



HAL
open science

Écologie des foraminifères benthiques en domaine arctique dans un contexte de changements climatiques : cas des mers de Chukchi, Barents et Baffin

Calypso Racine

► **To cite this version:**

Calypso Racine. Écologie des foraminifères benthiques en domaine arctique dans un contexte de changements climatiques : cas des mers de Chukchi, Barents et Baffin. Milieux et Changements globaux. Université de Bordeaux, 2019. Français. NNT : 2019BORD0008 . tel-02303043

HAL Id: tel-02303043

<https://theses.hal.science/tel-02303043>

Submitted on 2 Oct 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

PRÉSENTÉE POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE : Sciences et environnements
SPÉCIALITÉ : sédimentologie marine et paléoclimats

Par Calypso RACINE

***ÉCOLOGIE DES FORAMINIFÈRES BENTHIQUES EN DOMAINE ARCTIQUE
DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES : CAS DES MERS
DE CHUKCHI, BAFFIN ET BARENTS***

Sous la direction de : Jacques GIRAUDEAU et Jérôme BONNIN

Membres du jury :

Mme HUSUM Katrine, Senior Research Scientist,
Mme MOJTAHID Meryem, Maître de conférences,
Mme BARTOLINI Annachiara, Professeure,
M. MARTINEZ Philippe, Professeur,
M. GIRAUDEAU Jacques, Directeur de recherche,
M. BONNIN Jérôme, Maître de conférences,

Norwegian Polar Institute
Université d'Angers
Museum National d'Histoire Naturelle
Université de Bordeaux
CNRS
Université de Bordeaux

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse
Directeur de thèse

Ecologie des foraminifères benthiques en domaine arctique dans un contexte de changement climatique : cas des mers de Chukchi, Barents et Baffin

Les foraminifères benthiques sont largement utilisés en océanographie comme bio-indicateurs paléoclimatiques et paléoenvironnementaux du fait de leur présence dans tous les milieux marins, leur sensibilité aux changements environnementaux et leur grande capacité de fossilisation. Néanmoins, leur utilisation nécessite une connaissance approfondie de leur écologie et des paramètres contrôlant leur distribution. Si les connaissances sur l'écologie des foraminifères benthiques sont de plus en plus complètes, elles demeurent très sporadiques dans la zone arctique, système complexe caractérisé par des interactions multiples entre l'atmosphère, l'océan et la cryosphère, pourtant au cœur du changement climatique global. L'amplification polaire du changement climatique conduit les régions des hautes latitudes à se réchauffer près de deux fois plus vite que les régions tempérées. Dans ce contexte, cette thèse s'attache à mieux comprendre l'écologie des foraminifères benthiques vivants dans plusieurs régions arctiques et définir l'importance du contrôle des paramètres environnementaux sur les faunes tels que les propriétés des masses d'eau, la productivité primaire et le flux de matière organique ainsi que la dynamique de la glace de mer. Les foraminifères benthiques vivants ont été analysés dans les premiers centimètres de sédiment de 21 carottes d'interfaces prélevées dans trois régions arctiques durant les étés 2014 et 2015 : la mer de Barents, la baie de Baffin et la mer de Chukchi. Ces trois régions présentent des particularités en termes de couvert de banquise, de circulation des masses d'eau ou de dynamique de la production primaire. Nos résultats montrent que ces facteurs influencent la distribution des foraminifères benthiques. Le flux de matière organique qui résulte de la forte productivité primaire printanière aux abords des fronts polaires hydrographiques, des bordures de glace de mer (zones marginales de glace) et dans la polynie des eaux du nord (baie de Baffin) impacte la densité et la diversité des faunes et favorise le développement de certaines espèces. *Nonionellina labradorica* dans les eaux arctiques froides et *Cassidulina neoteretis* associée aux eaux atlantiques répondent aux apports de matière organique fraîche tandis que *Melonis barleeanus* s'accommode des milieux riches en matière organique plus dégradée. Dans les environnements oligotrophes plus profonds, *Oridorsalis tenerus* est une espèce ubiquiste. Cette espèce est associée à *Cibicidoides wuellerstorfi* sur la marge ouest de la mer de Barents et *Ioanella tumidula* dans le bassin plus profond au nord de la mer de Chukchi. Les propriétés physiques et chimiques des masses d'eau contraignent également la distribution faunistique. En baie de Baffin et sur le plateau de la mer de Chukchi, les eaux corrosives engendrent la dissolution des carbonates, favorisant la dominance des espèces agglutinées. Les études menées dans le cadre de cette thèse permettent de calibrer l'outil foraminifère benthique dans l'actuel et d'affiner leur utilisation en tant que proxy paléoclimatique et paléoenvironnemental en Arctique. Enfin, une étude préliminaire sur les foraminifères benthiques fossiles de trois carottes de la mer de Barents a permis de montrer les variations des conditions paléoenvironnementales au cours des deux derniers siècles.

Mots clés : foraminifères benthiques, Arctique, production primaire, matière organique

Ecology of modern arctic benthic foraminifera within a context of climate change: case studies in the Chukchi Sea, Barents Sea and Baffin Bay

Benthic foraminifera are widely used in oceanography as paleoclimate and paleoenvironmental bio-indicators due to their presence in all marine environments, their sensitivity to environmental changes and their great capacity to fossilize. However, the use of benthic foraminifera as paleoenvironmental proxies requires a good knowledge of the ecological conditions and the parameters controlling species distribution. Although knowledges about the ecology of benthic foraminifera are improving, they remain sporadic in Arctic area, a complex ecosystem characterized by multiple interactions between the atmosphere, the ocean and the cryosphere and particularly sensitive to change and vulnerable to global warming. Temperatures in the Arctic have risen twice as fast as the global average over the past decades, a phenomenon that has been dubbed the "polar amplification of global warming". In this context, this thesis aims at better understanding the ecology of living benthic foraminifera in Arctic regions and at defining the importance of environmental controls on fauna such as water mass properties, primary productivity, organic matter flux as well as sea-ice dynamics. Living benthic foraminifera were identified in the first centimetres of 21 surface sediment cores collected in three Arctic areas during summer in 2014 and 2015: Baffin Bay and the Barents and Chukchi Seas. These three regions present specific characteristics in terms of sea-ice cover, water mass circulation or primary productivity. Our results suggest that these factors influence the distribution of benthic foraminifera. The flux of organic matter resulting from primary productivity intensified during spring and summer periods near hydrographic polar fronts, sea-ice edges (marginal ice zones) and in the north water polynya (Baffin Bay) increases the fauna's densities and diversity and favours the development of specific species. *Nonionellina labradorica* in cold Arctic waters and *Cassidulina neoteretis* associated with Atlantic waters respond to fresh supply of organic matter while *Melonis barleeanus* is found in environment rich in degraded organic matter. In deeper oligotrophic environments, *Oridorsalis tenerus* is a ubiquitous species associated with *Cibicidoides wuellerstorfi* on the west continental margin of Barents Sea and *Ioanella tumidula* in the deeper basin in the north of the Chukchi Sea. Physical and chemical water mass properties also affect the distribution of living benthic foraminifera. In the Baffin Bay and the continental shelf of the Chukchi Sea, corrosive waters lead to carbonate dissolution, favouring the dominance of agglutinated species. This thesis hence contributes to calibrate the benthic foraminifera to their environment and to improve their application as paleoclimate and paleoenvironmental proxies in the Arctic. Finally, a preliminary study about fossil benthic foraminifera in three cores of Barents Sea allowed to show variations of environmental conditions during the last two centuries.

Key words: Benthic foraminifera, Arctic, primary production, organic matter

Remerciements

Une thèse demande un engagement personnel énorme rendu possible par le soutien de nombreuses personnes à qui je souhaite rendre hommage.

Tout d'abord, je tiens à adresser mes sincères remerciements aux membres du jury Katrine Husum, Mereym Mojtahid, Annachiara Bartolini, Philippe Martinez qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail de thèse et de participer à cette journée de soutenance qui restera dans ma mémoire. Je vous remercie pour vos conseils avisés.

Je remercie chaleureusement mes deux directeurs de thèse. Jérôme, merci de m'avoir fait confiance et d'avoir porté ce sujet sur les foraminifères benthiques de l'Arctique au concours de l'école doctorale. Quel chemin parcouru depuis toutes ces années, de la licence en passant par les stages de master et maintenant docteur. Jacques, merci pour ta franchise, ton soutien sans faille, ta réactivité de correction. Je tiens à m'excuser auprès de vous pour toutes les frayeurs à chaque deadline... Mais « t'inquiète je suis large ! ». Enfin, mille fois merci pour toutes les opportunités de voyage que vous m'avez offertes... la Corée, le Québec, l'Ecosse.

Pierre-Antoine, mon maître jedi forams, merci pour tout. Tu m'as appris toutes les bases et tu as été mon modèle de réussite que j'ai essayé de suivre pour mener à bien mon projet de thèse qui au final n'est pas si calystrophique !

Un des moments les plus magiques de ces trois années de thèse fût ma participation à la mission océanographique MOCOSÉD 2017 en mer du Groenland que je dois à Sébastien Zaragosi. Merci de m'avoir intégré à l'équipe, tu as contribué à réaliser un de mes rêves.

Je remercie tous les membres du laboratoire EPOC qui ont contribué de près ou de loin à la production de données et à l'élaboration de ce travail. Merci donc à Domi, Sabine, Karine, Linda, le gang de la carothèque. J'ai une pensée particulière pour Pascal, merci pour ta bienveillance à mon égard. Marie-Claire, ta gentillesse et nos discussions potins vont beaucoup me manquer. Je remercie également mes professeurs qui m'ont donné l'envie et la curiosité de me lancer dans la recherche. Merci pour vos encouragements.

Merci à la grande famille des doctorants, anciens et nouveaux, collègues et amis, pour votre soutien. L'entre-aide est essentielle pour notre survie ! L'apéro au « Carpe » aussi ! Merci aux stagiaires, Athina, Stan, qui ont partagé notre quotidien. Je tiens à remercier tout particulièrement Antoine qui s'est levé aux aurores pour la mise en page de ce manuscrit de thèse. « Surtout, tu ne touches à rien ! ». Merci d'être passé le soir m'encourager pendant les

dernières semaines de rédaction. Bien évidemment, je remercie mes collègues de bureau, ceux qui ont subi toutes mes humeurs, Mickey et Kelly. Merci de m'avoir supporté, écouté, recadré, aidé. Mickey j'en ai pas fini avec les stats (#JPP)... Et le GIF pour ma soutenance... magnifique ! Le meilleur pour la fin, Kelly. On aura tout partagé ensemble, le road-trip en Islande et les aurores boréales. Je ne te remercierai jamais assez pour ton soutien... Exceptionnelle !

Merci à mes amis, amies, de Bordeaux ou d'ailleurs. Mattouf (merci pour les week-ends à Pérucain), Sarah (nos rendez-vous avec Georges) et Mars, William et Roxy, Chachou, Gomar, Aurélien, Jeanounette, les charpentiers (Hervé merci pour le costume et le chapeau carré américain) je vous remercie tous pour les moments d'évasion qui m'ont permis de tenir la cadence.

Merci à Kévin avec qui je construis pas à pas ma vie depuis de nombreuses années. Prêt à écrire un nouveau chapitre ?

Mes derniers remerciements sont adressés à ma famille. A ma cousine pour ce break mémorable à la Réunion. A ma sœur, toujours à l'écoute pour calmer mes angoisses. Je te remercie aussi pour tes pâtisseries. A mes parents qui m'ont toujours poussé à ne jamais abandonner. A ma grand-mère, mon modèle de courage. Enfin j'ai une pensée pour mon grand-père, merci pour les moments partagés, les glaces Sanchez sur les remparts à contempler la mer. Ton rire raisonne toujours dans mon cœur.

*Homme libre, toujours tu chériras la mer !
La mer est ton miroir ; tu contemples ton âme
Dans le déroulement infini de sa lame,
Et ton esprit n'est pas un gouffre moins amer.*

*Tu te plais à plonger au sein de ton image ;
Tu l'embrasses des yeux et des bras, et ton cœur
Se distrait quelquefois de sa propre rumeur
Au bruit de cette plainte indomptable et sauvage.*

*Vous êtes tous les deux ténébreux et discrets :
Homme, nul n'a sondé le fond de tes abîmes ;
Ô mer, nul ne connaît tes richesses intimes,
Tant vous êtes jaloux de garder vos secrets !*

*Et cependant voilà des siècles innombrables
Que vous vous combattez sans pitié ni remords,
Tellement vous aimez le carnage et la mort,
Ô lutteurs éternels, ô frères implacables !*

Charles Baudelaire – Les fleurs du mal

Nous disons qu'elle est à la portée de tout le monde, en ce sens que, placé n'importe où, sur les côtes des diverses portions du globe terrestre ou sur les parties des continents recouvertes par des terrains tertiaires, crétacés ou oolithiques, partout disons-nous, l'observateur trouve sous ses pieds, et dans une seule pincée de sable, une grande quantité de Foraminifères qu'il peut étudier avec le seul secours d'une loupe. Pour l'importance réelle de leur étude, nous croyons qu'il n'est pas de série animale offrant plus de facilités et d'avantage au géologue et au zoologiste: au premier, pour déterminer la température des lieux où vivaient les espèces perdues, par la comparaison avec ce que nous voyons maintenant dans les mers, et pour expliquer la formation des couches (questions de la plus haute importance dans l'histoire de notre planète); au second, par leur admirable diversité, par l'élégance de leurs formes, par la singularité de leur organisation, et enfin en ce qu'ils constituent une classe des plus nombreuses du règne animal, et jouent, malgré leur petitesse, un rôle immense dans la nature.

Alcide d'Orbigny, 1839 – Ramon de la Sagra, Histoire Physique, Politique et Naturelle de l'Ile de Cuba

Table des matières

Chapitre I : Introduction générale	1
I.1 Objectifs de la thèse.....	3
I.2 L'Arctique : contexte environnemental	5
I.2.1 Généralités.....	5
I.2.2 Hydrologie.....	7
I.2.3 Glace de mer.....	10
I.2.4 Productivité primaire.....	11
I.2.5 Réchauffement climatique actuel	13
I.3 Foraminifères benthiques	16
I.3.1 Généralités.....	16
I.3.2 Les foraminifères benthiques comme bio-indicateurs environnementaux.....	17
I.3.3 Les foraminifères benthiques en Arctique	19
Chapitre II : Distribution of living benthic foraminifera in the northern Chukchi Sea	23
II.1 Introduction	25
II.2 Regional setting	26
II.3 Materials and methods.....	28
II.3.1 Sample collection	28
II.3.2 Sedimentological and geochemical analyses	29
II.3.3 Living (stained) benthic foraminiferal analysis	30
II.4 Results	31
II.4.1 Environmental, sedimentological and organic geochemical settings during the sampling period.....	31
II.4.2 Living benthic foraminifera	34
II.4.2.1 Living standing stock and ecological indices	34
II.4.2.2 Relative abundances of the dominant species.....	35
II.4.2.3 Vertical distribution	36
II.5 Discussion.....	37
II.5.1 Density and diversity of living benthic foraminifera related to primary production 38	
II.5.2 Species distribution as a proxy of environmental changes	40
II.6 Conclusions	43

Chapitre III : Distribution spatiale et verticale des foraminifères benthiques vivants dans la baie de Baffin et le détroit de Nares : relation avec la disponibilité et la qualité de la matière organique à l'interface eau-sédiment 45

III.1	Introduction.....	47
III.2	Zone d'étude	49
III.2.1	La baie de Baffin	50
III.2.2	La polynie des eaux du nord (NOW)	51
III.2.3	Le détroit de Nares	52
III.3	Matériels et méthodes	52
III.3.1	Données satellitaires.....	53
III.3.2	Analyses sédimentologiques et géochimiques	54
III.3.3	Analyses des faunes de foraminifères benthiques vivants	54
III.4	Résultats.....	55
III.4.1	Caractéristiques environnementales	55
III.4.2	Distribution des foraminifères benthiques vivants.....	61
III.5	Discussion.....	65
III.5.1	Influence des processus de dissolution des carbonates sur les assemblages de foraminifères benthiques	66
III.5.2	Relation entre la productivité primaire et la distribution des foraminifères benthiques.....	68
III.6	Conclusion	72

Chapitre IV : Distribution des foraminifères benthiques vivants sur la marge continentale ouest de la mer de Barents et évolution depuis le XIXème siècle..... 73

IV.1	Introduction.....	75
IV.2	Zone d'étude	76
IV.2.1	Situation géographique et topographie.....	76
IV.2.2	Contexte hydrologique	77
IV.2.3	Dynamique de la cryosphère	78
IV.2.4	Production primaire.....	79
IV.3	Matériels et méthodes	79
IV.3.1	Mesures des paramètres hydrologiques.....	80
IV.3.2	Analyses sédimentaires	80
IV.3.3	Analyses géochimiques et modèle d'âge	81
IV.3.4	Données faunistiques.....	83
IV.4	Résultats.....	84
IV.4.1	Caractéristiques hydrologiques, sédimentologiques et géochimiques	84
IV.4.2	Distribution des assemblages de foraminifères benthiques vivants	89

IV.4.3	Distribution des assemblages de foraminifères benthiques morts et variations des éléments traces mesurés au XRF.....	91
IV.5	Discussion.....	93
IV.5.1	Distribution des foraminifères benthiques vivants en lien avec l'environnement hydrologique et sédimentaire	93
IV.5.2	Evolution temporelle depuis le XIXème siècle.....	96
IV.6	Conclusion	100
	Chapitre V : Synthèse	103
V.1	Productivité primaire	105
V.2	Masses d'eau.....	107
V.3	Dissolution des carbonates	108
V.4	Glace de mer.....	109
	Perspectives	113
	Références bibliographiques	115
	Annexes	137
	Planches de photographies MEB présentant les espèces majeures observées dans les trois régions d'étude : mer de Chukchi, baie de Baffin et mer de Barents.....	139
	Tableaux de comptages de l'étude	145
	Chukchi	145
	Baffin.....	148
	Barents.....	153
	Posters présentés pendant la thèse.....	163

Table des figures

Figure I.1 : Carte topographique et bathymétrique de l'Arctique (IBCAO) présentant les différentes zones d'études de cette thèse, l'emplacement des sites de carottage et les limites d'étendue de banquise en septembre (2012 et moyenne 1981-2010).	5
Figure I.2 : Carte topographique et bathymétrique de l'Arctique (IBCAO version 3.0 ; Jakobsson et al., 2012).	7
Figure I.3 : Schéma de circulation océanique des courants de surface et intermédiaires. En bleu la circulation de surface des eaux arctiques, en rouge la circulation de surface des eaux atlantiques, en vert la circulation de surface des eaux pacifiques, en orange les principaux fleuves. Les flèches rouge pâles représentent la circulation intermédiaire dans l'océan Arctique. Les étoiles rouges matérialisent les zones de pénétration en subsurface des eaux atlantiques et pacifiques dans l'océan Arctique. Modifié d'après Rudels et al., 2012.	8
Figure I.4 : Profil le long d'un transect du détroit de Béring au détroit de Fram schématisant la distribution verticale des masses d'eau dans l'océan Arctique (Aagaard et Carmack, 1989) et leur temps de résidence moyen (Bönisch et Schlosser, 1995). D'après AMAP, 1998.	9
Figure I.5 : Etendue respectivement maximale et minimale de la banquise (A) en mars 2018 et (B) en octobre 2018 (NSIDC).	11
Figure I.6 : Schéma représentatif de la saisonnalité de la productivité primaire et de l'export de matière organique (A) dans le contexte actuel (B) dans un contexte futur avec un climat plus chaud, une épaisseur de glace plus faible en hiver et une fonte plus importante de la banquise en été. Dans la colonne d'eau, le gradient de couleur passant du vert au rouge qualifie la biomasse majoritairement autotrophe au printemps et en été puis hétérotrophe à la fin de l'été. La largeur et la couleur des flèches illustrent l'ampleur et la composition de la matière organique exportée : en vert foncé le carbone dérivé des algues de glace, en vert clair le carbone dérivé du phytoplancton d'océan ouvert et en orange et rouge l'augmentation du degré de détrit. (Wassmann et Reigstad, 2011).	12
Figure I.7 : Images satellites AquaMODIS d'efflorescences algaires (A) en mer de Chukchi et (B) en mer de Barents (NASA).	13
Figure I.8 : Impacts climatiques en hémisphère nord des phases (A) positives et (B) négatives du couple AO/NAO (NSIDC ; J. Wallace, University of Washington).	14
Figure I.9 : Schémas de dérive générale de la glace de mer (haut) et nombre d'années pour que la glace rejoigne le détroit de Fram (bas) en conditions AO/NAO fortement négative (gauche) et fortement positive (droite), d'après Macdonald et al., 2004.	15
Figure I.10 : Modèle TROX représentant les microhabitats des foraminifères benthiques en fonction des paramètres de disponibilité en nourriture et d'oxygénation du sédiment (d'après Jorissen et al., 1995).	18
Tableau I.1 : Résumé des préférences environnementales des espèces de foraminifères benthiques calcaires communément observées en Arctique et en Atlantique Nord.	21

Figure II.1 : Bathymetric map of the Chukchi Sea with sampling locations, main features of the surface and intermediate circulation, and mean sea-ice extent in August 2015 (white line) and September 2015 (white dotted line). The circulation is adapted from Rudels et al. (2012). For the surface waters, low-salinity currents derived from Pacific water are indicated by green arrows and cold polar and arctic currents by blue arrows. Circulation of intermediate waters is shown by black dotted arrows. AC Anadyr current, ACC Alaskan coastal current, BG: Beaufort gyre, BSW Bering Sea water, SCC Siberian coastal current, TPD transpolar drift. Monthly sea-ice extent is from NSIDC (Fetterer et al., 2016) and bathymetry is from IBCAO, WGS84. .. 26

Tableau II.1 : Station numbers, types, locations and water depths..... 29

Figure II.2 : Water column profiles of temperature, salinity (a), and chlorophyll a (b) at Sts. 01A, 03, 02, and 04. Pacific water mass is underlined in green, Atlantic Intermediate Water in red and Arctic Deep Water in blue..... 32

Figure II.3 : Downcore (topmost 2 cm) profiles of median sediment grain size D50 (μm), total organic carbon content (TOC, wt. %), total nitrogen content (TN, wt. %), $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (‰ VPDB) and C/N ratio at all stations. 33

Figure II.4 : Downcore 210Pbxs profile measured at St. 01A..... 33

Figure II.5 : Ecological indices describing foraminiferal assemblages at all the stations for the 63-150 μm (topmost centimetre, grey bars) and >125 μm size fractions (topmost 5 cm, black bars). (a) Foraminiferal abundances; (b) Number of species S; (c-d) Shannon (H') and Evenness (E) indices. 34

Figure II.6 : Proportion of agglutinated vs. calcareous species at all the stations for the 63-125 μm size fraction (a) and the >125 μm size fraction (b)..... 35

Figure II.7 : Foraminiferal relative abundances of major species (>5% of the total living benthic foraminifera assemblage) for the 63-125 μm (a) and the >125 μm (b) size fractions. Living standing stock (number in the central area of the pie charts) are standardized for a surface area of 100cm². Species representing less than 5 % are grouped in the category “others”..... 36

Figure II.8 : Vertical distribution of major species of living benthic foraminifera (>125 μm) in terms of faunal density (ind./50cm³) in the topmost 5 cm..... 37

Figure II.9 : Density of living (blue) and dead (orange) benthic foraminifera in the first centimetre of sediment for each station and each size fraction..... 38

Figure III.1 : Carte de présentation de la zone d'étude avec les positions des carottes issues des missions AMD14 et AMD15, l'étendue de la glace de mer en juillet 2014 et septembre 2015 (NSIDC; Fetterer et al., 2016) et une représentation schématique de la circulation océanique modifiée d'après Solignac et al. (2011)..... 49

Tableau III.1 : Informations sur les stations échantillonnées, la température et la salinité relevées aux profondeurs d'échantillonnage grâce à une sonde CTD ainsi que les valeurs de surface de Chl a issues du satellite MODIS Aqua. 53

Figure III.2 : Profils de température et salinité mesurés dans la colonne d'eau en juillet 2014 pour les stations Kane2B, 101, 115, 210, 204 et 200 et en octobre 2015 pour les stations BC1, BC3 et BC4. 56

Figure III.3 : Concentrations mensuelles de Chl. a (mg.m⁻³) pour A) juillet 2014 et B) septembre 2015. 58

