389,75	0,69	0,92
M1-5-15	25,5	3,4	-0,94	-0,03	0,02	438,52	0,68	1,00
M1-5-16	28	3,5	-0,73	0,33	0,08	357,65	0,74	0,87
M1-5-17	29	3,7	-0,93	-1,72	0,02	362,78	0,67	0,77
M1-5-18	30	3,8	-0,94	-1,23	0,02	351,98	0,72	0,74
M1-5-19	31	4,0	-1,04	-1,85	0,02	337,76	0,66	0,76
M1-5-20	33	-	-1,28	-1,20	0,02	325,99	0,62	0,72
M1-5-21	34	-	-1,70	-2,74	0,07	348,05	0,81	0,88
M1-5-22	36	-	-1,77	-3,50	0,04	348,53	0,79	0,87
M1-5-23	37	-	-1,64	-2,46	0,02	354,12	0,89	0,87
M1-5-24	39	-	-1,36	-2,88	0,02	364,82	0,76	0,90
M1-5-25	40	-	-1,10	-1,36	0,02	358,26	0,73	0,82
M1-5-26	42	-	-1,21	-0,73	0,07	349,96	0,81	0,85