Figure III.4 : Distribution des principaux paramètres environnementaux mesurés (D₅₀, C/N, TOC, TN, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, $\delta^{15}\text{N}$). 59

Figure III.5 : A) Proportion des espèces agglutinées et B) densité de foraminifères benthiques vivants par 100 cm ² pour chaque station étudiée.	62
Figure III.6 A) Proportions des espèces majeures de foraminifères benthiques vivants dans les 5 premiers centimètres de sédiment des carottes. Les densités totales exprimées en nombre d'individus vivants par 100 cm ² pour chaque station sont indiquées au centre des diagrammes. B) Distribution verticale des espèces majeures de foraminifères benthiques vivants présentée comme la densité des espèces par échantillon exprimée en nombre d'individus par 50 cm ³ en fonction de la profondeur dans la carotte.	63
Figure III.7 : Tests de l'espèce <i>M. barleeanus</i> prélevés dans les échantillons de la carotte Kane2B (a.) et 204 (b.) illustrant la différence de préservation des tests.....	67
Figure III.8 : Illustration du couvert de banquise dans le détroit de Narès en juillet 2015 (gauche), 214 (centre) et 2013 (droite) issue des images satellites MODIS Terra.	70
Figure IV.1 : Carte illustrant la bathymétrie, les principales structures topographiques de la zone d'étude, la circulation océanique de surface modifiée d'après Loeng et Drinkwater, 2007 et Lind et Ingvaldsen, 2011 (NwAC : Norwegian Atlantic Current ; NCaC : North Cape Current ; WSC : West Spitzbergen Current ; NwCC : Norwegian Coastal Current ; ESC : East Spitzbergen Current), la position du front polaire et la localisation des sept carottes étudiées (croix noires). Les points jaunes indiquent la position des stations de mesures CTD dans la colonne d'eau jusqu'à 600 m de profondeur sur un transect sur-nord tandis que les points blancs montrent la position des stations de mesures CTD effectuées jusqu'au fond de la colonne d'eau. La bathymétrie est issue de l'International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO – www.gebco.net).	77
Tableau IV.1 : Localisation des sites de carottages de l'étude.	80
Tableau IV.2 : Cadre chronologique (années calendaires AD) et taux de sédimentation (TS en mm/an) des 3 carottes/stations ayant fait l'objet d'une datation au ²¹⁰ Pb. Les âges entre parenthèses sont estimés à partir des taux de sédimentation calculés pour le sommet des carottes.	82
Figure IV.2 : Valeurs du ²¹⁰ Pb _{xs} et sa courbe de tendance ainsi que le modèle d'âge calculé pour chaque carotte.....	83
Figure IV.3 : Température (A), salinité (B) et concentration en Chl a (C) mesurés dans la colonne d'eau le long du profil nord-sud (Longitude autour de 14°E ; Latitude entre 69.45°N et 76.32°N) localisé dans la figure IV.1. Les mesures ont été réalisées depuis la surface jusqu'à 600 m de profondeur. Un zoom sur les 100 premiers mètres de la colonne d'eau (C) permet de visualiser en détail la distribution de la Chl. a. (D) Concentrations mensuelles de Chl. a (mg.m ⁻³) en Août 2014.....	85
Figure IV.4 : Profils de température et salinité aux stations 33, 34 et 35 (voir figure 1 pour localisation).	86
Figure IV.5 : Distribution des principaux paramètres environnementaux mesurés sur les 5 premiers centimètres du sédiment puis moyennés (D50, TOC, TN, C/N, δ13C, δ15N).	88
Figure IV.6 : Indices écologiques décrivant les assemblages de foraminifères benthiques vivants >125 µm observés pour chaque station.	89

Figure IV.7 : A) Proportion des espèces majeures de foraminifères benthiques vivants dans les 5 premiers centimètres de sédiment des carottes. Au centre des diagrammes, les densités totales sont exprimées en nombre d'individus vivants par 100 cm² pour chaque station. B) Distribution verticale des espèces majeures de foraminifères benthiques vivants présentée comme la densité de chaque espèce (ind./50 cm³) en fonction de la profondeur de sédiment associée au pourcentage de saturation en oxygène mesuré dans le sédiment de chaque carotte. 90

Figure IV.8 : Mesures XRF de l'intensité des éléments sélectionnés dans les carottes des stations Sts. 1, 2 et 6 en fonction de l'âge. L'abondance relative des espèces majeures de foraminifères benthiques fossiles est représentée sur la droite de la figure. Les bandeaux colorés soulignent les périodes de variations des conditions environnementales discutées dans cette étude. 92

Figure IV.9 : A) Localisations extrêmes au sud (ligne rouge, 1995) et au nord (ligne bleue, 1866) des bordures de glace au mois d'Avril relevées sur la période historique 1864-1998, modifié d'après Vinje, 2001. B) D'après Divine et Dick, 2006, moyennes d'étendues de glace de mer pour les mois d'Avril, Juin et Août à l'ouest de la mer de Barents pour la période 1750-2002 (points noirs). Les tendances linéaires pour les données historiques (1850-1966, lignes pointillées noires) et les données contemporaines (depuis 1967, lignes vertes) sont superposées à chaque figure. Les lignes rouges (continues et pointillées) présentent une moyenne lissée sur 11 ans. 97

Figure V.1 : Figure synthétique des principaux résultats de l'étude. Les trois cartes présentent pour chaque station, la localisation, la proportion d'espèces de foraminifères benthiques vivants calcaires et agglutinées et la densité relative des faunes. La glace de mer moyenne en août 2015 en mer de Chukchi et en Juillet 2014 en de Baffin sont indiquées par les surfaces transparentes. Des coupes schématiques pour chaque zone s'étude montre la distribution verticale et géographique des foraminifères benthiques vivants dans les conditions environnementales estivales. Les schémas présentent la répartition des masses d'eau, la direction des courants principaux et informent sur la présence de banquise et l'intensité de la productivité primaire. 111

Table des annexes

Annexe 1 : Planche de photographies MEB illustrant les espèces majeures observées en mer de Chukchi.	139
Annexe 2 : Planche de photographies MEB illustrant les espèces majeures observées dans la baie de Baffin et le détroit de Nares.	141
Annexe 3 : Planche de photographies MEB illustrant les espèces majeures observées en mer de Barents.	143
Annexe 4 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (> 125 µm) de la station 01A....	145
Annexe 5 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (> 125 µm et 63-125 µm) de la station 02.....	145
Annexe 6 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm et 63-125 µm) de la station 03.....	146
Annexe 7 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm et 63-125 µm) de la station 04.....	146
Annexe 8 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm et 63-125 µm) de la station 05.....	147
Annexe 9 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station Kane2B.	148
Annexe 10 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 101.....	148
Annexe 11 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 115.....	149
Annexe 12 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 200.....	149
Annexe 13 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 204.....	150
Annexe 14 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 210.....	150
Annexe 15 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station BC1. ...	151
Annexe 16 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station BC3. ...	151
Annexe 17 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station BC4. ...	152
Annexe 18 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 1.....	153
Annexe 19 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 2.....	154
Annexe 20 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 3.....	155
Annexe 21 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 4.....	156
Annexe 22 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 6.....	157
Annexe 23 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 9.....	158
Annexe 24 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 11.....	159
Annexe 25 : Comptages totaux de foraminifères benthiques morts (125 µm) de la station 1.	160
Annexe 26 : Comptages totaux de foraminifères benthiques morts (125 µm) de la station 2.	161
Annexe 27 : Comptages totaux de foraminifères benthiques morts (125 µm) de la station 6.	162
Annexe 28 : Poster présenté à la conférence Arctic Change 2017 (Québec).....	163
Annexe 29 : Poster présenté à la conférence Forams2018 (Edimbourg).	164

Chapitre I : Introduction générale

I.1 Objectifs de la thèse

L'Arctique est une région d'intérêt économique et écologique majeure. Le réchauffement climatique bouleverse cet environnement fragile depuis plusieurs décennies. Cela se manifeste par une réduction drastique du couvert de banquise, une augmentation des températures atmosphériques et océaniques et un apport d'eau chaude accéléré dans l'océan Arctique provenant de l'océan Atlantique et de l'océan Pacifique. La diminution de la banquise induit une baisse de l'albédo et une augmentation de l'absorption du rayonnement solaire engendrant une rétroaction positive du réchauffement de l'Arctique appelée « amplification polaire » qui freine la croissance de la glace en hiver et accélère sa fonte prématurée au printemps et en été. Le réchauffement climatique en Arctique impacte et perturbe également la biodiversité. Les travaux actuels de la communauté scientifique visent à mieux comprendre le fonctionnement de cet écosystème et son rôle dans le climat mondial et à surveiller l'évolution des perturbations environnementales en Arctique.

Cette thèse portant sur l'étude de l'écologie des foraminifères benthiques en domaine arctique s'inscrit dans ce contexte de l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur un des compartiments de la biosphère marine.

Les foraminifères benthiques sont largement représentés dans tous les environnements marins tant en terme d'abondance que de diversité. De plus, leur cycle de vie limité dans le temps, leurs exigences écologiques spécifiques et leur grande capacité de fossilisation font des foraminifères benthiques d'excellents bio-indicateurs environnementaux. Leur utilisation comme proxies des changements environnementaux nécessite une très bonne connaissance de leurs préférences écologiques. Les études sur l'écologie des foraminifères benthiques et les paramètres contrôlant leur distribution dans l'océan Arctique sont sporadiques et s'appuient trop souvent sur la distribution d'assemblages fossiles. L'objectif principal de cette thèse est donc de mieux comprendre l'écologie des foraminifères benthiques en domaine arctique, environnement caractérisé par des interactions complexes entre la terre, l'océan, l'atmosphère et la cryosphère, afin d'alimenter les connaissances et de parfaire l'utilisation de ces faunes comme outils paléocéanographiques et paléoclimatiques. Dans cette optique, les assemblages de foraminifères benthiques vivants (colorés au rose Bengale) sont discutés en relation avec les conditions environnementales définies par un large panel de paramètres physico-chimiques mesurés directement dans le milieu de vie.

Chapitre I

Plusieurs programmes de recherche français et internationaux ont permis de financer les missions océanographiques afin de collecter les matériels et les données nécessaires à ce travail de thèse, ainsi que diverses analyses. Cette thèse a ainsi bénéficié du soutien du projet INSU-LEFE ICCAR (Impact of Climate Change on Arctic benthic foraminifera), du consortium international GreenEdge (Canada, France et Danemark essentiellement), du programme canadien ArcticNet et d'un partenariat franco-coréen financé par campus France (PHC STAR) et la fondation coréenne pour la recherche.

Les études présentées dans ce manuscrit se focalisent sur trois régions contrastées de l'Arctique : la mer de Chukchi, la baie de Baffin et la mer de Barents. Vingt et une carottes sédimentaires d'interface réparties dans ces trois régions constituent le matériel sur lequel a été étudiée, dans le cadre de cette thèse, la distribution des foraminifères benthiques vivants en relation avec les conditions environnementales (Fig. I.1). Le travail portant sur chacune de ces régions fait l'objet d'un chapitre distinct rédigé sous la forme d'articles publiés ou en préparation. Le chapitre II est consacré à la distribution des foraminifères benthiques au nord de la mer de Chukchi, région située à l'intérieur de l'océan Arctique et où l'influence des eaux pacifiques est forte. Le chapitre III s'intéresse à la distribution des foraminifères benthiques en baie de Baffin où l'influence des eaux atlantiques est prépondérante et dans le détroit de Nares, zone beaucoup plus enclavée entre le Groenland et l'archipel arctique canadien. Dans ces régions de Chukchi, Baffin et Nares, l'impact de la glace de mer sur la distribution des faunes de foraminifères benthiques est essentiel. Le chapitre IV considère la distribution des foraminifères benthiques au niveau de la marge ouest de la mer de Barents, secteur en marge de l'océan Arctique mais largement influencé par les eaux plus chaudes de l'Atlantique. Une étude préliminaire retraçant, sur la base des assemblages de foraminifères benthiques fossiles, l'évolution de l'environnement de la mer de Barents au cours des deux derniers siècles, complète le chapitre IV. Enfin, un chapitre de synthèse présente un bilan des facteurs influençant la distribution des foraminifères benthiques arctiques en période estivale.

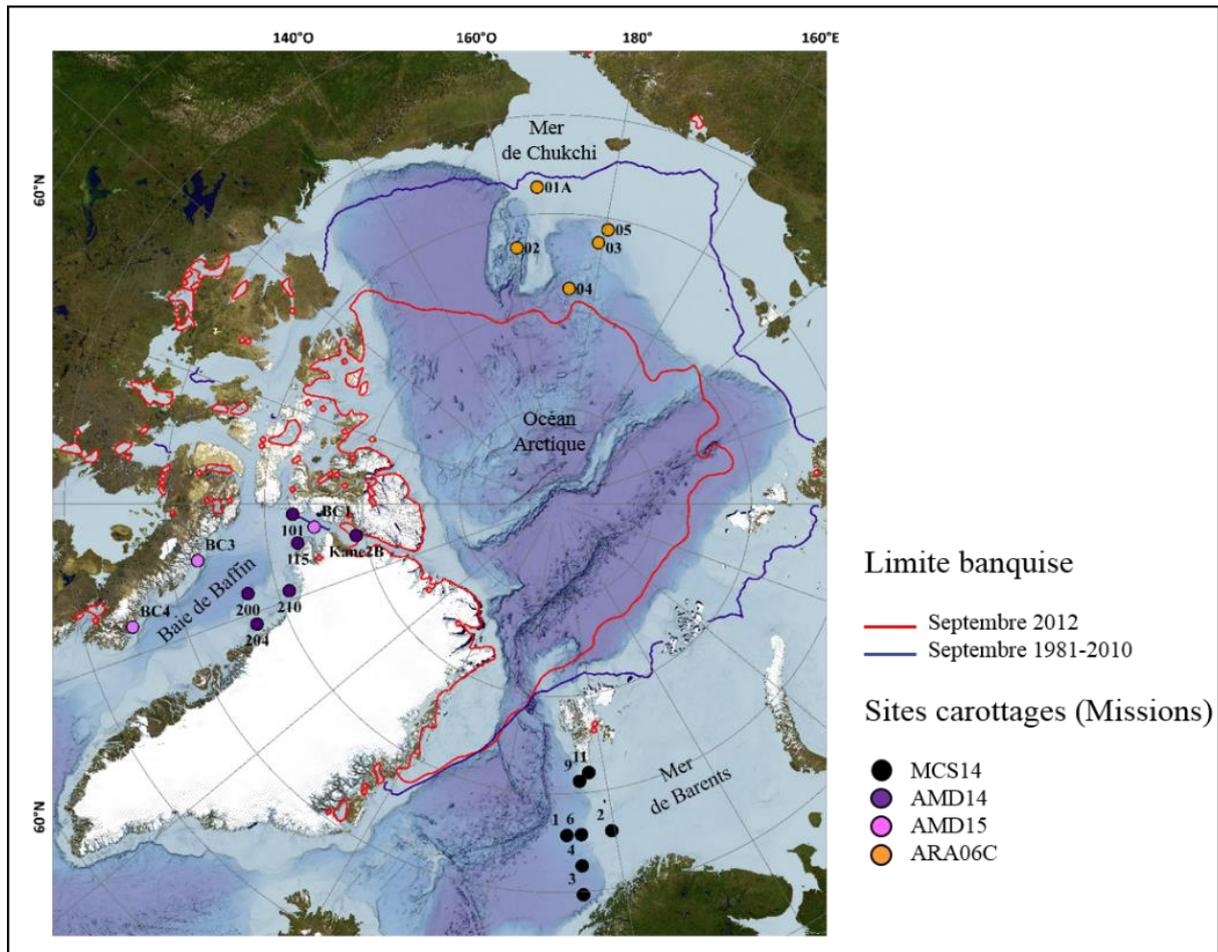


Figure I.1 : Carte topographique et bathymétrique de l'Arctique (IBCAO) présentant les différentes zones d'études de cette thèse, l'emplacement des sites de carottage et les limites d'étendue de banquise en septembre (2012 et moyenne 1981-2010).

I.2 L'Arctique : contexte environnemental

I.2.1 Généralités

Située à l'extrême nord de la Terre, l'Arctique, région sauvage et hostile, fascine depuis toujours chercheurs, explorateurs et aventuriers. Elle tire son nom du grec $\alpha\rho\kappa\tau\omicron\varsigma$ [arktos] signifiant « ours ». La rudesse du climat et l'imposante banquise ont longtemps compliqué son exploration. Au XVIII^{ème} siècle, dans le cadre de grandes expéditions du nord entreprises par la Russie, le physicien et philosophe russe Mikhaïl Lomonosov a proposé la première carte de l'Arctique plaçant un océan au pôle nord. Ce pionnier travailla également à décrire les différents courants océaniques affectant la région, à classifier les différents types de glace de mer et à expliquer le rôle du soleil comme source de chaleur en Arctique. Ce n'est qu'au milieu du XIX^{ème} siècle que les expéditions scientifiques arctiques s'intensifiaient sur fond de compétition entre explorateurs afin d'être le premier à atteindre le pôle nord ou à traverser les

Chapitre I

passages du nord-est et du nord-ouest. A partir des années 1970, les missions scientifiques se multiplient. Des études océanographiques géologiques, biologiques, chimiques et physiques sont rendues possibles grâce à de nouveaux navires brise-glaces, aux stations scientifiques installées sur la banquise et plus récemment à la mise en œuvre de véhicules autonomes sous-marins. Ces campagnes ont permis de cartographier précisément l'océan Arctique et de mieux comprendre son fonctionnement environnemental.

L'océan Arctique est, par différents aspects, l'océan le plus singulier du globe. Il est le plus petit et le moins profond des cinq océans mondiaux mais il joue un rôle essentiel dans la circulation océanique globale et la régulation du climat terrestre. Selon l'International Hydrographic Organisation (IHO), le domaine marin arctique est composé du bassin central profond, des mers épicontinentales adjacentes (Lincoln, Beaufort, Chukchi, Sibérie orientale, Laptev, Kara et Barents), des mers nordiques (Groenland, Norvège et Islande), de la mer du Labrador, de la baie de Baffin et d'Hudson, de l'archipel arctique canadien et de la mer de Béring. L'océan Arctique, encerclé par les continents américain et eurasien, est qualifié d'océan de type méditerranéen (Coachman et Aagaard, 1974). Les connexions avec les océans Pacifique via le détroit de Béring et Atlantique via le détroit de Fram et la mer de Barents sont limitées. Les plateaux continentaux, plutôt étroits en mer de Beaufort et bien plus étendus côté russe, représentent près de 50% de la surface de l'océan Arctique (Jakobsson., 2002). Le centre de l'océan Arctique est un système profond complexe divisé en quatre bassins par des structures topographiques nommées rides (Fig. I.2). Deux bassins principaux, le bassin canadien et le bassin eurasien, sont séparés par la ride Lomonosov. Chacun de ces bassins peut être subdivisé en deux. Le bassin du Canada est séparé du bassin Makarov par les rides Alpha et Mendeleev tandis que le bassin Amundsen et le bassin Nansen sont séparés par la ride Nansen Gakkel.

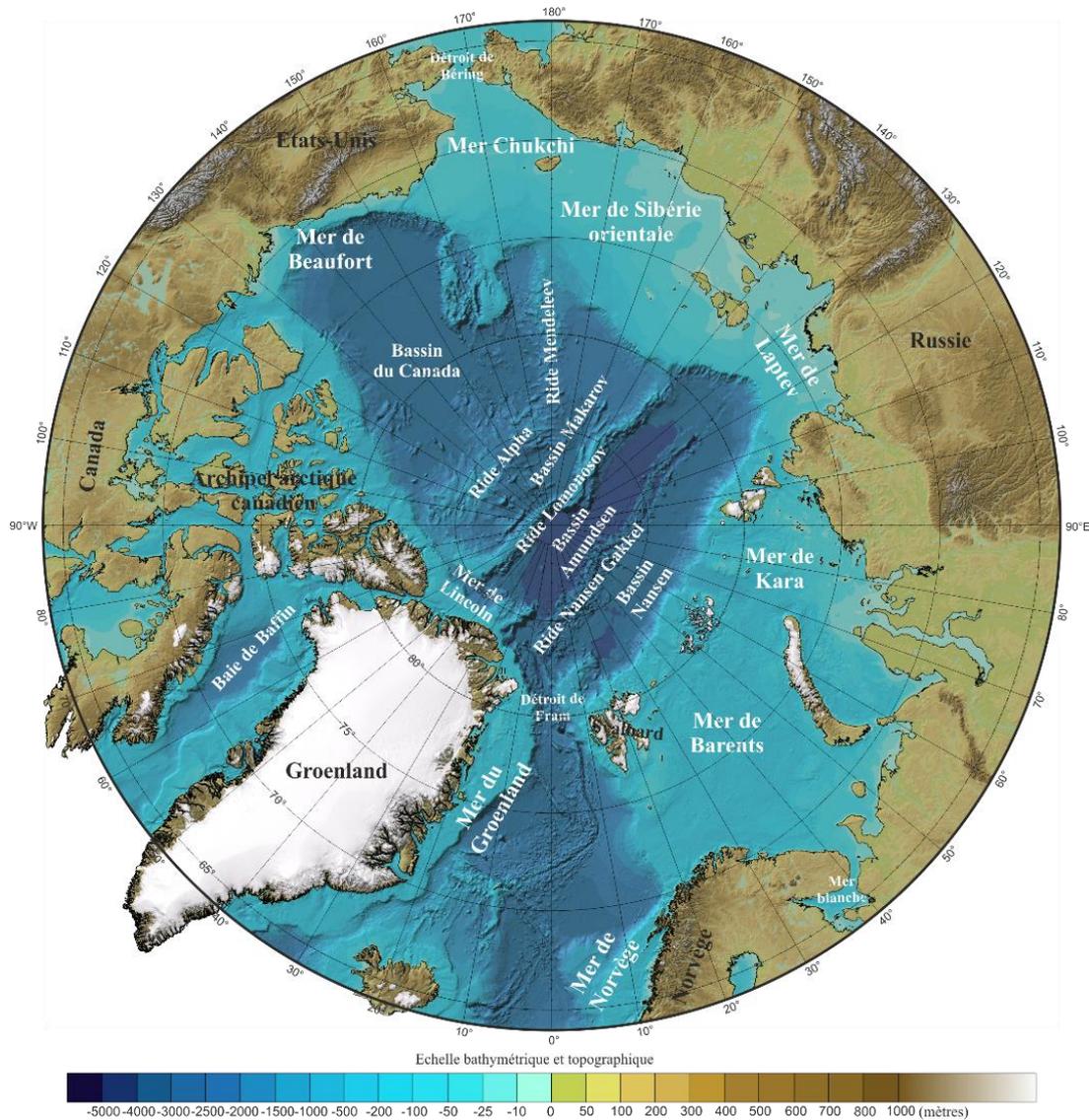


Figure 1.2 : Carte topographique et bathymétrique de l'Arctique (IBCAO version 3.0 ; Jakobsson et al., 2012).

I.2.2 Hydrologie

La circulation océanique dans l'océan Arctique est conditionnée par les transferts de chaleur entre les océans Pacifique, Atlantique et Arctique et les différences de densités des masses d'eau. Les caractéristiques atmosphériques telles que les oscillations Arctique (AO) et Nord Atlantique (NAO) influencent les deux principaux courants de surface emblématiques de l'océan Arctique, la gyre de Beaufort et la dérive transpolaire (TPD). La Figure I.3 illustre la circulation océanique de surface et intermédiaire en domaine arctique. Le volume moyen annuel d'eau pacifique entrant par le détroit de Béring représente 0,8 Sv (Roach et al., 1995) tandis que le volume d'eau atlantique entrant dans l'océan Arctique est beaucoup plus important, environ 3 Sv (Rudels et Friedrich, 2000). Les eaux arctiques de surface, froides, s'échappent de

l'océan Arctique en empruntant principalement les multiples chenaux de l'archipel arctique canadien (0,7-2,7 Sv ; Melling, 2000) et le détroit de Fram (3-3,5 Sv) en longeant la côte est groenlandaise. Une petite partie de cette eau arctique rejoint l'Atlantique Nord en passant par la mer de Barents. Les eaux intermédiaires majoritairement d'origine atlantique, contraintes par la bathymétrie, circulent le long des plateaux continentaux et forment des gyres entre les rides du bassin arctique.

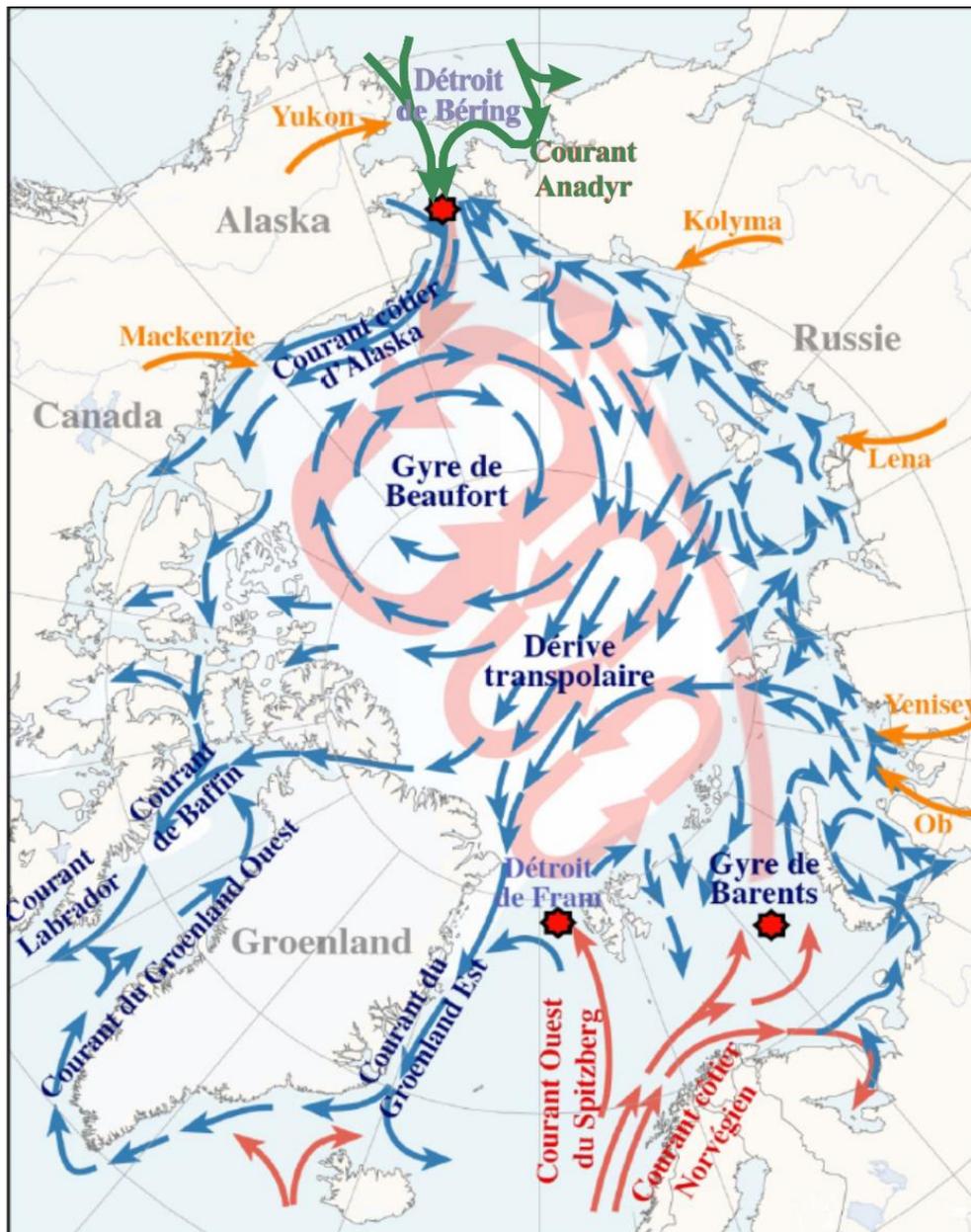


Figure I.3 : Schéma de circulation océanique des courants de surface et intermédiaires. En bleu la circulation de surface des eaux arctiques, en rouge la circulation de surface des eaux atlantiques, en vert la circulation de surface des eaux pacifiques, en orange les principaux fleuves. Les flèches rouge pâles représentent la circulation intermédiaire dans l'océan Arctique. Les étoiles rouges matérialisent les zones de pénétration en subsurface des eaux atlantiques et pacifiques dans l'océan Arctique. Modifié d'après Rudels et al., 2012.

Verticalement, l'océan Arctique est structuré en trois parties principales : la masse d'eau de surface arctique, la masse d'eau atlantique intermédiaire et la masse d'eau profonde arctique (Fig. I.4). L'eau de surface arctique, présente sur environ 200 m, se subdivisent en deux couches aux caractéristiques bien distinctes. La couche polaire de mélange (*Polar Mixed Layer* ; PML) est une masse d'eau de faible densité, très peu salée, d'une cinquantaine de mètres à la surface de l'océan Arctique. Les eaux fluviales, la fonte des glaces et les précipitations sont responsables de l'établissement de cette couche d'eau de surface polaire. Les eaux pacifiques et atlantiques plus salées et donc plus denses sont advectées sous la PML jusqu'à une profondeur maximum d'environ 200 m formant les haloclines pacifiques et atlantiques (Jones et Anderson, 1986 ; Aagaard et Carmack, 1989). Ces couches aux densités contrastées engendrent une stratification marquée de la masse d'eau de surface arctique. Entre 200 et 900 m de profondeur s'établit la masse d'eau atlantique intermédiaire, relativement chaude et salée, issue du plongement des eaux denses sous la couche de surface au nord de l'archipel du Spitzberg. Enfin, les eaux profondes arctiques dans les bassins canadien et eurasien, se différencient notamment par leur température et sont séparées par la ride Lomonosov. L'écoulement de ces masses d'eau dans les abysses est particulièrement lent (Melling et al., 1984 ; Aagaard, 1989). Des processus de convection dans les couches supérieures de l'océan Arctique permettent le renouvellement de ces eaux profondes. En hiver, lorsque l'environnement se refroidit et que la banquise se forme, le sel contenu dans l'eau de surface est rejeté, augmentant la salinité des eaux sous-jacentes (*brine rejection*). Les températures froides et la salinité élevée augmentent la densité de la masse d'eau entraînant son plongement le long des pentes continentales rejoignant les abysses et les eaux de fond arctiques.

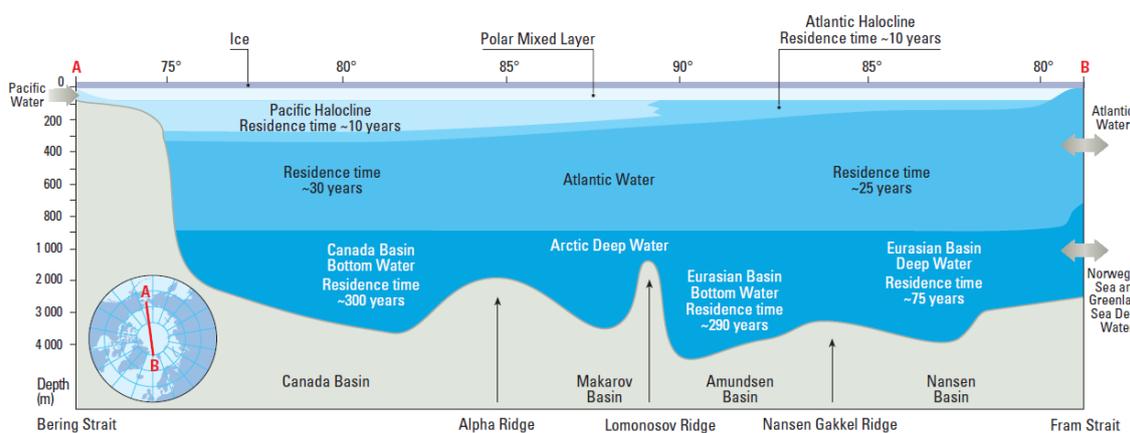


Figure I.4 : Profil le long d'un transect du détroit de Béring au détroit de Fram schématisant la distribution verticale des masses d'eau dans l'océan Arctique (Aagaard et Carmack, 1989) et leur temps de résidence moyen (Bönisch et Schlosser, 1995). D'après AMAP, 1998.

I.2.3 Glace de mer

La cryosphère est une composante importante de l'Arctique, constituée de neige, glaciers, inlandsis, banquise et pergélisol permanent ou temporaire. Ces surfaces englacées influencent directement et indirectement le climat mondial et régional par des phénomènes de rétroactions. La glace de mer en particulier réduit significativement les échanges de flux de chaleur entre l'océan et l'atmosphère et impacte le budget radiatif de l'Arctique par sa forte capacité de réflectance. En effet, l'albédo de l'eau (0,1) est beaucoup plus faible que celui de la glace (0,6-0,8) qui renvoie ainsi les radiations à l'atmosphère (60 à 80 %) et limite les transferts de chaleur. Le couvert de banquise affecte également l'écosystème marin et la production primaire en limitant les apports d'énergie lumineuse.

En Arctique, la glace de mer peut-être saisonnière ou pérenne. Comme son nom l'indique, la glace de mer saisonnière se forme en automne et fond au printemps, se renouvelant chaque année au niveau des plateaux continentaux. Les tempêtes de fin d'été jouent un rôle primordial dans le processus de prise en glace en facilitant l'extraction de chaleur de l'océan. Plusieurs types de glace de mer saisonnière sont référencées selon la période de l'année, le mode de formation ou encore la localisation. En hiver, l'océan Arctique est entièrement recouvert de banquise, étendue sur environ 14 millions de km² (Fig. I.5A). En été, seules les glaces pérennes persistent au centre de l'océan Arctique et ne représentent qu'environ 6 millions de km² (Fig. I.5B). La dynamique saisonnière et interannuelle de la banquise répond très sensiblement aux changements de température, de circulations atmosphériques et océaniques, de variations d'énergie lumineuse et de flux de chaleur. Les courants de surface entraînent la circulation de la banquise. La gyre de Beaufort accumule la glace au centre de l'Arctique tandis que la TPD transporte la glace vers les mers du Groenland et de Norvège via le détroit de Fram. En moyenne, 10 % de cette glace de mer s'échappe de l'océan Arctique chaque année.

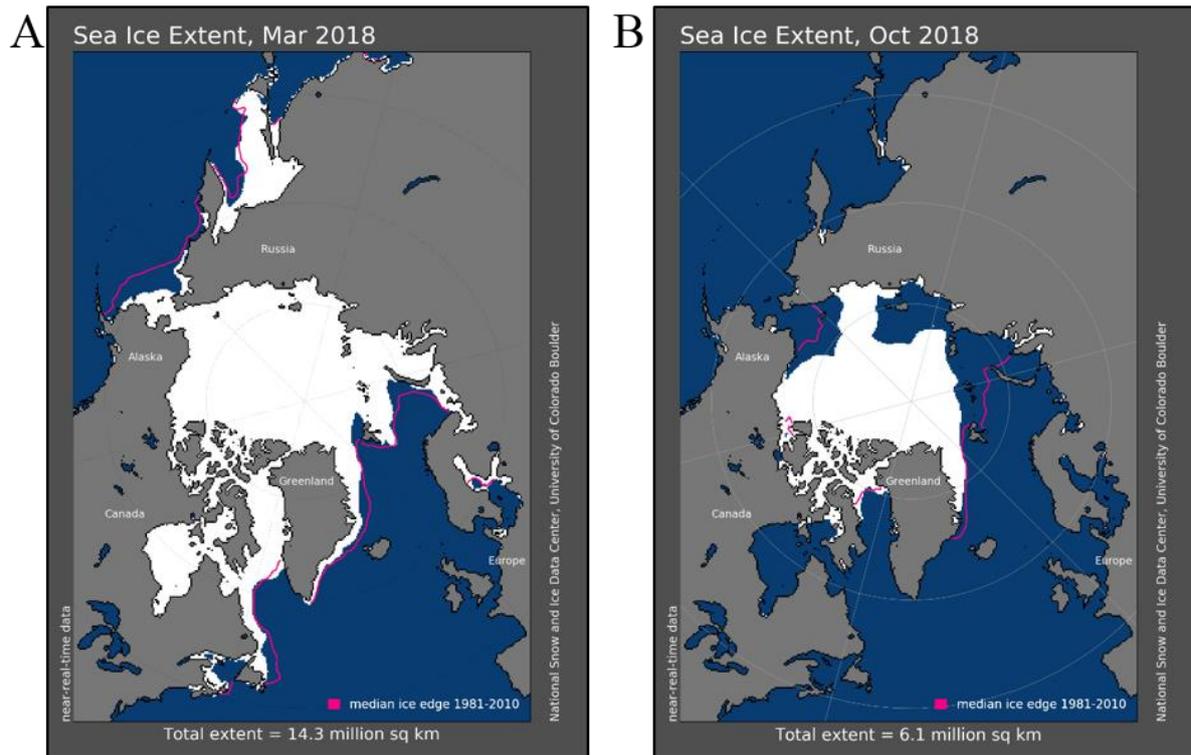


Figure 1.5 : Etendue respectivement maximale et minimale de la banquise (A) en mars 2018 et (B) en octobre 2018 (NSIDC).

I.2.4 Productivité primaire

Longtemps considéré comme peu productif du fait des faibles températures, des radiations solaires limitées et du couvert de banquise, l’océan Arctique est en réalité un système biologiquement actif comme l’ont montré plusieurs études menées depuis la fin des années 1990 (Gosselin et al., 1997 ; Wheeler et al., 1997 ; Gradinger, 1999 ; Agatova et al., 1999 ; Bussmann et Kattner, 2000). La production biologique marine en Arctique est basée sur les algues unicellulaires microscopiques dans la colonne d’eau (phytoplancton) et les microalgues associées à la glace de mer. Ces algues sont des organismes phototrophes produisant leur matière organique à partir de la photosynthèse. Elles constituent la maille élémentaire de la chaîne alimentaire marine par le flux de matière organique qui en résulte. Seule une petite partie de cette matière organique atteint l’écosystème benthique. La productivité primaire en Arctique présente des disparités régionales et saisonnières importantes (Fig. I.6A) en raison des variations des paramètres limitants que sont l’énergie lumineuse et les apports de nutriments (nitrate, phosphate et silicate). Les blooms phytoplanctoniques sont amorcés au printemps lorsque la glace de mer commence à fondre laissant passer la lumière et les masses d’eau chargées en nutriments. Cette efflorescence phytoplanctonique se maintient pendant l’été puis perd en intensité au fur et à mesure de l’épuisement de la disponibilité en nutriments. En

Chapitre I

automne et en hiver, la nuit polaire et l'expansion du couvert de banquise ralentissent considérablement la production primaire. Les masses d'eau se réapprovisionnent en nutriments permettant ainsi d'alimenter un nouveau cycle saisonnier.

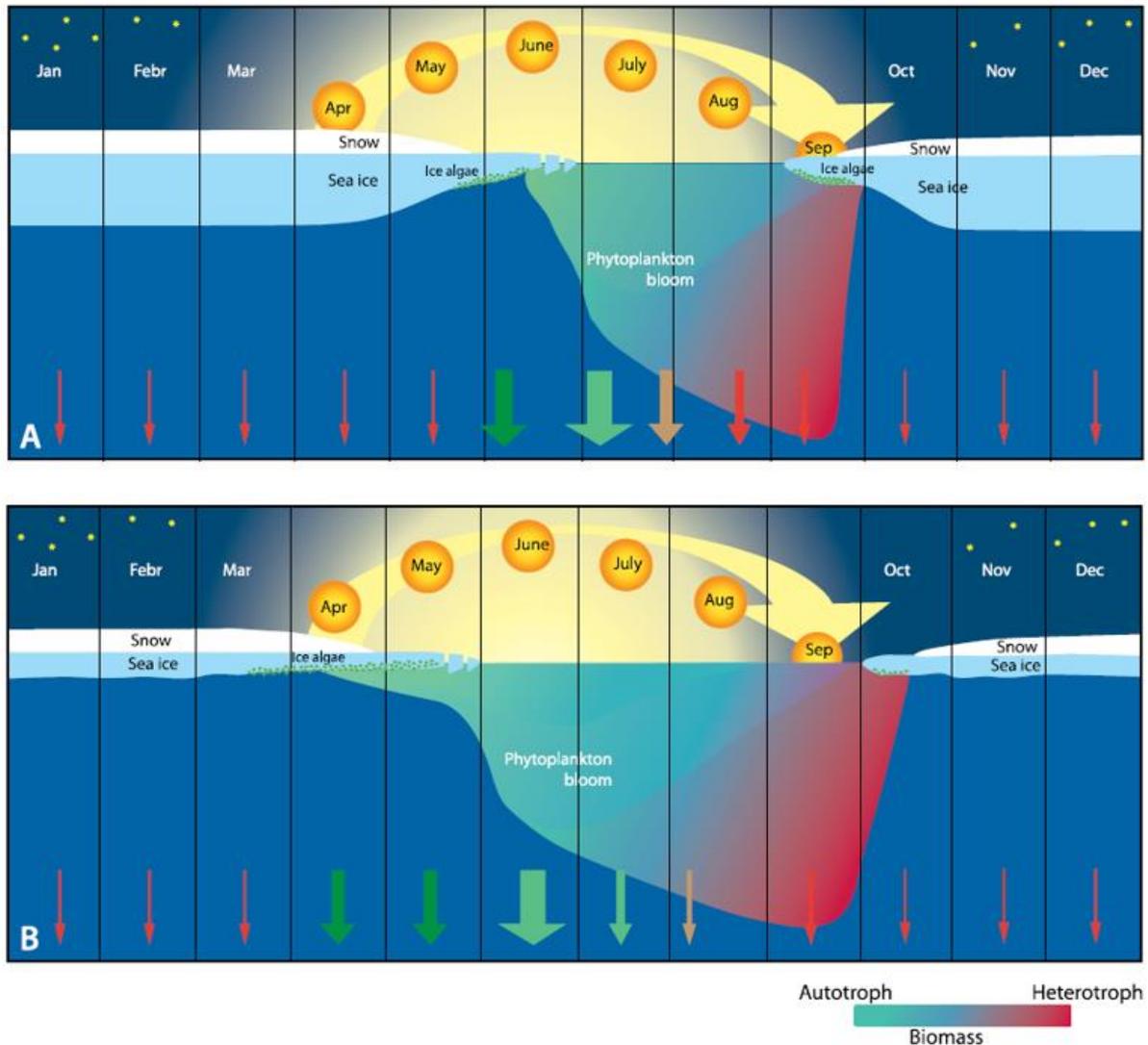


Figure I.6 : Schéma représentatif de la saisonnalité de la productivité primaire et de l'export de matière organique (A) dans le contexte actuel (B) dans un contexte futur avec un climat plus chaud, une épaisseur de glace plus faible en hiver et une fonte plus importante de la banquise en été. Dans la colonne d'eau, le gradient de couleur passant du vert au rouge qualifie la biomasse majoritairement autotrophe au printemps et en été puis hétérotrophe à la fin de l'été. La largeur et la couleur des flèches illustrent l'ampleur et la composition de la matière organique exportée : en vert foncé le carbone dérivé des algues de glace, en vert clair le carbone dérivé du phytoplancton d'océan ouvert et en orangé et rouge l'augmentation du degré de détrit. (Wassmann et Reigstad, 2011).

La production primaire s'effectue principalement en bordure de glace de mer dans la zone marginale de glace, au niveau des fronts hydrographiques ou dans les polynies, zones particulières d'eau libre entourées par les glaces. Les polynies arctiques sont souvent qualifiées d'oasis pour l'écosystème arctique. Par ailleurs, les deux régions les plus productives de l'Arctique sont la mer de Chukchi et la mer de Barents (Fig. I.7). La mer de Chukchi présente une productivité intense au printemps dans la zone marginale de glace (jusqu'à $400 \text{ gC/m}^2/\text{an}$) occasionnée par l'augmentation de l'irradiance et de l'influx d'eau pacifique riche en nutriments (Sakshaug, 2004). Une étude récente (Arrigo et al., 2014) a révélé l'existence de blooms phytoplanctoniques intenses sous la banquise de la mer de Chukchi. Toutefois, l'état de cette banquise est particulier, d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 1,8 mètres avec des « *melt ponds* » en surface favorisant la transmission de la lumière à travers la banquise. En mer de Barents, un front hydrologique marqué par la rencontre entre les eaux atlantiques et les eaux arctiques induit un brassage de la colonne d'eau engendrant la remontée en surface d'éléments minéraux séquestrés en profondeur permettant d'alimenter la productivité primaire dans la région. La productivité moyenne annuelle de l'océan Arctique est d'environ $26 \text{ gC/m}^2/\text{an}$ ce qui conduit à un flux de matière organique fraîche d'environ 330.10^6 T/an (Sakshaug, 2004).

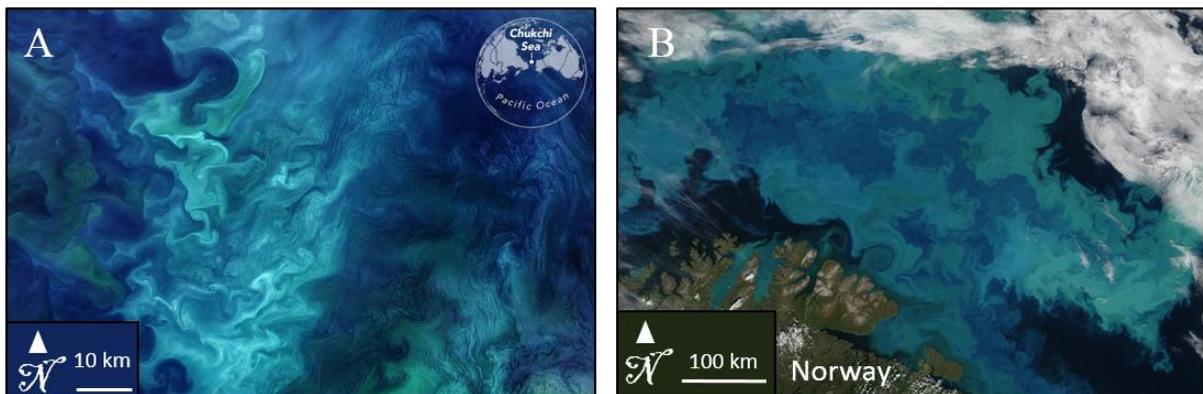


Figure I.7 : Images satellites AquaMODIS d'efflorescences algaires (A) en mer de Chukchi et (B) en mer de Barents (NASA).

I.2.5 Réchauffement climatique actuel

Le XX^{ème} siècle est marqué par un réchauffement climatique qui suit la période froide du Petit Age Glaciaire (PAG). En Arctique, les températures moyennes ont augmenté deux fois plus vite que les températures moyennes mondiales au cours des dernières décennies. Ces changements observés peuvent être imputés à des processus naturels mais également aux activités humaines responsables de l'augmentation importante de la concentration des gaz à

effet de serre dans l'atmosphère. L'océan est une composante primordiale dans la régulation du réchauffement climatique, absorbant plus de 80 % de la chaleur ajoutée au système climatique.

Une grande partie de la variabilité du climat arctique peut être expliquée par l'influence des oscillations atmosphériques naturelles de l'hémisphère nord et d'un fort couplage océan-atmosphère (Macdonald et al., 2004). Ces variations atmosphériques sont liées à la localisation et à l'intensité des cellules de hautes et basses pressions, conditionnant les vents et les courants marins dominants, les précipitations, les températures, la distribution des masses d'eau et le couvert de glace. L'Arctique est sous l'influence principale de l'AO et de la NAO (Fig. I.8).

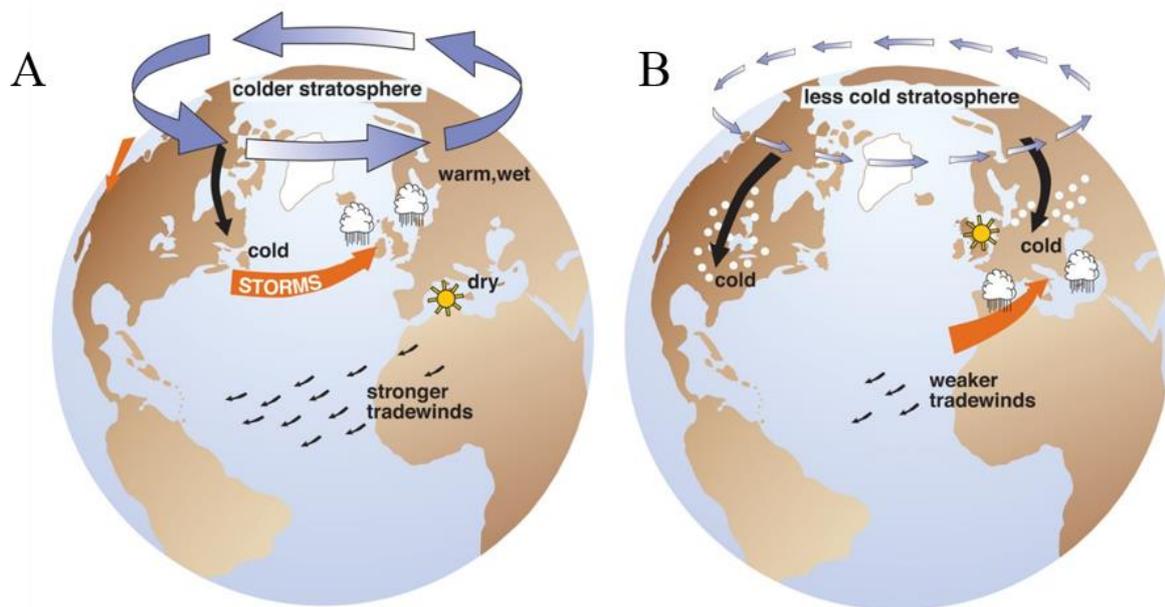


Figure I.8 : Impacts climatiques en hémisphère nord des phases (A) positives et (B) négatives du couple AO/NAO (NSIDC ; J. Wallace, University of Washington).

En phase négative, la gyre de Beaufort est renforcée, concentrant la glace de mer au centre de l'Arctique (Fig. I.9 gauche). A l'inverse en phase positive, la gyre de Beaufort est affaiblie et la TPD renforcée impliquant un export de glace plus important par le détroit de Fram (Fig. I.9 droite) mais également une infiltration accrue d'eau chaude et salée provenant de l'Atlantique dans le bassin arctique. L'indice AO/NAO particulièrement fort à la fin des années 1980 et durant les années 1990 aurait une incidence sur les changements climatiques drastiques qui impactent la région arctique (Macdonald et al., 2004). Côté Pacifique Nord, d'autres phénomènes climatiques tels que l'oscillation décennale pacifique (PDO), l'oscillation nord (NO) ou encore l'oscillation australe El Niño (ENSO) agissent sur la température de surface de la masse d'eau pacifique entrant dans l'océan Arctique par le détroit de Béring (Trenberth et Hurrell, 1994 ; Francis et al., 1998 ; Hare et Mantua, 2000 ; Stabeno et Overland, 2001).

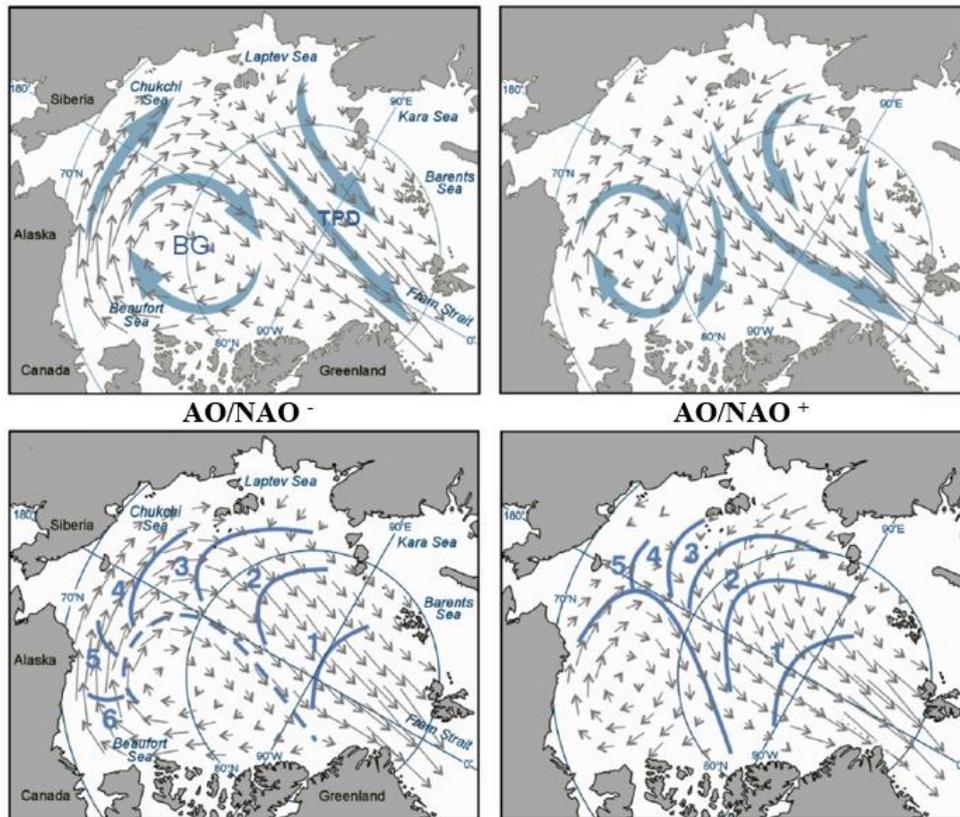


Figure I.9 : Schémas de dérive générale de la glace de mer (haut) et nombre d'années pour que la glace rejoigne le détroit de Fram (bas) en conditions AO/NAO fortement négative (gauche) et fortement positive (droite), d'après Macdonald et al., 2004.

Pourtant, les variabilités naturelles des composantes atmosphériques du climat ne permettent pas d'expliquer entièrement la rapidité et l'intensité du réchauffement climatique actuel d'autant plus amplifié en Arctique. En effet, les données satellites disponibles depuis 1978 montrent une diminution annuelle de la glace de mer d'environ 3 % par décennie avec un recul beaucoup plus marqué en été d'environ 7 % par décennie (Fig. I.5). L'année 2012 détient le record de minimum d'étendue de banquise jamais enregistré. La forte amplitude des réponses au réchauffement observées en Arctique depuis le milieu du XXème siècle engage la responsabilité des activités anthropiques et non pas uniquement les forçages naturels du climat. De multiples études scientifiques s'intéressent aux bouleversements écologiques que produit ce réchauffement sur l'écosystème marin arctique. La productivité primaire notamment, à la base de la chaîne alimentaire, a subi de forts changements avec une augmentation nette annuelle de 30 % dans l'océan Arctique entre 1998 et 2012 avec cependant des disparités régionales importantes (Arrigo et Van Dijken, 2015). La réduction du couvert de glace de mer ainsi que de son épaisseur et l'allongement du nombre de mois sans couverture de banquise sur les plateformes continentales impacteraient les périodes de blooms phytoplanctoniques dans leur durée (Fig. I.6B).

I.3 Foraminifères benthiques

I.3.1 Généralités

Les foraminifères (du latin foramen) sont des micro-organismes unicellulaires eucaryotes, ubiquistes dans tous les environnements aquatiques et caractérisés par une coquille protectrice appelée test, formée de loges et munies d'un ou plusieurs orifices (foramens) qui relie ces loges au milieu extérieur. Ce sont des protistes apparus au Cambrien et extrêmement abondant depuis des centaines de millions d'années, colonisant de nombreuses niches écologiques, depuis les marais saumâtres jusqu'aux plaines abyssales oligotrophes (Murray, 2006). Il existe deux types de foraminifères : les foraminifères planctoniques qui colonisent la zone photique de la colonne d'eau et les foraminifères benthiques, objets d'étude principaux de cette thèse, qui vivent à l'interface eau-sédiment ou dans les premiers centimètres de la couche sédimentaire. Leur test peut être de nature carbonatée (calcite ou aragonite minéralisées par l'organisme), agglutinée (agencement d'éléments clastiques d'origine biogène ou terrigène issu du milieu sédimentaire) ou organique. Les études sur les foraminifères se sont développées au XIX^{ème} et XX^{ème} siècle grâce aux travaux de scientifiques naturalistes comme Dujardin, d'Orbigny, Williamson, Carpenter, Cushman ou encore Brady. La classification systématique assigne les foraminifères à l'embranchement des Granuloreticulosa, au règne des Protocista et à la classe des Foraminifera (Sen Gupta, 1999). La détermination des espèces se base sur une méthode de classification phénotypique depuis les études pionnières sur les foraminifères. Ce type de classification repose sur la morphologie du test en utilisant plusieurs critères tels que la composition du test, l'arrangement des loges, la structure des cloisons et des ouvertures. De nos jours, environ 40 000 espèces de foraminifères planctoniques et benthiques, vivants et fossiles, ont été répertoriées. Une classification phylogénétique basée sur l'étude de l'ADN des organismes est en cours d'établissement (e.g, Pawlowski et al., 1994 ; Pawlowski, 2000 ; Schweizer et al., 2005, 2008 ; Longet et Pawlowski, 2007) et révèle une diversité spécifique beaucoup plus importante que ne le laisse supposer la classification phénotypique classique actuelle (Loeblich et Tappan, 1988 ; Sen Gupta, 1999). Les foraminifères disposent d'une grande capacité de fossilisation, dépendante de la nature du test et des conditions physico-chimiques du milieu sédimentaire. Ce fort pouvoir de fossilisation combiné à la répartition géographique exceptionnelle de ces espèces leur confère une importance écologique et paléoécologique majeure. Les foraminifères sont largement utilisés comme outil

micropaléontologique pour les études paléocéanographiques, paléobathymétriques, paléoclimatologiques et biostratigraphiques.

Les foraminifères benthiques sont des organismes organo-hétérotrophes, dotés de pseudopodes, extensions du protoplasme, qui ressortent par les forams et les pores et leur permettent d'interagir avec leur environnement pour la préhension, l'alimentation ou le déplacement. Ils adoptent différentes stratégies trophiques pour se procurer leur source d'énergie issue du carbone de la matière organique décantant dans la colonne d'eau et contenue dans le sédiment. Ces stratégies trophiques conditionnent les microhabitats des espèces benthiques. Les organismes suspensivores captent les particules en suspension ou entraînées par les courants de fond. Ces espèces vivent à l'interface eau-sédiment et sont qualifiées d'épifaunes. Elles comportent les espèces épiphytes vivant posées sur le sédiment (épibiontes) ou fixées sur des éléments biogènes ou lithiques (épilithes) et les endofaunes superficielles vivant à quelques millimètres sous l'interface eau-sédiment. Les déposivores assimilent les particules déposées sur le sédiment. Les détritivores se nourrissent de particules enfouies au sein du sédiment et caractérisent les endofaunes intermédiaires et profondes. Ces dernières espèces s'accommodent d'une source de matière organique plus dégradée et tolèrent un milieu faiblement oxygéné voire anoxique. Enfin, certaines espèces vivant relativement profondément dans le sédiment sont bactériophages ou développent des relations symbiotiques avec des microalgues (Lee et al., 1995) ou des bactéries chimiolithotrophes (e.g., Bernhard, 2003) qui pré-dégradent le matériel organique (Fontanier et al., 2002). La nutrition des foraminifères benthiques via l'apport de matière organique est essentielle à leur développement et est souvent considérée comme étant un facteur limitant. La durée de vie des foraminifères benthiques varie de plusieurs semaines dans la grande majorité des cas à plusieurs mois dans des conditions particulièrement favorables.

I.3.2 Les foraminifères benthiques comme bio-indicateurs environnementaux

Les foraminifères benthiques sont intimement liés aux conditions environnementales de leur milieu de vie et aux paramètres physico-chimiques du sédiment constituant leurs microhabitats (e.g., Corliss, 1985). La distribution des faunes est contrôlée par divers paramètres biotiques et abiotiques dont la température, la salinité, la concentration en oxygène dans le sédiment et les eaux interstitielles, la qualité et la quantité de matière organique disponible, le pH, la granulométrie des sédiments, l'intensité des courants, et la teneur en carbonate dans l'eau (e.g., Gooday, 2003 ; Jorissen et al., 2007). Deux paramètres que sont la

pénétration de l'oxygène dans le sédiment et le flux et la disponibilité en matière organique ont été décrits comme prépondérant dans la distribution des organismes au sein du sédiment. Le modèle TROX (TRophic et OXYgen) établi par Jorissen et al. (1995) explique la répartition verticale des foraminifères benthiques en fonction de ces paramètres (Fig. I.10).

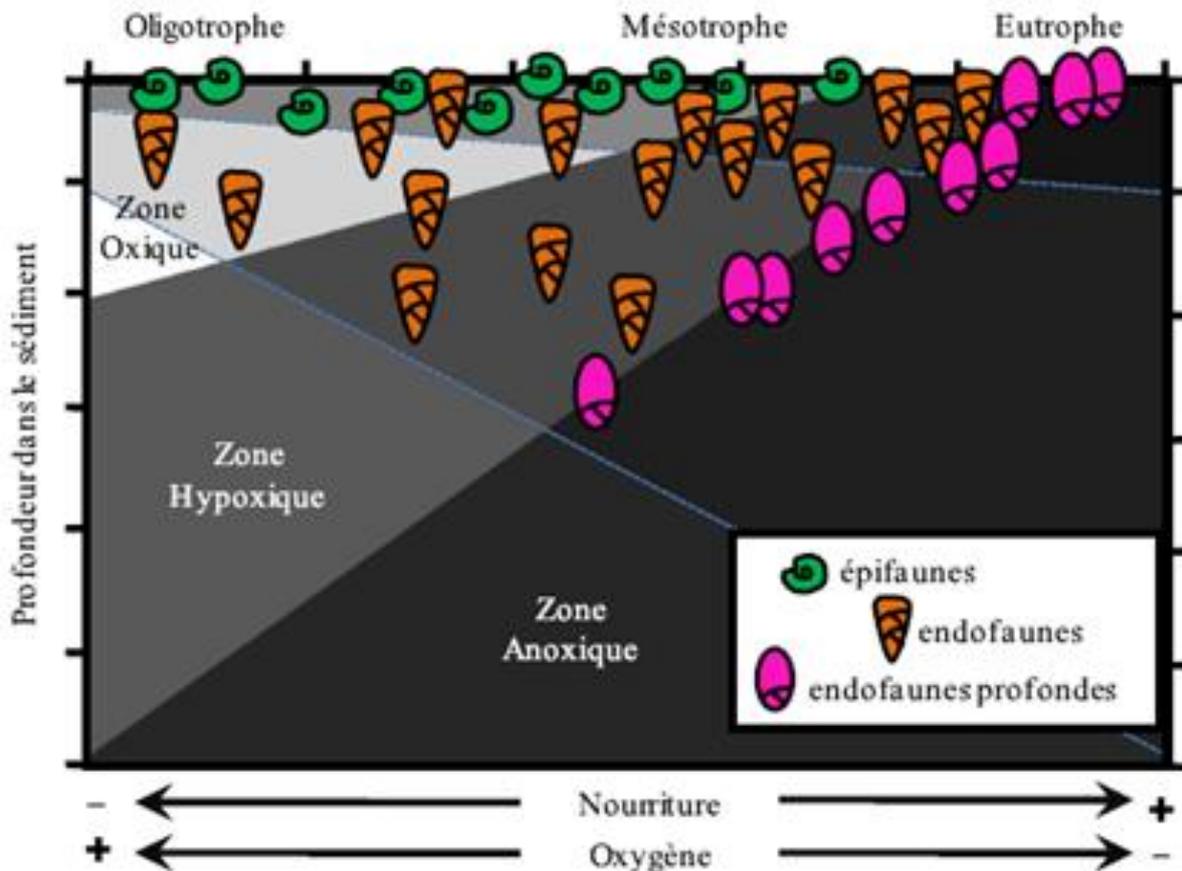


Figure I.10 : Modèle TROX représentant les microhabitats des foraminifères benthiques en fonction des paramètres de disponibilité en nourriture et d'oxygénation du sédiment (d'après Jorissen et al., 1995).

Les gradients de nourriture et d'oxygène sont opposés du fait de deux facteurs principaux : la granulométrie (un sédiment argileux facilite l'adsorption de matière organique et restreint la pénétration de l'oxygène à l'inverse d'un sédiment plus sableux) et la minéralisation de la matière organique consommant préférentiellement l'oxygène avant tout autre processus anaérobie. Dans les milieux oligotrophes, la matière organique est rapidement assimilée en surface et le sédiment est bien oxygéné en profondeur. Les espèces épifaunes peuvent s'adapter à ces milieux limités en nourriture. En milieu eutrophe, le flux de matière organique et la consommation en oxygène sont beaucoup plus importants. Les espèces endofaunes profondes s'adaptent à ce genre de milieu de par leur capacité à tolérer de faibles teneurs en oxygène notamment grâce la dénitrification intracellulaire (e.g., Risgaard-Petersen

et al., 2006, Piña-Ochoa et al., 2010). Les milieux qualifiés de mésotrophes sont caractérisés par un état moyen situé entre les conditions oligotrophes et eutrophes. La profondeur de vie des foraminifères benthiques y est maximale et la répartition des différents types d'espèces suit la logique des microhabitats de surface, intermédiaires et profonds. Depuis une trentaine d'années, de plus en plus d'études viennent préciser l'écologie des foraminifères benthiques en associant diverses données physico-chimiques mesurées dans le milieu de vie aux assemblages de faunes vivantes. Ces études ont montré notamment que l'oxygène n'est pas un paramètre limitant le développement des foraminifères benthiques car un certain nombre d'espèces tolèrent l'anoxie et utilise la dénitrification pour minéraliser la matière organique (e.g., Risgaard-Petersen et al., 2006, Piña-Ochoa, 2010). La qualité nutritionnelle et l'état de dégradation de la matière organique serait également un facteur d'influence majeur de la distribution des foraminifères benthiques (e.g., Rathburn et Corliss, 1994 ; Licari et al., 2003 ; Fontanier et al., 2008).

Les foraminifères benthiques sont sensibles aux conditions environnementales de leur milieu de vie et répondent rapidement aux variations des paramètres déstabilisant leur biotope. La grande représentativité géographique ainsi que l'importante biodiversité de ce groupe et les exigences écologiques propres à chaque espèce font des foraminifères benthiques d'excellents bio-indicateurs pour tracer les changements environnementaux liés par exemple aux pollutions anthropiques ou aux variations du climat. Cependant, il est nécessaire d'affiner les connaissances sur leurs préférences écologiques afin de parfaire leur utilisation comme bio-indicateurs environnementaux.

I.3.3 Les foraminifères benthiques en Arctique

En Arctique, les foraminifères benthiques prolifèrent dans un environnement complexe soumis à des changements climatiques et environnementaux drastiques. Les études traitant de l'écologie des foraminifères benthiques sont peu nombreuses et éparpillées dans la région arctique (e.g., Schröder-Adams et al., 1990 ; Bergsten, 1994 ; Hald et Steinsund, 1996 ; Wollenburg et Mackensen, 1998a, 1998b ; Wollenburg et Kuhnt, 2000 ; Scott et al., 2008 ; Saher et al., 2009, 2012 ; Husum et al., 2015). Il a longtemps été admis que les propriétés physico-chimiques des masses d'eau et la bathymétrie contrôlaient la distribution des faunes (Streeter, 1973 ; Lagoe, 1977 ; Lohmann, 1978 ; Belanger et Streeter, 1980). Cependant, des études plus récentes ont révélé l'importance des apports de nourriture et du flux de matière organique au domaine benthique sur la composition des populations de foraminifères benthiques en Arctique (e.g., Wollenburg et Kuhnt, 2000). Les saisons marquées, la dynamique de la glace de mer ou encore

Chapitre I

la circulation des masses d'eau conditionnent la productivité primaire et donc indirectement, le flux de matière organique. Les assemblages de foraminifères benthiques fossiles sont utilisés comme proxy pour les études paléocéanographiques et paléoclimatiques s'intéressant à reconstruire l'évolution du couvert de banquise ou de la circulation des masses d'eau. Une particularité affectant les foraminifères benthiques arctiques est la dissolution des carbonates observée principalement au niveau des marges continentales soumises à la dynamique saisonnière de la glace de mer (e.g., Schröder-Adams et al., 1990 ; Ishman et Foley, 1996 ; Hald et Steinsund, 1996). Ce processus de dissolution des carbonates, qu'il soit diagénetique ou non, peut biaiser l'enregistrement des assemblages fossiles.

Les différentes études écologiques citées précédemment ont permis de mettre en évidence plusieurs espèces de foraminifères benthiques calcaires caractéristiques des environnements arctiques (Tableau I.1).

Tableau I.1 : Résumé des préférences environnementales des espèces de foraminifères benthiques calcaires communément observées en Arctique et en Atlantique Nord.

Espèces	Préférences environnementales et masses d'eau	Microhabitats	Références
<i>Cassidulina neoteretis</i>	Atlantique nord	Endofaune superficielle opportuniste Environnement riche en matière organique fraîche	e.g. Gooday and Lambshead, 1989 ; Jennings et al., 2004 ; Mackensen and Hald, 1988
<i>Cibicidoïdes lobatulus</i>	Atlantique Sédiment sableux Courants forts	Epifaune Suspensivore Tolère les environnements pauvres en matière organique	e.g. Nyholm, 1961 ; Mackensen et al., 1985 ; Hald and Steinsund, 1992 ; Steinsund, 1994
<i>Melonis barleeanus</i>	Atlantique Sédiment fin	Endofaune Matière organique dégradée	e.g. Mackensen et al., 1985 ; Hald and Steinsund, 1992, 1996 ; Linke and Lutze, 1993 ; Steinsund, 1994 ; Fontanier et al., 2002
<i>Buccella</i> spp.	Arctique Plateforme Banquise saisonnière	Apports épisodiques de phytodétritus	e.g. Hald and Korsun, 1997 ; Hald and Steinsund, 1992 ; Korsun and Hald, 2000 ; Polyak et al., 2002 ; Polyak and Solheim, 1994 ; Sejrup et al., 2004 ; Wilson et al., 2011
<i>Cassidulina reniforme</i>	Arctique Forte salinité		e.g. Bartels et al., 2017 ; Mackensen et al., 1985 ; Sejrup et al., 2004 ; Slubowska et al., 2005
<i>Elphidium excavatum</i>	Arctique Plateforme Faible salinité et température		e.g. Corliss, 1991 ; Korsun et Hald, 2000 ; Murray, 2006
<i>Islandiella</i> spp.	Arctique		e.g. Dijkstra et al., 2017
<i>Nonionellina labradorica</i>	Arctique Fronts polaires hydrographiques	Apports épisodiques de phytodétritus	e.g. Cadhagen, 1991 ; Corliss, 1991 ; Polyak et Mikhailov, 1996 ; Bubenshchikova et al., 2008
<i>Ioanella tumidula</i>	Arctique/Atlantique nord Grande profondeur >2000 m	Environnements oligotrophes	e.g. Ishman et Foley, 1996 ; Wollenburg et Mackensen, 1998a ; Husum et al., 2015
<i>Oridorsalis umbanatus/tenerus</i>	Arctique/Atlantique nord Grande profondeur >2000 m	Environnements oligotrophes	e.g., Belanger et Streeter, 1980 ; Mackensen et al., 1985 ; Ishman et Foley, 1996 ; Wollenburg et Mackensen, 1998a, 1998b ; Husum et al., 2015

Chapitre II : Distribution of living benthic foraminifera in the northern Chukchi Sea

Publication : Racine, C., Bonnin, J., Nam, S. I., Giraudeau, J., Biguenet, M., Dessandier, P. A., & Kim, J. H. (2018). Distribution of living benthic foraminifera in the northern Chukchi Sea. *Arktos*, 4(1), 28.

doi.org/10.1007/s41063-018-0062-y

II.1 Introduction

The Arctic Ocean is the smallest and shallowest of the world's five major oceans, but it plays an essential role in the global oceanic circulation and the regulation of the Earth's climate system. Since the last decades, the Arctic region has undergone significant and rapid climate changes with a reduction of sea-ice cover and thickness, an increase in length of sea-ice melt season (e.g., Johannessen et al., 2004 ; Maslanik et al., 2011 ; Comiso, 2012), as well as a rise in sea surface temperatures (SST) and temperatures of water masses flowing into the Arctic Ocean (e.g., Shimada et al., 2006 ; Spielhagen et al., 2011 ; Woodgate et al., 2006 ; Woodgate et al., 2012).

Recent benthic foraminifera in the Arctic Ocean have been investigated by several authors during the last five decades (Green, 1960 ; Vilks, 1969 ; Lagoe, 1979 ; Schröder-Adams et al., 1990 ; Scott and Vilks, 1991 ; Bergsten, 1994 ; Ishman and Foley, 1996 ; Wollenburg and Mackensen, 1998a ; Wollenburg and Mackensen, 1998b ; Wollenburg and Kuhnt, 2000 ; Osterman et al., 1999 ; Scott et al., 2008 ; Husum et al., 2015). The rare studies which distinguished stained (living) benthic foraminifera from fossil (dead) faunas in Arctic sediments usually demonstrate a close correlation between the distribution of foraminiferal species and bottom water masses (Green, 1960 ; Bergsten, 1994 ; Ishman and Foley, 1996). In the global Ocean, living benthic foraminiferal studies highlight the impact of a wide range of processes upon foraminiferal distributions among which are food supply, salinity, temperature, oxygen, tides and currents, substrate, light penetration, the presence of seagrass and macroalgae, as well as competition and predation (Murray, 2006 and references therein). Of these multiple factors and in addition to bottom water mass characteristics, food availability and competition for food are thought to control to a high extent foraminiferal associations in the Arctic Ocean (e.g., Wollenburg and Mackensen, 1998a ; Wollenburg and Mackensen, 1998b ; Wollenburg and Kuhnt, 2000).

In this paper, we present results from living foraminiferal population collected in the northern sector of the Chukchi Sea, one of the major gateways of the Arctic Ocean. Summer sea-ice in the western Arctic, especially in the Chukchi Sea, has been rapidly declining during the last decades (e.g., Comiso et al., 2008 ; Comiso, 2012). Recently, Yun et al. (2016) have also shown that the primary production in the Chukchi Sea presents some decreasing trend for the last decades, probably associated with fresh water input related to sea-ice melting. However, there are very few studies focusing on the distribution of benthic foraminifera in this area.

Osterman et al. (1999) reported the distribution of benthic foraminifera in the Chukchi Sea, but their study was only based on the $>125 \mu\text{m}$ size fraction and did not distinguish living from dead faunas. Here, we present the first data on the distribution of living benthic foraminifera $>63 \mu\text{m}$ in the northern Chukchi Sea, from the continental shelf to the lower slope and discuss their distributional pattern in view of the local environmental setting. We believe that the present study is absolutely central for a better knowledge of Arctic foraminiferal ecology and in future efforts aiming at reconstructing past environments in the area of the Chukchi Sea.

II.2 Regional setting

The Chukchi Sea, one of the largest marginal seas of the Arctic Ocean, extends from the Bering Strait in the south to the edge of the Canadian basin in the north (Fig. II.1). Most of the Chukchi Sea constitutes a large shallow shelf which deepens progressively towards the north (Fig. II.1). To the north of the shelf system, the Chukchi Borderland includes two subsea formations that extend into the Amerasian Basin: the Chukchi Plateau and the Northwind Ridge (Polyak et al., 2007).

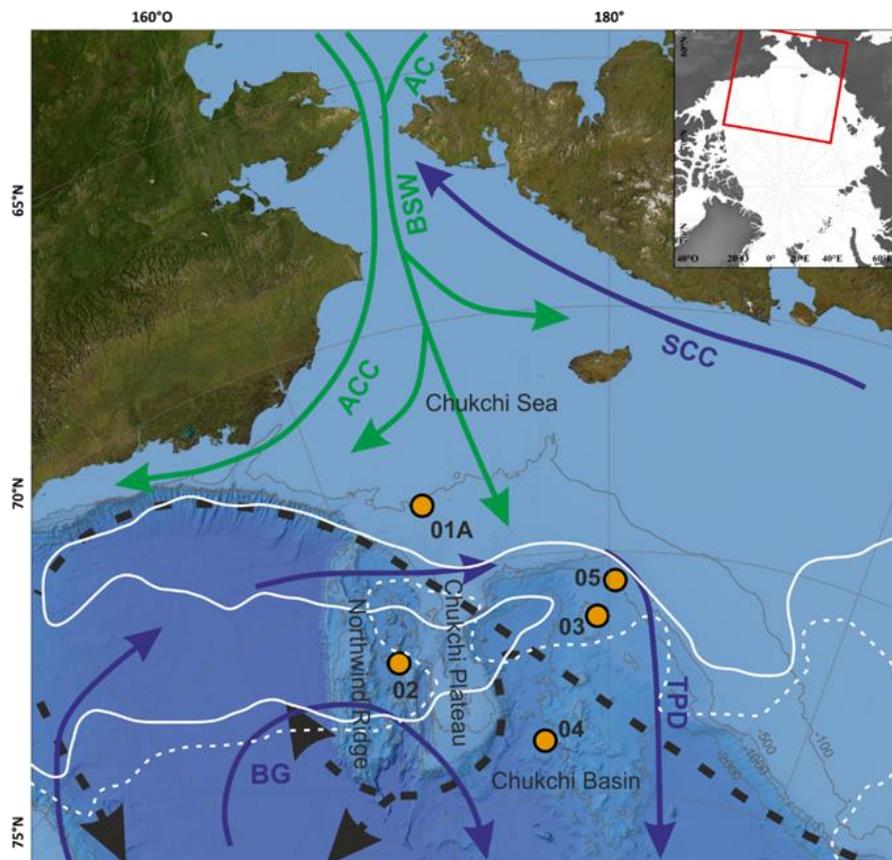


Figure II.1 : Bathymetric map of the Chukchi Sea with sampling locations, main features of the surface and intermediate circulation, and mean sea-ice extent in August 2015 (white line) and September 2015 (white dotted line). The circulation is adapted from Rudels et al. (2012). For

the surface waters, low-salinity currents derived from Pacific water are indicated by green arrows and cold polar and arctic currents by blue arrows. Circulation of intermediate waters is shown by black dotted arrows. AC Anadyr current, ACC Alaskan coastal current, BG: Beaufort gyre, BSW Bering Sea water, SCC Siberian coastal current, TPD transpolar drift. Monthly sea-ice extent is from NSIDC (Fetterer et al., 2016) and bathymetry is from IBCAO, WGS84.

The Chukchi Sea is strongly influenced by fresh Pacific waters entering through the Bering Strait. The annual volume transport averages about 0.8 Sv northwards (Roach et al., 1995 ; Woodgate et al., 2005). This inflow of fresh Pacific waters is stronger in summer and relatively weak in winter. Two water masses of Pacific origin dominate the Chukchi Sea circulation (Coachman et al., 1975): the Bering Sea Water (BSW) and the Alaskan Coastal Water (ACW). The ACW is carried by the Alaskan Coastal Current (ACC) into the Chukchi Sea, flowing northwards along the Alaskan coast with a transport volume of 0.1 Sv. It is a relatively warm, low salinity and nutrient-poor water mass (Woodgate and Aagaard, 2005 ; Hunt et al., 2013). The remaining 0.7 Sv of Pacific waters flowing into the Chukchi Sea is made of BSW, a mixture of Anadyr Water and Bering Shelf Water (Coachman et al., 1975). These waters are saltier and richer in nutrients than the ACW (Springer et al., 1989). In the western sector of the Chukchi Sea, the seasonal Siberian Coastal Current (SCC; 0.1 Sv) flows southwards along the coast and deflects fresh and cold waters into the central Chukchi Sea (Weingartner et al., 1999 ; Woodgate et al., 2005). Seasonal variations in Pacific water inflow and sea-ice cover lead to a seasonal cycle of water mass stratification (Woodgate et al., 2005 ; Hunt et al., 2013). In summer, the inflow of Pacific water, especially via the ACC, transports heat into the Chukchi Sea leading to a stronger stratification of the surface layers (Woodgate et al., 2010). Conversely, water column is well mixed from fall to spring, the inflow of Pacific water becoming cooler and denser due to brine releases during sea-ice formation (Weingartner et al., 1998). To the north of the Chukchi Shelf, surface circulation is driven by the two main surface current systems of the Arctic Ocean: the Beaufort Gyre (BG) and the Transpolar Drift (TPD). Warm and salty Atlantic Intermediate Water (AIW) flows along the Chukchi slope, following the shelf break from west to east, between approximately 200 and 900 meters below sea level, and submerges cold Arctic Deep Water (ADW) which circulates within the deep Arctic basins (Fig.II.1; Aagaard et al., 1985 ; Carmack, 1990 ; Swift et al., 1997).

The Chukchi Sea is characterized by a first-year ice, making this area particularly sensitive to the present overall reduction in Arctic sea-ice concentration (Comiso, 2002 ; de Vernal et al., 2005). Over the satellite record, the Chukchi Sea has displayed the sharpest downward trends in Arctic sea-ice extent, the September sea-ice edge being now located far

north of the continental shelf break (Comiso, 2012). Shimada et al. (2006) and more recently Serreze et al. (2016) suggested that the recent reduction in sea-ice concentration was essentially triggered by the warming of the inflowing Pacific water. Atmospheric temperature and circulation may also influence the seasonal melting of ice (Serreze et al., 2016).

The Chukchi Sea is generally considered as a highly productive region on the edge of the largely oligotrophic Arctic basin (McRoy, 1993) as a result of the inflow of fresh and nutrient-rich Pacific water into the Chukchi continental shelf. However, a recent study by Yun et al. (2016) has shown a decreasing trend in primary production in the Chukchi Sea during the last decades with relatively large regional variation. Spatial and temporal variations in the productivity of the Chukchi Sea are related to changes in duration, thickness and extent of seasonal sea-ice which control light availability and surface water stratification from sea-ice melting (Wassmann et al., 2004 ; Hill and Cota, 2005 ; Grebmeier et al., 2006 ; Yun et al., 2016). Mean average primary productivity in the Chukchi Sea is generally higher over the shallow shelf which experiences seasonal sea-ice compared to the northern sector of the Chukchi Sea (Yun et al., 2016). Primary production rates over the southern shallow sector of the Chukchi Sea average 80-90 g C m⁻² year⁻¹ and progressively decrease toward the slope (<50 g C m⁻² year⁻¹) and over the deep Arctic basin (<20 g C m⁻² year⁻¹) (Sakshaug, 2004 ; Wassmann et al., 2004 ; Hill and Cota, 2005 ; Grebmeier et al., 2006). Intense blooms are observed with ice edge retreat (Wang et al., 2005), in the open water of marginal ice zone (MIZ; Perrette et al., 2011), starting with an ice algae bloom in May followed by a strong but brief phytoplankton bloom in June (Wassmann, 2011). A recent study also revealed intense phytoplankton blooms beneath sea-ice in the Chukchi Sea (Arrigo et al., 2014). However, several studies show the negative effect of fresh water input resulting from sea-ice melting on the nutrient concentration and, therefore, primary production in this area (Yun et al., 2014 ; 2016 ; Coupel et al., 2015).

II.3 Materials and methods

II.3.1 Sample collection

This study is based on 9.8 cm-diameter multicores and push cores subsampled from boxcores collected at five stations in the Chukchi Sea during the ARA06C cruise onboard the RV ARAON, between August 25th and September 9th, 2015 (Fig. II.1, table II.1). Upon recovery, sediment cores were sliced onboard every 0.5 cm from the surface down to 2 cm, and then every centimetre down to 5 cm. For each station, one sediment core was used for benthic foraminiferal analysis and another one for sedimentological and geochemical analyses.

Temperature and salinity profiles through the whole water column, as well as chlorophyll *a* (Chl *a*) profiles for the upper water column were measured at Sts. 01A, 02, 03 and 04 using a conductivity temperature depth (CTD) profiler and a fluorometer sensor, respectively. Sea-ice conditions (drift ice) hindered the deployment of the profiler at St. 05.

Tableau II.1 : Station numbers, types, locations and water depths.

Cruise	Sample station	Sampling device	Longitude	Latitude	Water depth (m)
ARA06C	01A	Multicorer	-166.44	73.62	110
ARA06C	02	Boxcorer	-161.17	76.60	2100
ARA06C	03	Multicorer	181.01	76.33	750
ARA06C	04	Multicorer	-173.23	78.84	2300
ARA06C	05	Boxcorer	179.50	75.60	350

II.3.2 Sedimentological and geochemical analyses

Grain size analysis were conducted at Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC, France) using a laser diffraction particle size analyser (Malvern Mastersizer 2000 hydro G). Measurements along the top 5 cm of each core were performed on freeze-dried sediment. Grain-size spectra derived from downcore measurements display a unimodal distribution at all stations. We, therefore, consider the median diameter of the particle-size distribution D_{50} as a reliable measurement of the mean grain size in the sediment cores investigated in the present study.

Sedimentary total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) contents as well as stable isotope composition of organic carbon ($\delta^{13}C_{org}$) were measured at the Korea Polar Research Institute (KOPRI, South Korea) using an EA-IRMS system (Flash 2000-Delta V, Thermo Scientific). Total carbon (TC) and TN were measured on freeze-dried sediment. TOC and $\delta^{13}C_{org}$ were analysed on carbonate-free sediment after HCl (10%) treatment. Finally, TOC was calculated using the following equation (Stein et al., 1994): $TOC (\%) = [100 - (8.333 * TC)] / [(100 / TOC') - 8.333]$. The analytical error was less than $\pm 0.1 \%$ for TN and TOC contents and $\pm 0.1 \text{‰}$ for $\delta^{13}C_{org}$. TN and TOC are expressed as the mass weight of dry bulk sediment (wt. %). The C/N ratio was calculated by dividing TOC by TN.

^{210}Pb and ^{226}Ra were measured at EPOC (France) by γ spectrometry analytical technique on freeze-dried sediment of the first 7 cm of core 01A (St. 01A). ^{210}Pb in excess of equilibrium with ^{226}Ra , $^{210}Pb_{xs}$, was calculated as the difference between measured ^{210}Pb and ^{226}Ra .

II.3.3 Living (stained) benthic foraminiferal analysis

Sample treatment and faunal analysis mostly follow the FOBIMO standardized protocol (Schönfeld et al., 2012). Benthic foraminiferal samples were preserved in a 1.5 g L⁻¹ solution of Rose Bengal in 96% ethanol to stain the living endoplasm of benthic foraminifera according to Murray and Bowser (2000) and Walton (1952). This concentration is lower than recommended by the FOBIMO protocol (2 g L⁻¹), but has been shown to efficiently stain the living organism in many studies (e.g., Fontanier et al., 2002 ; Dessandier et al., 2016). The samples were repeatedly homogenised immediately after staining. For more precision, the real volumes of sediment were measured (Schönfeld et al., 2012). Samples were wet sieved through 63 µm and 125 µm mesh screens. Benthic foraminiferal analysis was performed on both the 63-125 µm and >125 µm size fractions. All stained individuals were hand-sorted under wet condition from the surface down to 5 cm for the >125 µm fraction and from the first centimetre only for the 63-125 µm fraction. The choice of limiting the analysis of the 63-125 µm fraction to the top first centimetre stems from the extremely low abundance of living fauna in the 0-1 cm interval of this size fraction at each investigated station (precluding the existence of <125 µm fauna below the depth of 1 cm) as well as from the time-consuming effort for such low gain. The coloration of Rose Bengal stained specimens considered as living at the time of sampling may vary among species from light pink to dark red or brownish violet (Schönfeld et al., 2012). Consequently, only specimens with all chambers coloured (except the last one) were considered as living. Some non-transparent tests (miliolids or agglutinated taxa) were broken, after identification, to ensure that protoplasm was stained. All specimens were identified to species levels if possible following the generic classification of Loeblich and Tappan (1988).

We considered as major species the ones representing at least 5% of the foraminiferal assemblages. Faunal densities were standardized for a sediment volume of 50 cm³. Living standing stock represents the total number of living individuals counted per station in each size fraction, normalized for a 100 cm² sediment area according to Goineau et al. (2011) and Dessandier et al. (2016). Three biodiversity indices were calculated using the PAST software (Hammer et al., 2001): the species richness (S, number of species present in a sample), the Shannon index H' (Shannon and Weaver, 1949) and the Evenness index E (Buzas and Gibson, 1969).

II.4 Results

II.4.1 Environmental, sedimentological and organic geochemical settings during the sampling period

At the end of August 2015, sea-ice was very thin and was only found north of the sampling area (Fig. II.1). A continuous northward retreat of the sea-ice edge occurred until the end of September 2015. Therefore, all the investigated stations were free of ice at the time of sampling.

An upper 20 m-thick low-salinity (<30) surface layer characterizes all stations under the influence of sea-ice melting (Fig. II.2a). Changes toward lower surface salinities (ca. 29.5 to 26.5) and lower surface temperatures (ca. 1.5 to -1°C) from St. 01A to St. 04 reflect the increasing proximity to the sea-ice edge. This surface mixed layer overlays the colder and saltier Pacific water with typical signature of -1.5°C and 33 extending down to 200-250 m over the slope and deep sectors of the Chukchi Sea (Fig. II.2a). This water mass bathes the sediment-water interface at the shallow (110 m) St. 01A (Fig. II.2a). The AIW with mean salinities of 35 and temperatures up to 0.8-0.9°C is observed from 200-250 m to ca. 750 m (Fig. II.2a), and, therefore, characterizes the bottom water at the slope Sts. 05 (350 m) and 03 (750 m). The ADW occupies the deeper >750 m water column at Sts. 02 (2100 m) and 04 (2300 m) with typical temperatures <0°C and stable salinity of 35 (Fig. II.2a). Chl *a* profiles within the upper water masses of Sts. 01A, 03, 02 and 04 are given in Figure II.2b. Chl *a* concentrations measured at all stations range from ca. 0.5 to 1.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ within the top 80-100 m water depth. These values are relatively low when compared to values of Chl *a* concentrations (about 1-10 $\mu\text{g L}^{-1}$) commonly measured in the study area during bloom periods in June and July (Wang et al., 2005 ; Perrette et al., 2011 ; Arrigo et al., 2014). Maximum Chl *a* concentrations over the shelf (St. 01A; 0.6-0.7 $\mu\text{g L}^{-1}$) occur in shallower depth, around 20 m water depth, than over the upper and lower slope stations (Sts. 03, 02, 04) where peak values of 0.6 to 1.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ are found deeper around 60-70 m water depth.

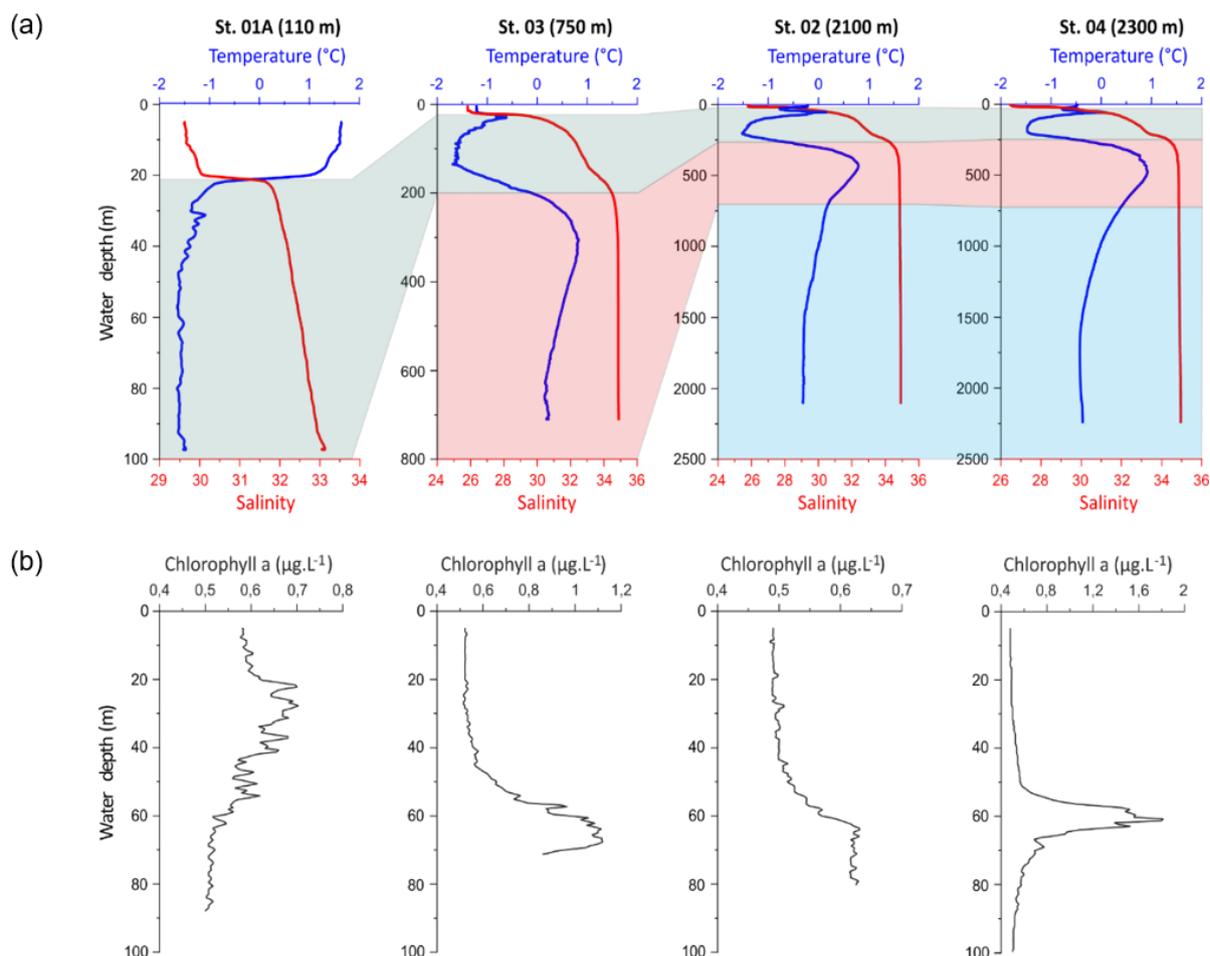


Figure II.2 : Water column profiles of temperature, salinity (a), and chlorophyll a (b) at Sts. 01A, 03, 02, and 04. Pacific water mass is underlined in green, Atlantic Intermediate Water in red and Arctic Deep Water in blue.

Sedimentological and geochemical analyses in the surface sediment are shown in Figure II.3. At all stations, sediment grain size ranges from clay to fine silt ($D_{50} = 8\text{-}12\ \mu\text{m}$). The shallowest St. 01A displays high TOC and TN contents (>2.5 and 0.3 wt. %, respectively) compared to other stations (≤ 1 and 0.15 wt. %). The $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ values range from -24 to -21 ‰ and agree with other evidences (Naidu et al., 1993 ; Naidu et al., 2000 ; Grebmeier et al., 2006) for a dominant marine origin of the organic matter in sediments of the Chukchi Sea and more generally in sediments of the Amerasian Arctic. This marine origin is confirmed by the C/N ratio which, within the top 2 cm of most of the stations, ranges between 6 and 8, revealing typical signature of marine algae (Redfield, 1963). These ratios also indicate that this marine organic matter was subjected to limited degradation processes within the water column and the top part of the sediment layers (Meyers, 1994). C/N ratio values close to 9 on average at St. 01A, however, suggest that sediment at this shelf station might contain a terrigenous component, though with limited contribution to the total organic matter content.

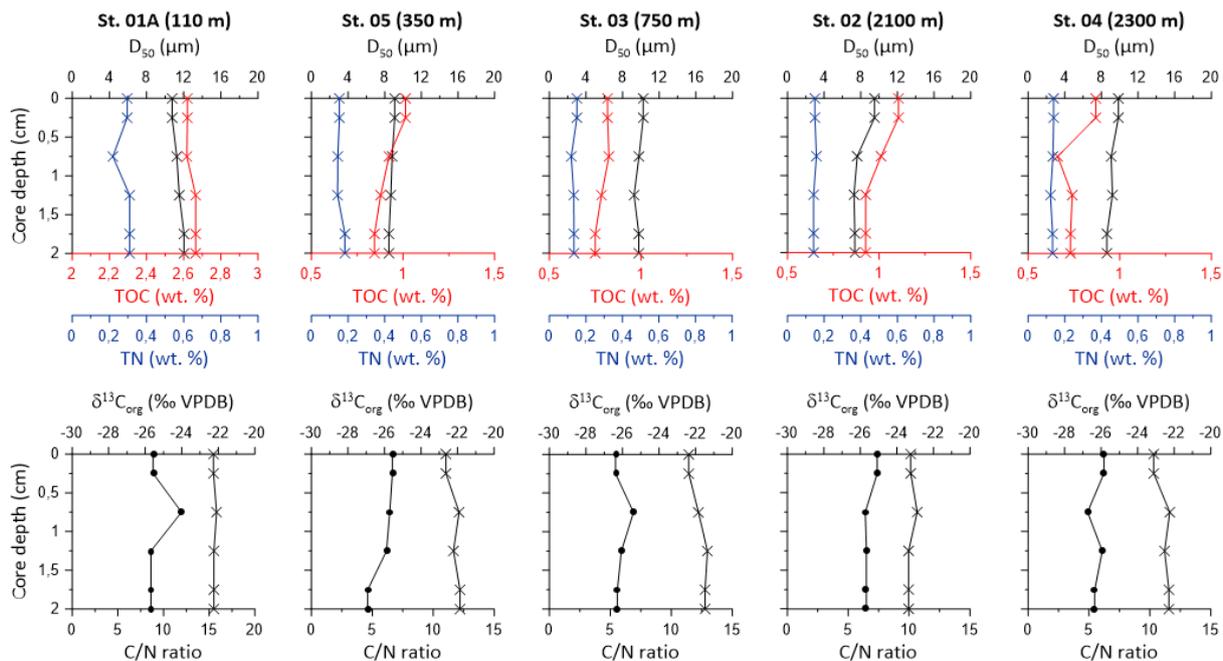


Figure II.3 : Downcore (topmost 2 cm) profiles of median sediment grain size D_{50} (μm), total organic carbon content (TOC, wt. %), total nitrogen content (TN, wt. %), $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (‰ VPDB) and C/N ratio at all stations.

$^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ activity profile (Fig. II.4) was measured in the first 7 cm of the sediment in order to highlight possible bioturbation or bio-structures in core 01A locating on the shelf. The vertical profile of $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ shows relatively stable values down to 6 cm and a gently decrease below.

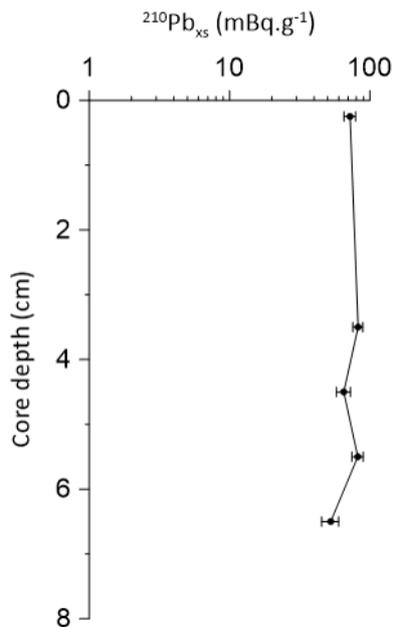


Figure II.4 : Downcore $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ profile measured at St. 01A.

II.4.2 Living benthic foraminifera

II.4.2.1 Living standing stock and ecological indices

In total, 476 living individuals were counted representing 31 species among them 15 are calcareous and 16 are agglutinated species. Tests of benthic foraminifera, especially calcareous, do not show any mark of alteration or dissolution. Living faunal standing stocks show extremely low values in the 63-125 μm size fraction, from 0 ind./100 cm^2 in the shallowest St. 01A to 11 ind./100 cm^2 in St. 03 (Fig. II.5a and Fig. II.7). For this 63-125 μm fraction, excluding St. 03 (750 m), H' , therefore, equals 0 and E equals 1 for all stations due to the presence of only one living species (Fig. II.5c, d). Benthic foraminiferal standing stocks and diversities S are generally higher in the >125 μm size fraction, ranging from 8 to 297 ind./100 cm^2 , and from 3 to 17 species, respectively, with higher values generally measured at the shallowest stations (Fig. II.5a, b). Lowest standing stocks are observed at the deepest stations (8 and 18 ind./100 cm^2 at Sts. 02 and 04, respectively). H' and E values do not indicate any clear correlation with water depth (Fig. II.5c, d). Both indices are minimal at the mid-depth station (St. 03, 750 m).

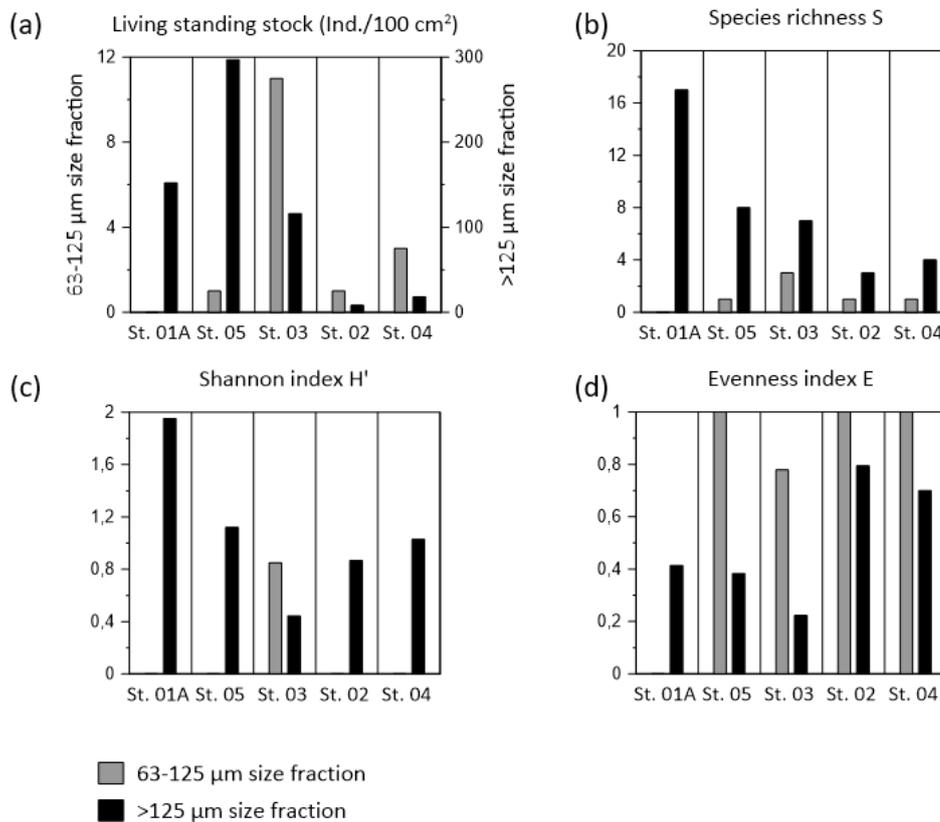


Figure II.5 : Ecological indices describing foraminiferal assemblages at all the stations for the 63-150 μm (topmost centimetre, grey bars) and >125 μm size fractions (topmost 5 cm, black bars). (a) Foraminiferal abundances; (b) Number of species S ; (c-d) Shannon (H') and Evenness (E) indices.

II.4.2.2 Relative abundances of the dominant species

Because of the extremely low living standing stock in the 63-125 μm size fraction, relative abundances and comparison between size fractions should be considered with great care. Except at St. 03, only calcareous taxa are found in the 63-125 μm fraction (Fig. II.6a). In the $>125 \mu\text{m}$ fraction, the contribution of agglutinated taxa is decreasing with increasing water depth, ranging from 40 % at St. 01A to 0 at Sts.02 and 04 (Fig. II.6b).

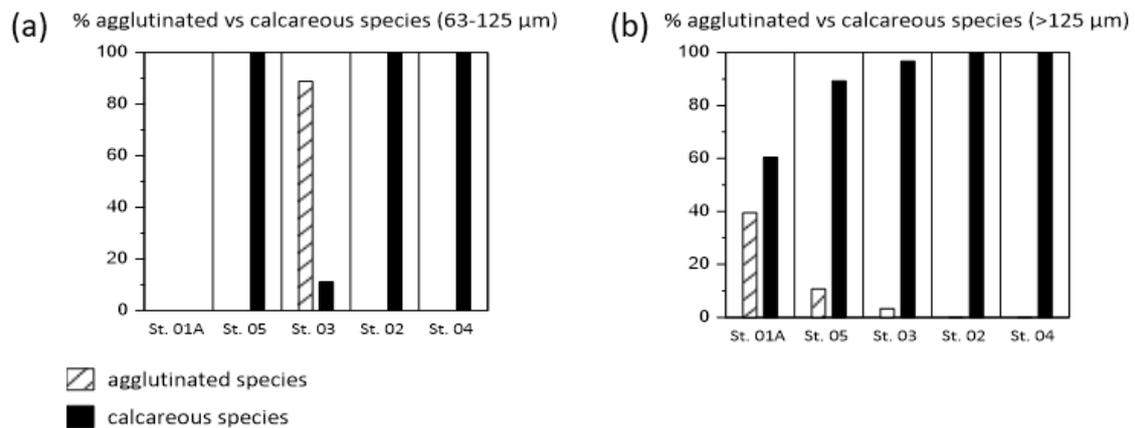


Figure II.6 : Proportion of agglutinated vs. calcareous species at all the stations for the 63-125 μm size fraction (a) and the $>125 \mu\text{m}$ size fraction (b).

Major species are illustrated by the plate of appendix 1. With the exception of the deepest St. 04 where *Oridorsalis tenerus* shows high relative abundances in both size fractions, species assemblages are drastically different between size fractions (Fig. II.7). Some species observed in the small size fraction are, however, worth mentioning: *Parafissurina tectulostoma* and *O. tenerus* are respectively found on the upper slope (Sts. 05 and 03) and on the lower slope (Sts. 02 and 04). Higher standing stocks in the $>125 \mu\text{m}$ fraction support a more robust description of the species assemblages. *Elphidium excavatum* subsp. *clavatum* and *Nonionellina labradorica*, both calcareous species, are the dominant taxa (45 and 13 %, respectively) in shelf sediments (St. 01A, Fig. II.7b). Subordinate agglutinated species consist of *Saccamina* sp., *Labrospira crassimargo*, *Nonionina scapha* var. *arenacea* and *Recurvoïdes contorta*. Upper and lower slope stations are characterized by distinct foraminiferal populations. Foraminiferal assemblages at upper slope stations are both overwhelmingly (>60 %) dominated by *Cassidulina neoteretis*. *Elphidium excavatum* subsp. *clavatum* and *Lagenammina arenulata* are present (27 % and 7 %, respectively), at St. 05 (350m) though both species are absent in the other upper slope St. 03 (750 m). In both deepest Sts. 02 and 04, *Ioanella tumidula* and *Triloculina oblonga* are common to abundant (Fig. II.7b). *Oridorsalis tenerus* is dominant (64 %) at the deepest station (St. 04) but not observed at St. 02.

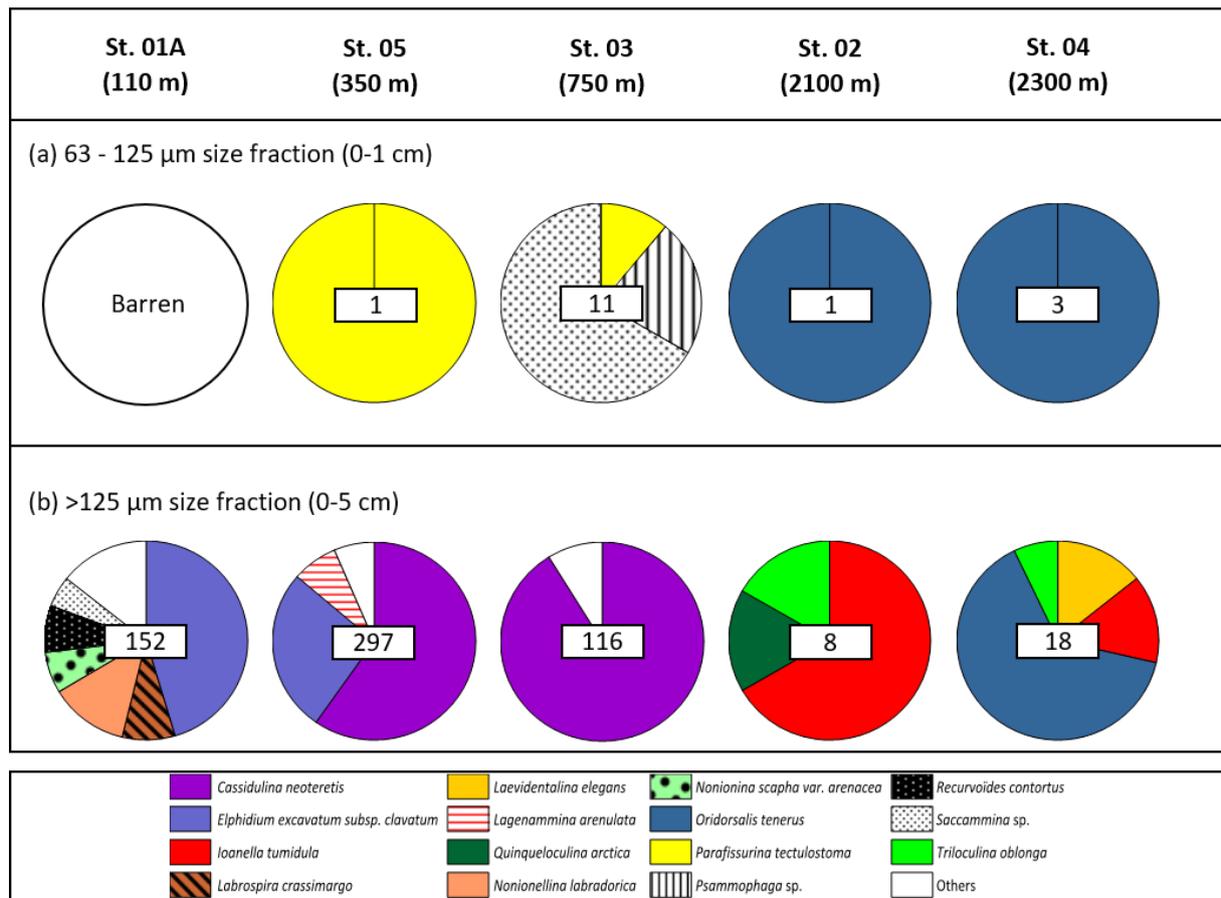


Figure II.7 : Foraminiferal relative abundances of major species (>5% of the total living benthic foraminifera assemblage) for the 63-125 μm (a) and the >125 μm (b) size fractions. Living standing stock (number in the central area of the pie charts) are standardized for a surface area of 100cm². Species representing less than 5 % are grouped in the category “others”.

II.4.2.3 Vertical distribution

The vertical distribution (0 to 5 cm) of living foraminifera was analysed for the >125 μm size fraction only (Fig. II.8). Benthic foraminifera are generally concentrated in the upper 2 cm of the sediment with density reaching up to 133 and 386 ind./50 cm³ in the top-most layer (0-0.5 cm) of Sts. 03 and 05, respectively. At the shallowest St. 01A, the highest faunal density is also observed in the top-most layer with 47 ind./50 cm³ and abundant agglutinated species, among which *L. crassimargo* and *N. scapha var. arenacea*. However, contrary to other stations, living faunas are found down to 5 cm, with *E. excavatum subsp. clavatum* reaching up to 28 ind./50 cm³ in the 4-5 cm layer. *Nonionellina labradorica* shows its higher abundances between 1 and 2 cm (12 ind./50 cm³).

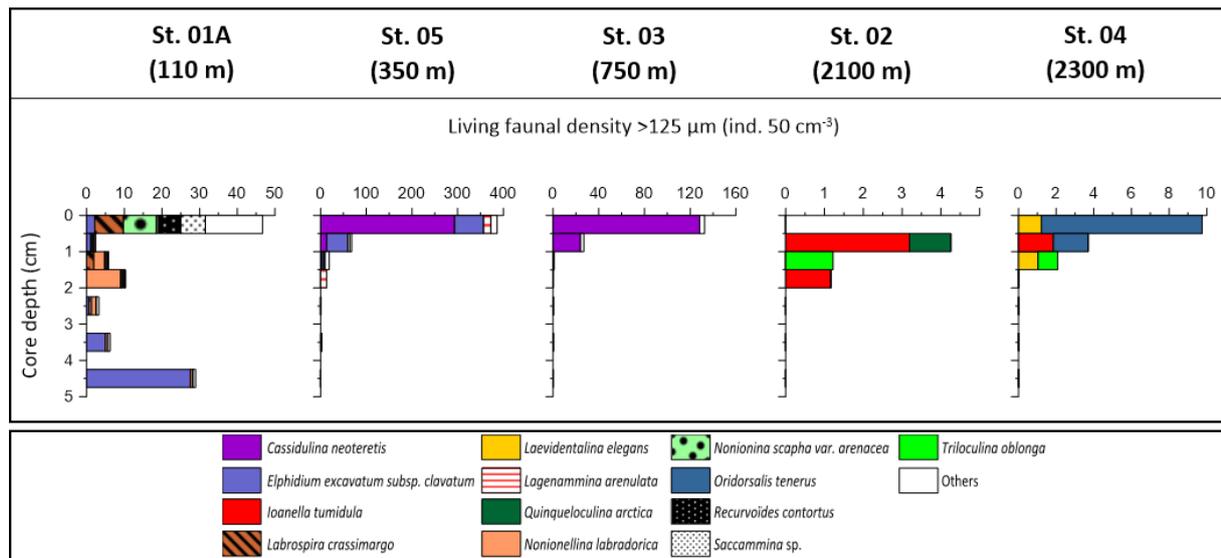


Figure II.8 : Vertical distribution of major species of living benthic foraminifera (>125 µm) in terms of faunal density (ind./50cm³) in the topmost 5 cm.

II.5 Discussion

In most studies where benthic foraminifera from 63 to 125 µm and >125 µm size fractions are analysed, the standing stocks are generally much higher (e.g., Goineau et al., 2012). In the Arctic, particularly under permanent sea-ice cover, most of the benthic foraminifera are smaller than 125 µm (Scott et Vilks, 1991 ; Wollenburg and Mackensen, 1998a ; Wollenburg and Mackensen, 1998b). However, in this study, the living standing stock in the 63-125 µm size fraction is extremely low and always much lower than in the >125 µm size fraction. This might be due to either a methodological bias related to the staining of the living foraminifera or to environmental conditions. At all the stations, the sediment is extremely fine (Fig. II.3) and, therefore, very cohesive which might prevent the good penetration of Rose Bengal staining in the sediment. Although we cannot completely rule out this hypothesis, the occurrence of well-stained individuals in the >125 µm size fraction suggests that the extremely low density in the 63-125 µm fraction is a consequence of environmental conditions rather than a methodological bias. Density of dead fauna was assessed on the top centimetre (0-1cm) of the sediment for the 63-125 and >125 µm fractions to test whether the distribution of living fauna according to the size fractions is representative of mean average conditions in the studied area. Living and dead faunal densities are shown for both fractions in Figure II.9. Not surprisingly given the time interval represented by the accumulation of dead fauna (25 years at least considering a minimal sedimentation rate of 0.4mm/yr ; Darby et al., 2009), the density of the dead fauna is much higher than that of the living fauna, especially for the 63-125 µm size

fraction. Furthermore, the density of the dead fauna shows highest values in the lower slope Sts. 02 and 04, while the living fauna are more abundant in the upper slope Sts. 03 and 05. The remobilization and transport of dead fauna by the active currents from shallow to deep settings (Darby et al., 2009) as well as taphonomical processes leading to the dissolution of calcareous forms that dominate the living assemblage at shallow stations (e.g., Steinsund and Hald, 1994) might in part explain the observed discrepancy. More presumably, we consider that the sampling period (late August to early September 2015) is not typical of normal late summer environmental conditions in the Chukchi Sea and/or that the peak production of benthic foraminiferal species which contribute to the 63-125 μm fraction does not occur over late summer. Our data do not permit us to deal further with this issue. Therefore, and despite the relatively high proportion of dead foraminifera in the 63-125 μm fraction, most of the following discussion on the distribution of the living benthic foraminifera will be based on the $>125 \mu\text{m}$ fraction only.

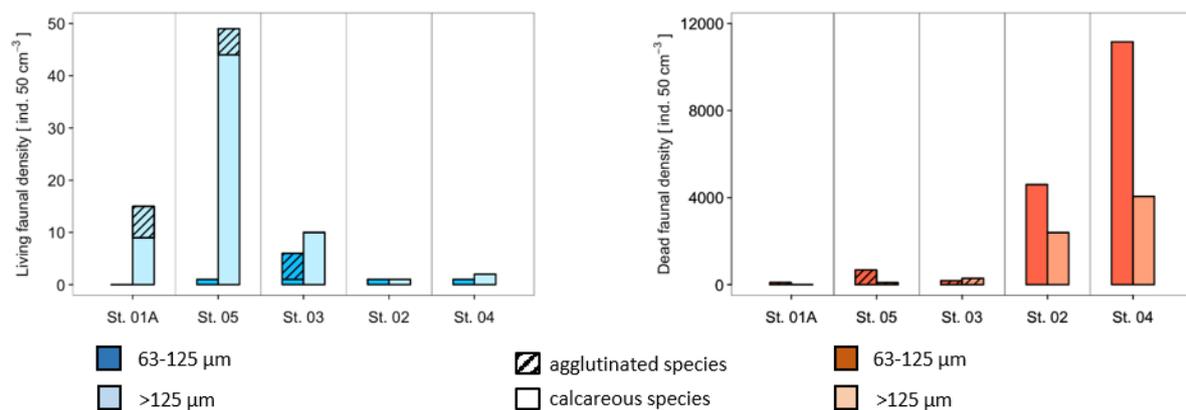


Figure II.9 : Density of living (blue) and dead (orange) benthic foraminifera in the first centimetre of sediment for each station and each size fraction.

II.5.1 Density and diversity of living benthic foraminifera related to primary production

Except at St. 01A, where bottom temperature and salinity are -1.5°C and 33.1 respectively, these two parameters display similar values at all other stations, ranging from 0.2 to -0.5°C and close to 35.0 (Fig. II.2a). Wollenburg and Mackensen (1998a, 1998b) have shown that, among the various factors controlling the distribution of benthic foraminifera in the Arctic, bottom water mass characteristics are of minor importance. Likewise, given the equivalent grain size measured at all the stations (clay to fine silt), we do not consider this sedimentological

parameter as influential in explaining the observed heterogeneities in species assemblages among stations (Fig. II.3).

The distribution of living benthic foraminifera is well known to be influenced by biotic and abiotic factors, among which the oxygen concentration and food supply are the most important (Jorissen et al., 1995 ; Wollenburg and Mackensen, 1998a, 1998b). TOC values in the studied upper and lower slope stations are fairly stable, ranging from 0.6 to 1.2 %, and agree with values found by Husum et al. (2015) for the central Arctic. Over the shelf (St. 01A), TOC reaches 2.6 %. However, the standing stock at St. 01A is not particularly high compared with other stations, pointing out the influence of other parameters than organic matter content alone. Recent studies suggest that the quality and origin of the organic matter delivered to the seabed play a major role in controlling benthic foraminiferal ecology (Schönfeld, 2001 ; Fontanier et al., 2002 ; Koho et al., 2007 ; Fontanier et al., 2008 ; Goineau et al., 2011 ; Dessandier et al., 2016).

The major food source for benthic foraminifera in the open ocean is organic matter derived from primary production. In the Arctic Ocean, food availability and benthic foraminiferal standing stock, composition, and vertical distribution in sediments will greatly depend on sea-ice seasonality (e.g., Wollenburg and Mackensen, 1998a, 1998b ; Husum et al., 2015). In the Chukchi area, the marine primary production, and thus the export of organic matter to bottom sediments, is essentially controlled by nutrients availability, seasonal sea-ice extent (e.g., Tremblay et al., 2015), light penetration and fresh water input variability (Coupel et al., 2015 ; Yun et al., 2016), these parameters being strongly related. Many studies suggest that nitrogen availability through nitrate supply tends to control and limit primary productivity in seasonally ice-covered waters of the Arctic Ocean (Sakshaug, 2004 ; Tremblay et al., 2008 ; Moore et al., 2013). Tremblay et al. (2015) showed a clear difference between the Chukchi shelf and Chukchi borderlands in terms of nitrate maximum at the surface due to perennial stratification in the interior sector. Yun et al. (2016) also showed that primary production is highest in the southern Chukchi Sea and decreases northward as a result of sea-ice cover and meltwater input mainly.

In this study, abundance and diversity are lower in the deepest stations (Sts. 02 and 04) than in the shelf and upper slope stations (Sts. 01A, 05 and 03). The living foraminiferal density in the >125 μm size fraction at all the stations (Fig. II.8) remains, however, low (from 4 ind./50 cm^3 at St. 02 to 454 ind./50 cm^3 at St. 05 for the upper centimetre) in comparison to the other studies in Arctic environments. Wollenburg and Mackensen (1998b) reported living

benthic foraminiferal densities in the same size fraction ranging from 18 ind./50cm³ in the deep Nansen Basin to 1044 ind./50cm³ on the Yermak Plateau. Husum et al. (2015) using a slightly smaller size fraction (100 µm-1 mm) provided density values of 0 ind./50cm³ on the Alpha and Gakkel Ridge and more than 6300 ind./50cm³ on the Kara Sea continental margin. The north of the Chukchi Sea is covered by sea-ice 8 months a year from November to June (e.g., Serreze et al., 2007 ; Stroeve et al., 2012). Long sea-ice cover leads to a generally low primary productivity and organic matter flux reducing the living benthic foraminiferal standing stock and the faunal habitat depths in the sediment (Bubenshchikova et al., 2008 ; Polyak et al., 2013). Although the sea-ice cover at the time of sampling was scarce for the northernmost deep stations, this may, at least partly, explain the standing stock differences between the relatively rich outer shelf, upper slope stations, and the very poor lower slope stations (Fig. II.7).

During summer in the Chukchi Sea, heterotrophic processes take over autotrophic processes following nutrient depletion by the spring bloom (Hill and Cota, 2005 ; Wassmann, 2011). This feature induces a seasonal shift in the quantity and the quality of the vertically exported biogenic matter. The biogenic matter exported is high and fresh in spring, while it becomes lower and more degraded (faecal pellets, aggregates, detritus) in summer, especially during August and September (Wassmann, 2011). Chlorophyll data measured at the deepest stations of the Chukchi Sea, however, show a relatively well-developed subsurface Chlorophyll maximum (SCM) centred around 60 m with chl *a* values reaching 1.6 µg L⁻¹. The depth and values of this SCM agree with the results of Coupel et al. (2015) for the Chukchi area and Martin et al. (2012) for other Arctic seas. Therefore, surface or subsurface productivity might not be the only limiting factor there.

II.5.2 Species distribution as a proxy of environmental changes

In the 5 studied cores, distinct living benthic foraminiferal assemblages are observed according to the following bathymetric ranges as: outer shelf (110 m water depth), upper slope (350-750 m) and lower slope (2100-2300 m). The outer shelf assemblage is found where organic matter content is the highest (Fig. II.3). The most abundant species in this assemblage are *E. excavatum* subsp. *clavatum*, *N. labradorica*, *L. crassimargo*, and *R. contorta*. *Elphidium excavatum* subsp. *clavatum* is a typical shelf species (Murray, 2006) and was found abundant in surface sediment over the Chukchi shelf (Osterman et al., 1999), although this cited study did not distinguish living from dead fauna. Other species in this assemblage such as *N. labradorica* are either linked to elevated fluxes of fresh phytodetritus (Cedhagen, 1991 ;

Corliss, 1991 ; Polyak and Mikhailov, 1996) or associated with high contents of buried organic matter (Corliss, 1991). Phytoplankton bloom in this area typically occurs in late June-early July (Arrigo et al., 2014), two months before the sampling period. High TOC (Fig. II.3) and the vertical distribution of *N. labradorica* at this station (Fig. II.8) rather suggest the latter case in the present study. From a study conducted over the Kamchatka slope, Bubenshchikova et al. (2008) described *N. labradorica* as an abundant intermediate infaunal species in the sea-ice free mesotrophic zone. The benthic foraminiferal population observed at the shelf St. 01A is made of 40 % of agglutinated specimens, peaking to 70 % in the topmost centimetre (Fig. II.8). This calcareous/agglutinated assemblage is typical of shallow Arctic and subarctic environments (Lagoe, 1977, 1979 ; Osterman et al., 1999 ; Wollenburg and Kuhnt, 2000 ; Husum et al., 2015). In the Chukchi Sea, several authors observed undersaturated seawater $p\text{CO}_2$ during the sea-ice free period across the shelf (Semiletov, 1999 ; Pipko et al., 2002 ; Murata and Takizawa, 2003 ; Bates et al., 2005, 2006 ; Bates, 2006 ; Chen and Gao, 2007 ; Chierici and Fransson, 2009 ; Fransson et al., 2009). In contrast, subsurface seawater $p\text{CO}_2$ values were highly oversaturated (Bates, 2006 ; Bates et al., 2009). These observations are indicative of an efficient organic carbon remineralization in the subsurface waters and into the sediment of the Chukchi continental shelf. Organic carbon remineralization increases $p\text{CO}_2$ and decreases the pH. This process contributes to the acidification of interstitial waters making them further corrosive and leading to partial carbonate dissolution (Bates and Mathis, 2009 ; Bates et al., 2014) which could explain the recorded high abundance of agglutinated species on the shelf sediment of the Chukchi Sea.

The upper slope assemblage is highly dominated by *C. neoteretis*. *Elphidium excavatum* subsp. *clavatum* is dominant only on the upper slope St. 05. *Cassidulina neoteretis* is a shallow infaunal species associated with AIW in the Arctic (Ishman and Foley, 1996 ; Osterman et al., 1999 ; Husum et al., 2015) and typically related to fresh input of phytodetritus (Mackensen and Hald, 1988 ; Gooday and Lambshead, 1989). In addition, and although based only on quick visual examination of dead faunas, we notice that *C. neoteretis* that is dominating the living fauna at Sts. 03 and 05 is completely absent in the dead fauna. *Cassidulina*, a typically opportunistic genus, is, however, generally more abundant in dead assemblages than in living populations in various settings of the world ocean as a consequence of high production rates and short living time (Dessandier et al., 2018). Our paradoxical observations may be related to dissolution in sediment by corrosive interstitial water or active transport by bottom currents directly after the death of the organisms as already suggested earlier explaining higher density

of the dead fauna at deep stations. The presence of this species, indicator of the modified Atlantic Water/Arctic Intermediate Water (Jennings and Helgadottir, 1994), in the living fauna only may also suggest very recent changes in the local hydrology. *Elphidium excavatum* subsp. *clavatum* was observed by Korsun and Hald (2000) in the Tempelfjorden in Svalbard and seems to be related to increasing glacier meltwater discharge. It is a widespread species in Arctic shelves with ability to colonize harsh environments (e.g., Corliss, 1991). Its presence in the living fauna (Fig. II.7b, II.8) may, therefore, suggest high meltwater supply from sea-ice at the location of Sts.01A and 05.

The deep assemblage is essentially made of the surface infaunal species *O. tenerus* and *I. tumidula*. *Ioanella tumidula* dominates St. 02 at 2100 m, while *O. tenerus* is absent. *Oridorsalis tenerus* is overwhelmingly dominant at the deepest St. 04. Note that *O. tenerus* is the only species found at both Sts. 02 and 04 in the 63-125 μm fraction. *Oridorsalis tenerus* and *I. tumidula* (as *Eponides tumidulus*) were found in the same biofacies by Ishman and Foley (1996) at water depths greater than 1300 m in the Canada Basin. Husum et al. (2015) also found these species in the 1300-3700 m water depth interval, on the permanently ice-covered Lomosov Ridge and Alpha Ridge in addition to the seasonally ice-free Nansen Basin. They are, therefore, referred as typically oligotrophic species. Wollenburg and Mackensen (1998a), however, suggest that *O. tenerus* is better adapted to more oligotrophic conditions. Lower TOC values at St. 04, where *O. tenerus* is dominant, compared to St. 02 well supports this idea.

The vertical distribution of the living fauna (Fig. II.8) shows sharp decrease below the first centimetre with the topmost layer being normally the richest, except at St. 02 where no living individuals were found in this upper layer. This is very consistent with the other studies on the distribution of living benthic foraminifera in the Arctic. Wollenburg and Mackensen (1998b) found living individuals down to 8 cm, while in the central Arctic, most of the fauna was concentrated in the upper 2 cm according to the very low flux of organic matter in this permanently ice-covered area. The sampling period during post-bloom conditions as well as the relatively low TOC values measured in sediments of the upper and lower slope stations suggest that a weak input of labile organic matter in this sector of the Chukchi Sea induced the observed shallow (upper 2 cm) habitat of benthic foraminifera. The shallow St. 01A is characterized by a subsurface peak in foraminiferal density between 1 and 3 cm with *N. labradorica*, an intermediate infaunal species (Murray, 2006) as the dominant taxa. The presence of *E. excavatum* subsp. *clavatum*, a shallow infaunal species between 3 and 5 cm at St. 01A suggests local bioturbation or bio-structures. The occurrence at this station of several macro-organisms

such as bivalves and echinoderms as well as a homogeneous $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ activity profile (Fig. II.4) showing relatively stable values down to 6 cm confirms the possible bioturbation or bio-structure systems created by the activity of macro-/meio-fauna. On one hand, bioturbation might explain the unusual occurrence of *E. excavatum* subsp. *clavatum* deeper than expected. On the other hand, the presence of bio-structures leads to particular biochemical conditions and biotic associations which offer microhabitats favourable for the development of benthic foraminifera traditionally found in another range of sediment depth (Loubere et al., 2011) such as *E. excavatum* subsp. *clavatum*.

II.6 Conclusions

This study aims to describe and understand the distribution of living benthic foraminifera in the northern Chukchi Sea continental shelf, and upper and lower slope, an Arctic environment strongly impacted by recent climate changes. According to our observations, various environmental factors may influence the benthic foraminiferal abundance, composition and vertical distribution in the Chukchi Sea.

- (1) The distributional patterns of living faunal assemblages seems to reflect the nature of the bottom water masses according to the three bathymetric sectors of the Chukchi Sea investigated in the present study. Over the shelf bathed by the corrosive Pacific water, agglutinated specimens are abundant. Here, the assemblage is dominated by the calcareous species *E. excavatum* subsp. *clavatum* and *N. labradorica* and the agglutinated species *L. crassimargo* and *R. contortus*. Over the Chukchi slope, under the influence of Atlantic waters, the assemblage is overwhelmingly dominated by *C. neoteretis*. Benthic foraminiferal populations in deep stations bathed by Arctic water are dominated by *I. tumidula* and *O. tenerus*.
- (2) The overall low faunal diversity and standing stock at all stations may reflect post-bloom conditions in late August and early September in the area, and, hence, reduced supply of fresh organic matter to the sea floor. Living standing stocks are much lower in the 63-125 μm size fraction than in the $>125 \mu\text{m}$ fraction. Although a methodological bias cannot be completely excluded, we believe that the conditions at the time of sampling were oligotrophic with highly degraded organic matter that does not favour the presence of opportunistic species often found in the small fraction.

(3) Our results suggest that, in the context of post-bloom conditions, the lower quality of exported organic matter might also explain the observed, exclusively shallow (top-most centimetre) habitat of living benthic foraminifera in sediments of the upper and lower slope. The apparently deepest habitat (down to 5 cm) found over the shelf is probably related to intense bioturbation or bio-structures in this shallow setting, as evidenced by the presence of typical surface dwellers down in the sediment column.

Our study brings several hypotheses on the ecology and preservation of benthic foraminiferal fauna in the northern Chukchi Sea, confirming the key information that this species group can provide about modern and past changes in Arctic circulation and climate.

**Chapitre III : Distribution spatiale et verticale des
foraminifères benthiques vivants dans la baie de
Baffin et le détroit de Nares : relation avec la
disponibilité et la qualité de la matière organique à
l'interface eau-sédiment**

III.1 Introduction

La distribution des faunes modernes de foraminifères benthiques en baie de Baffin et dans les domaines adjacents est étudiée depuis les années 1950. Les travaux pionniers de Phleger (1952), Marlowe et Vilks (1963), Vilks (1964) et Vilks (1969) ont apporté les premières informations relatives à l'écologie et à l'abondance des foraminifères benthiques modernes de la baie de Baffin et de l'archipel arctique canadien. Tous révèlent l'omniprésence des foraminifères benthiques agglutinés dans les eaux froides des plateaux continentaux de l'Arctique canadien et de la baie de Baffin. La nature des masses d'eau est présentée comme étant le facteur principal conditionnant la distribution des assemblages de foraminifères benthiques observés dans ces études. Cette hypothèse est également développée dans l'étude de Hunt et Corliss (1993). Schröder-Adams (1990) propose un contrôle plus important du couvert de banquise sur la distribution des faunes benthiques de l'Arctique canadien. L'abondance relative des foraminifères benthiques agglutinés par rapport à celle des foraminifères calcaires serait liée à la dynamique saisonnière de la banquise accentuant les processus de dissolution des carbonates dans les sédiments. Plusieurs auteurs associent la dissolution des carbonates à l'augmentation de la productivité primaire lors du retrait de la glace de mer, engendrant un export de matière organique important. La dégradation de cette matière organique consomme l'oxygène et augmente la teneur en CO₂, rendant les eaux de fonds corrosives. Les foraminifères benthiques calcaires seraient préservés dans les environnements présentant un couvert de banquise pérenne. Plus récemment, Lloyd (2006) et Schröder-Adams et Van Rooyen (2011) ont étudié plus particulièrement les foraminifères benthiques modernes (vivants et morts) de la baie de Baffin. Parmi les différents facteurs évoqués comme influençant la distribution des foraminifères benthiques, les processus de dissolution des carbonates et les caractéristiques physiques des différentes masses d'eau sont considérés par ces auteurs comme étant les variables de contrôle principales. D'après Wollenburg et Kuhnt (2000), le paramètre environnemental critique influençant les foraminifères benthiques de l'Arctique en termes de densité, diversité et composition des assemblages est l'apport épisodique de nourriture dérivé de la productivité primaire saisonnière. Cependant, le lien entre le flux de matière organique (quantité et qualité) n'est que très peu discuté dans les études sur les faunes modernes de la baie de Baffin et de l'Arctique canadien.

Les régimes atmosphérique et hydrologique ainsi que la dynamique de la banquise de la baie de Baffin conditionnent son fonctionnement environnemental. Le contraste entre les eaux relativement chaudes provenant de l'Atlantique et envahissant la baie de Baffin et les eaux plus

froides transitant depuis le détroit de Nares au nord vers l'ouest de la baie de Baffin influence la dynamique saisonnière de la banquise. Tous ces facteurs environnementaux régissent également la dynamique de la production primaire, maillon élémentaire du développement et du maintien de l'écosystème océanique. Une des particularités de la région de la baie de Baffin est l'établissement saisonnier de la plus grande polynie de l'Arctique, la polynie des eaux du nord (NOW). Cette polynie est décrite comme étant un oasis dans la région arctique. La productivité primaire intense qui prolifère au printemps et en été permet d'instaurer un véritable refuge pour une grande diversité d'espèces marines arctiques. Depuis les dernières décennies, les changements climatiques et environnementaux importants dans les régions arctiques bouleversent cet écosystème fragile et notamment la dynamique de la glace de mer. Cette composante primordiale de l'écosystème arctique régulant les échanges de chaleur et de gaz avec l'atmosphère ainsi que la production phytoplanctonique a un impact majeur sur la chaîne alimentaire marine et donc l'écosystème benthique. Par exemple, la polynie NOW considérée comme étant un système eutrophe tendrait à perdre cette caractéristique et à devenir un milieu mésotrophe dans les prochaines années (Blais et al., 2017).

Dans ce contexte environnemental perturbé, cette étude s'intéresse à mieux comprendre la distribution des foraminifères benthiques vivants en période estivale et automnale dans la baie de Baffin et le détroit de Nares. Les stations d'échantillonnage couvrent une large partie de la baie de Baffin de l'ouest à l'est et au nord. Cette répartition étendue permet de discuter de la distribution des foraminifères benthiques vivants, dans des secteurs très différents de cette région en termes de masses d'eau, de couverture de glace de mer ou encore de productivité primaire. Les foraminifères benthiques sont couramment utilisés comme proxy dans les reconstructions paléoenvironnementales de la baie de Baffin et de l'Arctique canadien (e.g., Osterman et Nelson 1989 ; Mudie et al., 2006 ; Seidenkrantz et al., 2007 ; Knudsen et al., 2008 ; Seidenkrantz, 2013). Notre étude contribue ainsi, via une meilleure connaissance de l'écologie des foraminifères benthiques arctiques, à confirmer l'intérêt de ce groupe biotique comme proxy des paléoenvironnements des hautes latitudes nord et à améliorer les reconstructions paléoenvironnementales sur lequel elles s'appuient en baie de Baffin et dans ses domaines adjacents.

III.2 Zone d'étude

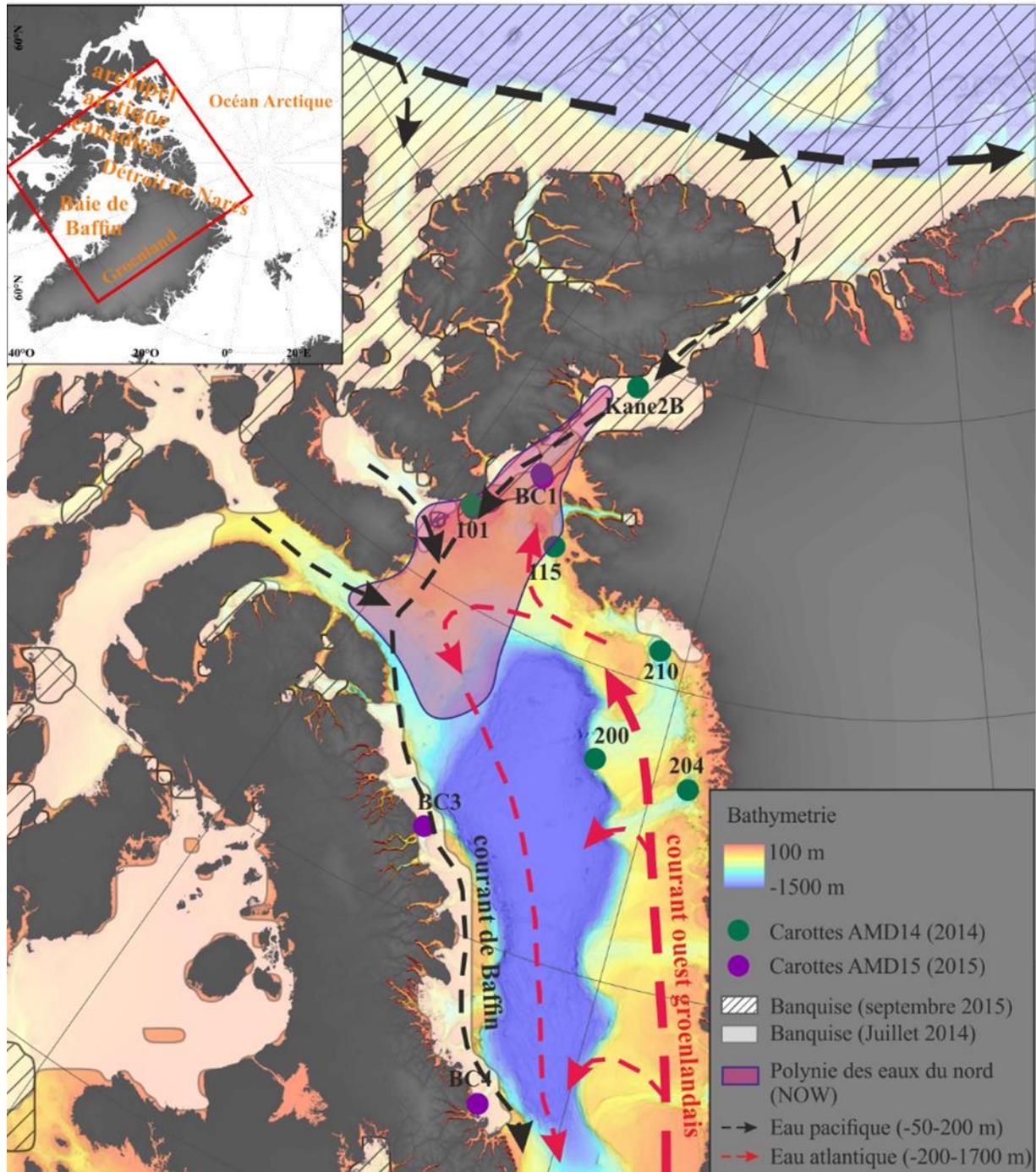


Figure III.1 : Carte de présentation de la zone d'étude avec les positions des carottes issues des missions AMD14 et AMD15, l'étendue de la glace de mer en juillet 2014 et septembre 2015 (NSIDC; Fetterer et al., 2016) et une représentation schématique de la circulation océanique modifiée d'après Solignac et al. (2011).

III.2.1 La baie de Baffin

La baie de Baffin est un large bras de mer ouvert sur l'océan Atlantique au sud. Elle est bordée à l'est par le Groenland, à l'ouest par l'île de Baffin et au nord par l'archipel arctique canadien et l'île d'Ellesmere. Ce bassin semi-fermé a une profondeur moyenne de 2400 mètres (Baker et Friedman, 1973 ; Schröder-Adams et Van Rooyen, 2011). A l'ouest, ses plateformes sont étroites, escarpées et entrecoupées de profonds sillons. La plateforme est plus étendue à l'est et entrecoupée de paléo-vallées glaciaires. La distribution des sédiments dans la baie de Baffin est contrôlée principalement par les apports sédimentaires dus à des déstabilisations gravitaires (turbidites, coulées de débris...) et aux icebergs (Aksu et Piper, 1979 ; de Vernal et al., 1992). Une des particularités de la baie de Baffin est la faible profondeur de la limite de compensation des carbonates (CCD). D'après Aksu (1983), la CCD est comprise entre 600 et 900 m de profondeur et la lysocline des foraminifères se situerait plutôt autour de 100 à 300 m de profondeur. Les eaux froides de surface dans la baie contiennent peu d'oxygène dissous ($< 350 \mu\text{mol/kg}$) mais une forte concentration en CO_2 ($> 2110 \mu\text{mol/kg}$) entraînant la hausse de l'alcalinité (Jones et Levy, 1981).

Plusieurs détroits et canaux relient la baie de Baffin à l'océan arctique au nord via les étroits chenaux de l'archipel arctique canadien et le détroit de Nares notamment. Au sud, la baie de Baffin est connectée à l'océan Atlantique par le détroit de Davis. La circulation océanique au sein de la baie de Baffin est cyclonique et comprend deux courants principaux (Fig. III.1). A l'est de la baie, le courant ouest groenlandais transporte vers le nord le long de la côte groenlandaise, une masse d'eau atlantique modifiée relativement chaude et salée (Cuny et al., 2005). Différentes branches de ce courant permettent l'advection de cette masse d'eau atlantique au centre de la baie de Baffin. Le long de la côte est canadienne, une masse d'eau plus froide et moins salée d'origine arctique est entraînée vers le sud par le biais du courant de Baffin. Cette circulation océanique particulière affecte la dynamique de la banquise (Tang et al., 2004). En hiver, la baie est intégralement couverte de banquise. L'étendue de la banquise est maximale en février-mars. D'avril à août, la banquise décroît progressivement atteignant son minimum d'extension en août-septembre. Le retrait de la banquise s'effectue depuis le sud-est vers le nord-ouest du fait de la présence d'une masse d'eau plus chaude remontant de l'Atlantique le long de la côte groenlandaise.

La fonte annuelle de la banquise au printemps et en été influence la dynamique phytoplanctonique et par conséquent les écosystèmes benthiques. Les blooms

phytoplanctoniques sont communément observés le long des bordures de glace durant la période de fonte (e.g., Sakshaug, 2004 ; Perette et al., 2011). Divers facteurs tels que l'énergie solaire, les apports d'eau douce et de nutriments ont tendance à favoriser la productivité primaire dans ces zones. Cette production phytoplanctonique constitue un apport majeur de nourriture pour les organismes benthiques, dont les foraminifères benthiques (e.g., Wassmann, 1984 ; Grebmeier et Barry, 1991 ; Morata et Renaud, 2008). Dans la baie de Baffin la production primaire annuelle varie entre 60 et 120 gC.m⁻² (Platt et al., 1982 ; Jensen et al., 1999).

III.2.2 La polynie des eaux du nord (NOW)

Cette polynie est une composante exceptionnelle de la région arctique. Etendue entre le nord de la baie de Baffin et l'entrée sud du détroit de Nares, elle est considérée comme étant la polynie la plus vaste et la plus productive de l'Arctique. La polynie débute son développement entre la fin du mois de mars et le début du mois d'avril et atteint son expansion maximale en juillet avec une superficie comprise entre 80 000 et 90 000 km² (Lewis et al., 1996 ; Fortier et al., 2001). En été, elle est alors ouverte sur la baie de Baffin et n'est donc plus une polynie au sens strict. L'existence de la polynie résulte de la combinaison de facteurs atmosphériques et océaniques. La formation de ponts de glace au nord agissant comme une barrière bloquant les glaces dérivantes provenant du nord et les puissants vents du nord permettent de maintenir la zone libre de glace (Ingram et al., 2002 ; Tremblay et al., 2006).

La polynie NOW est importante pour la productivité primaire et la biodiversité. Cette zone libre de glace engendre un bloom de printemps précoce par rapport à la région (Marchese et al., 2017). La forte productivité relevée dans la polynie résulte de l'action combinée de plusieurs facteurs physiques dont notamment la lumière, un mélange efficace par le vent des eaux de surface et l'advection de nutriments dans la zone euphotique du fait du mélange vertical de la colonne d'eau et de l'apport d'eaux pacifiques riches en nutriments (e.g., Klein et al., 2002 ; Tremblay et al., 2002). La production primaire annuelle atteint 150 gC.m⁻² dans la polynie (Klein et al., 2002 ; Tremblay et al., 2002). Cependant, l'écosystème de la polynie est sujet à une grande variabilité interannuelle (e.g., Kwok et al., 2010). Depuis la dernière décennie, la productivité annuelle dans la polynie a fortement diminué (Bélanger et al., 2013). L'étude de Bergeron et Tremblay (2014) a montré une baisse de 65 % de la production nette entre 1997 et 2011, attribuée à un rafraîchissement et une augmentation de la stratification des eaux de surface. L'amplitude du bloom phytoplanctonique aurait également diminuée depuis

Chapitre III

10 ans (Marchese et al., 2017). D'après Blais et al. (2017), cette baisse nette de la production phytoplanctonique et de l'abondance des diatomées serait probablement due à des changements dans la dynamique de la banquise et la stratification de la colonne d'eau.

III.2.3 Le détroit de Nares

Le détroit de Nares, étroit et long de 530 km, sépare le nord-ouest du Groenland de l'île d'Ellesmere. Il s'étire du nord de la baie de Baffin à la mer de Lincoln dans l'océan Arctique et constitue la principale connexion dans la région entre l'océan Arctique et l'océan Atlantique via la baie de Baffin. La circulation océanique s'effectue principalement vers le sud depuis l'océan Arctique (Kliem et Greenberg, 2003 ; Münchow et al., 2006). Un puissant vent du nord affecte également la région (Samelson et Barbour, 2006 ; Münchow et al., 2007 ; Rabe et al., 2012). La masse d'eau arctique transportée à travers le détroit de Nares est moins salée que l'eau atlantique retrouvée dans la baie de Baffin. Cette eau arctique est largement composée d'eau d'origine pacifique riche en nutriments et d'eau douce venant des rivières et de la fonte des glaces (Münchow et al., 2007). L'eau pacifique est deux fois plus riche en azote et en phosphore et sept fois plus riche en silicate que l'eau atlantique (Jennings et al., 2011). Ces caractéristiques induisent une augmentation de la production primaire notamment au moment de la fonte de la banquise et donc une augmentation de la production benthique. Une partie de la masse d'eau atlantique provenant de la baie de Baffin est transportée le long de la côte groenlandaise et pénètre à l'intérieur du détroit de Nares jusqu'au bassin de Kane (Bailey, 1957 ; Melling et al., 2001 ; Münchow et al., 2007). Le bassin de Kane d'une superficie de 27 000 km² est relativement large (120 km maximum) et peu profond (220 m). Une grande quantité d'icebergs provenant du glacier groenlandais de Humboldt se déverse dans le bassin de Kane. De septembre à juin, plus de 80 % du détroit de Nares est couvert de banquise (Barber et al., 2001). Une des particularités de ce détroit est la présence de ponts de glace qui bloquent la dérive de la glace vers la baie de Baffin et favorisent la formation et le maintien de la polynie NOW (Melling et al., 2001).

III.3 Matériels et méthodes

Les carottes sédimentaires d'interface à la base de cette étude ont été prélevées lors de deux missions océanographiques du programme ArcticNet et du projet ANR Greenedge à bord du navire de recherche canadien NGCC Amundsen (Tableau III.1 ; Fig. III.1). Une première mission, AMD14, a permis l'acquisition de cinq carottes entre le 27 Juillet et le 04 Août 2014.

Chapitre III

Trois autres carottes ont été échantillonnées lors de la campagne AMD15 du 1^{er} Octobre au 1^{er} Novembre 2015.

*Tableau III.1 : Informations sur les stations échantillonnées, la température et la salinité relevées aux profondeurs d'échantillonnage grâce à une sonde CTD ainsi que les valeurs de surface de Chl *a* issues du satellite MODIS Aqua.*

Missions	Stations	Longitudes	Latitudes	Profondeurs (m)	T (°C)	S (°C)	Chl <i>a</i> (mg.m ⁻³)
AMD14	Kane2B	-70,9631	79,5556	217	0,1	34,6	0,8
AMD14	101	-77,6928	76,4289	365	0,5	34,2	0,8
AMD14	115	-71,3078	76,5397	655	0,1	34,4	1,1
AMD14	210	-61,8431	75,5594	1152	1,6	34,5	0,4
AMD14	204	-57,9567	73,4294	995	1,8	34,5	0,5
AMD14	200	-63,6508	73,5147	1448	0,1	34,5	0,5
AMD15	BC1	-74,4689	77,4739	702	0	34,4	1,2
AMD15	BC3	-70,9042	71,4039	832	1,3	34,5	0,4
AMD15	BC4	-63,6578	67,4939	689	1,3	34,5	0,7

Le sédiment a été prélevé grâce à un carottier à caisson puis sous-échantillonné par des tubes de 9 cm de diamètre lors de la mission AMD14 et 15 cm lors de la mission AMD15. Suite aux prélèvements des carottes, le sédiment a été découpé depuis la surface jusqu'à 5 cm par tronçons de 1 cm pour les carottes de la mission AMD14 et par tronçons de 0,5 cm pour celles de la mission AMD15. Un jeu de carottes était destiné à l'analyse des foraminifères benthiques vivants tandis qu'un deuxième jeu de carottes a servi aux analyses sédimentologiques et géochimiques. La température et la salinité ont été mesurées dans la colonne d'eau pour chaque station à l'aide d'une sonde Conductivity Temperature Depth (CTD).

III.3.1 Données satellitaires

La distribution de surface de la biomasse phytoplanctonique dans la zone d'étude durant les périodes d'échantillonnage est illustrée par les concentrations moyennes mensuelles en chlorophylle *a* (Chl *a* en mg.m⁻³) en juillet 2014 et septembre 2015 extraites des données satellitaires collectées par le spectroradiomètre MODIS installé sur le satellite Aqua. Les images composites d'une résolution de 4 km sont issues de l'application Giovanni développée par la NASA (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>).

III.3.2 Analyses sédimentologiques et géochimiques

L'analyse de la taille des grains des sédiments a été réalisée au laboratoire EPOC grâce à un granulomètre à diffraction laser de type Malvern Mastersizer 2000 hydro G. La taille des grains a été mesurée pour chaque carotte tous les centimètres depuis la surface jusqu'à 5 cm à partir d'échantillons de sédiment lyophilisé. Les résultats présentent une répartition unimodale de la taille des grains pour chaque carotte étudiée. De plus, chaque carotte montre une répartition de la taille des grains constante pour tous les niveaux. De ce fait, la moyenne de la médiane granulométrique (D_{50}) peut donc être considérée comme représentative de la taille des grains du sédiment de surface (0-5 cm) de chaque carotte étudiée.

Les échantillons lyophilisés ont également servis à mesurer différents paramètres géochimiques au laboratoire EPOC. Les teneurs en carbone (TC) et en carbone organique total (TOC) du sédiment ont été mesurées en utilisant un analyseur du type LECO CS 125 (Cauwet et al., 1990). La teneur en azote total (TN) ainsi que les rapports isotopiques du carbone organique ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) et de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) ont été obtenus par spectrométrie de masse en utilisant conjointement l'IRMS Isoprime avec un analyseur élémentaire Flash 2000. Le TOC et le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ont été analysés après décarbonatation du sédiment avec de l'HCl (1N). Le TOC et le TN sont exprimés en pourcentage (%) et les rapports isotopiques en pour mille (‰). Les erreurs analytiques sont environ de $\pm 0,1$ % pour les valeurs de TOC et TN et $\pm 0,1$ ‰ pour les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ et $\delta^{15}\text{N}$. Le rapport C/N a été calculé en divisant le TOC par le TN.

III.3.3 Analyses des faunes de foraminifères benthiques vivants

Les échantillons utilisés pour l'analyse des foraminifères benthiques vivants ont été préservés dans un mélange d'éthanol (96 %) et de rose Bengale ($1,5 \text{ g.L}^{-1}$) dans le but de colorer l'endoplasme des organismes vivants au moment du prélèvement des carottes (Walton, 1952 ; Murray and Bowser, 2000). Au laboratoire EPOC, les échantillons ont été lavés et tamisés à travers deux tamis de $63 \mu\text{m}$ et $125 \mu\text{m}$. Seule la fraction $>125 \mu\text{m}$ a été analysée dans le cadre de cette étude pour des raisons de temps essentiellement, la fraction $63\text{-}125 \mu\text{m}$ étant particulièrement chronophage. La totalité des foraminifères benthiques vivants dans la fraction $>125 \mu\text{m}$ depuis la surface jusqu'à 5 cm de profondeur dans le sédiment a été piquée manuellement à l'aide d'un pinceau dans un milieu liquide (éthanol et eau milli-Q[®]) sous une loupe binoculaire. La coloration rose des faunes vivantes est généralement bien visible par transparence à travers le test des organismes. Cependant, cette coloration peut présenter des différences selon les espèces, variant du rose léger au rouge foncé voir brun-violet (Schönfeld

Chapitre III

et al., 2012). De plus, la méthode de marquage de l'endoplasme des organismes vivants au rose Bengale présente quelques biais à savoir par exemple que les tissus peuvent être préservés dans les environnements profonds et anoxiques et la coloration aura donc tendance à marquer des individus morts en réalité (Bernhard et al., 2006). Néanmoins, la méthode du rose Bengale montre des résultats fiables et reste la méthode la plus appropriée pour l'étude des foraminifères benthiques vivants (Murray and Bowser, 2000). Un critère strict a été appliqué afin de ne collecter que les individus vivants au moment du prélèvement des carottes : toutes les loges doivent être colorées exceptée la dernière (Fontanier et al., 2002 ; Phipps et al., 2012).

Les espèces sont considérées comme majeures lorsqu'elles représentent au moins 5% de l'assemblage total de foraminifères benthiques comptés dans la carotte. La densité des faunes pour chaque niveau a été standardisée pour un volume de sédiment de 50 cm³. Au préalable, le volume réel de sédiment a été calculé pour chaque échantillon suivant la méthode présentée dans le protocole FOBIMO (Schönfeld et al., 2012). La densité totale des faunes vivantes dans chaque carotte est présentée comme étant le nombre total d'individus vivants standardisé pour une surface de sédiment de 100 cm².

III.4 Résultats

III.4.1 Caractéristiques environnementales

Les masses d'eau dans la baie de Baffin ont deux origines, l'océan Arctique et l'océan Atlantique. La Figure III.2 présente les profils de température et salinité mesurés à chaque station permettant de discriminer les masses d'eau affectant la région.

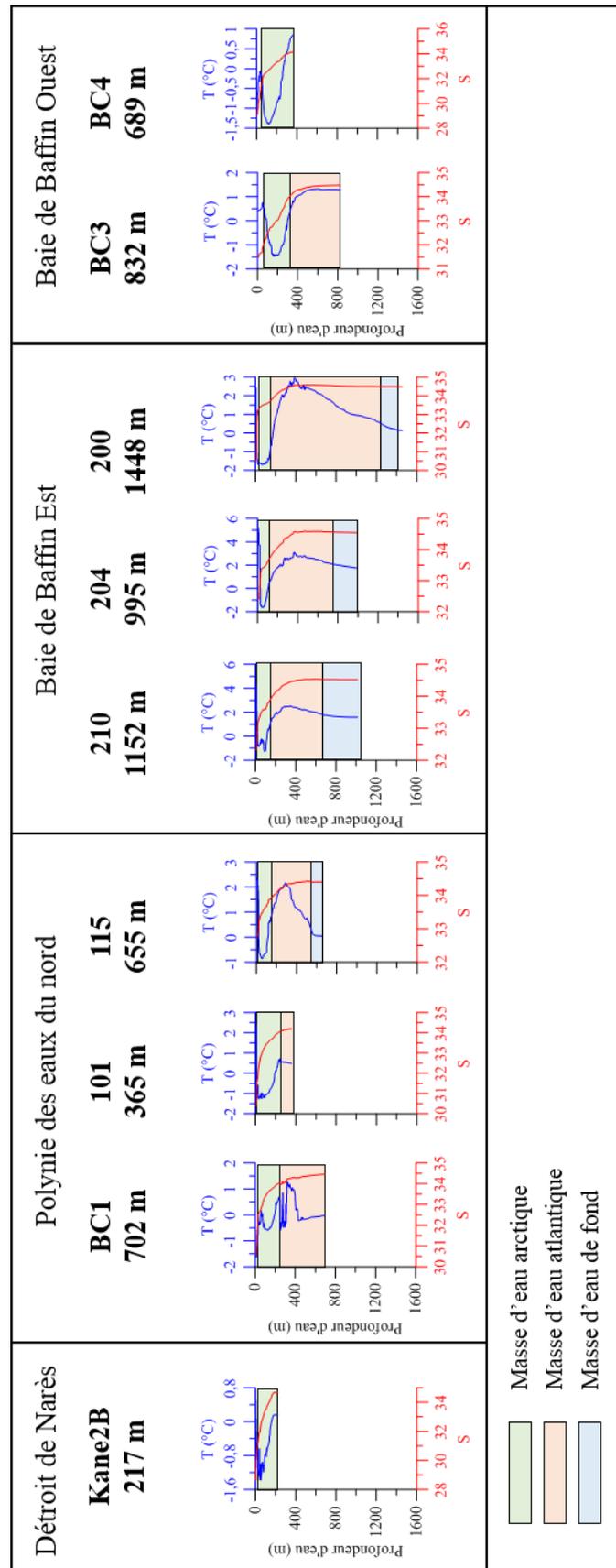


Figure III.2 : Profils de température et salinité mesurés dans la colonne d'eau en juillet 2014 pour les stations Kane2B, 101, 115, 210, 204 et 200 et en octobre 2015 pour les stations BC1, BC3 et BC4.

Chapitre III

Dans le bassin de Kane, la masse d'eau arctique froide ($< 0^{\circ}\text{C}$) et dessalée (< 34) domine. Elle est présente dans toute la région de la baie de Baffin, jusqu'à 300 mètres de profondeur au nord et à l'ouest et moins étendue à l'est, n'atteignant pas 200 mètres de profondeur. La masse d'eau atlantique est plus chaude ($> 0^{\circ}\text{C}$) et plus salée (> 34). A l'est de la baie de Baffin, le courant ouest groenlandais transporte cette masse d'eau vers le nord. Cependant, la masse d'eau atlantique occupe un volume plus important au sud qu'au nord de la baie. En effet, elle s'étend jusqu'à 1200 mètres de profondeur à la station 200 puis son épaisseur diminue progressivement en remontant vers le nord n'atteignant plus que 600 mètres de profondeur à la station 115. La température de cette masse d'eau est également plus élevée au sud (environ 3°C) qu'au nord (autour de 1°C). Sous la masse d'eau atlantique se trouve une masse d'eau de fond plus froide (environ $0,5^{\circ}\text{C}$). La salinité est uniforme autour de 34,5. Les différences observées dans ces résultats reflètent la circulation océanique de la baie de Baffin avec l'apport d'eau chaude et salée venant de l'océan Atlantique le long de la côte groenlandaise vers le nord et l'apport d'eau arctique froide et moins salée depuis l'archipel arctique canadien et le détroit de Nares vers le sud, le long des côtes canadiennes. Ces résultats sont en adéquation avec les observations de Tang et al. (2004) qui décrit la circulation et la distribution des masses d'eau dans la baie de Baffin.

La biomasse phytoplanctonique dans la région étudiée se concentre principalement à l'est de la baie de Baffin ainsi qu'au nord, dans la zone de la polynie et au niveau du détroit de Nares (Fig. III.3). Les concentrations en Chl *a* dans ces zones atteignent 2 mg.m^{-3} . La Figure III.3 montre qu'en juillet 2014, la biomasse phytoplanctonique semble plus importante qu'en septembre 2015. La polynie NOW est la région la plus productive de la zone étudiée (Mei et al., 2002 ; Tremblay et al., 2002). Un bloom important se développe aux mois de mai et juin puis la biomasse phytoplanctonique commence à décroître en juillet et août pour s'estomper petit à petit à partir du mois du septembre (Marchese et al., 2017).

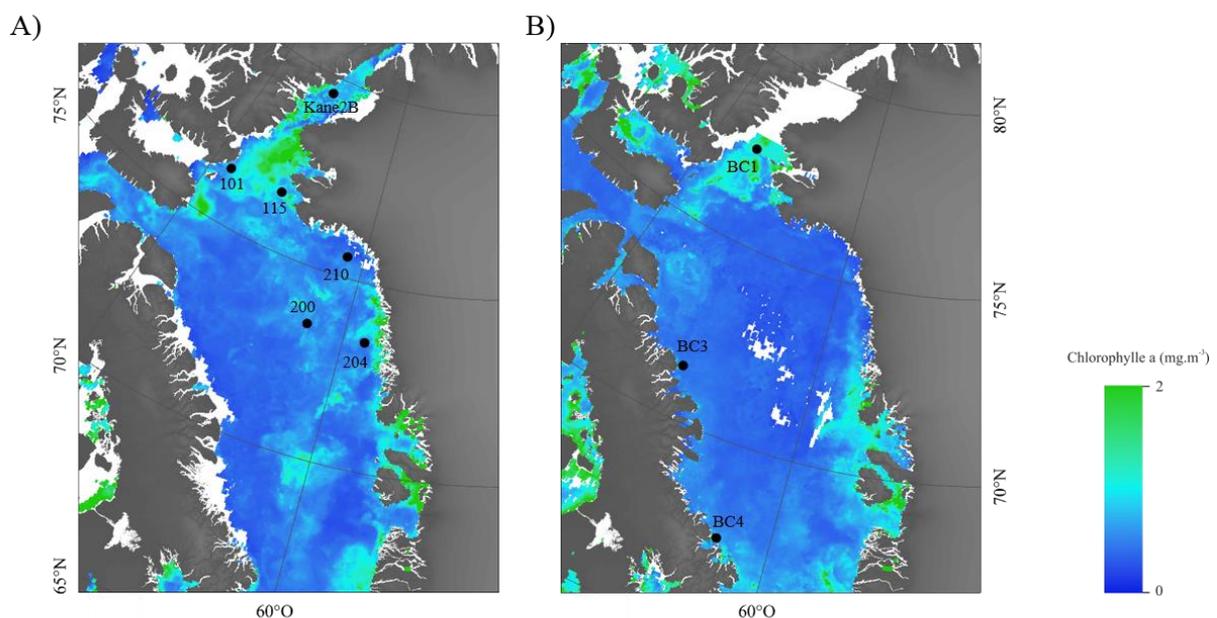


Figure III.3 : Concentrations mensuelles de Chl. *a* (mg.m^{-3}) pour A) juillet 2014 et B) septembre 2015.

Les paramètres physiques et géochimiques du sédiment mesurés pour cette étude sont présentés en Figure III.4. Le sédiment est principalement argilo-silteux. La fraction $>125 \mu\text{m}$ utilisée pour l'analyse des foraminifères benthiques est cependant essentiellement composée de grains lithiques, traduisant en cela l'importance des processus de transport par les glaces dérivantes (Ice Rafted Détrit) dans la zone d'étude. Seules les stations 101 et BC1 situées dans la polynie NOW contiennent un grand nombre de frustules de diatomées reflétant la productivité primaire intense au droit de ces stations.

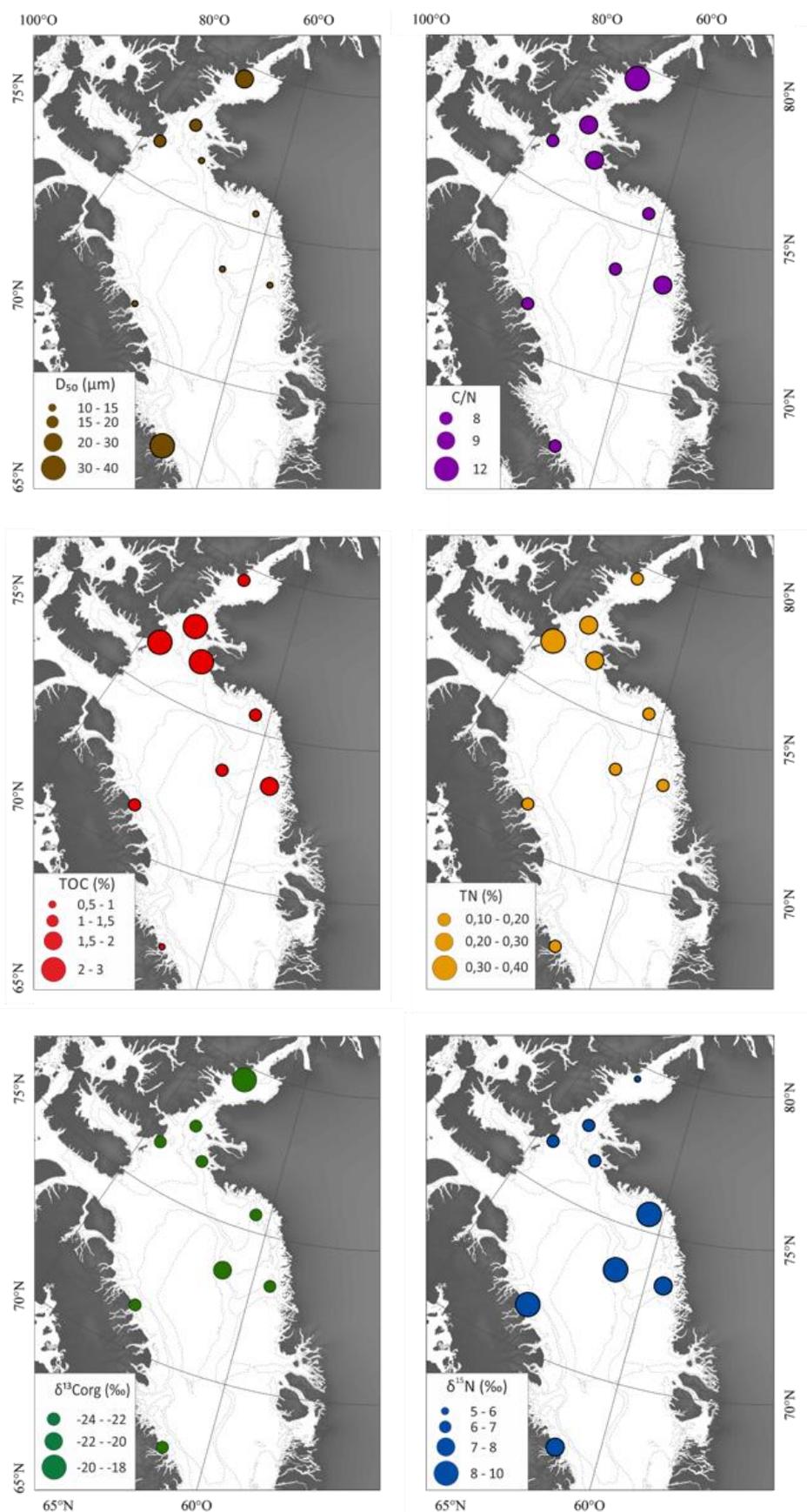


Figure III.4 : Distribution des principaux paramètres environnementaux mesurés (D_{50} , C/N, TOC, TN, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, $\delta^{15}\text{N}$).

La zone de la polynie NOW se démarque également du reste de la région étudiée par des teneurs en TOC et TN plus élevées dans nos sédiments de surface. Au niveau de la baie de Baffin et du détroit de Nares, le TOC varie autour de 1 % et le TN est compris entre 0,10 et 0,20 %. Dans la polynie NOW, le TOC est supérieur à 2 % et le TN est supérieur à 0,20 % atteignant 0,33 % à la station 101. Ces valeurs sont en adéquation avec celles relevées durant les étés 1998 et 1999 dans la même zone par Hamel et al. (2002) et seraient donc représentatives de valeurs moyennes pour cette région. De plus, ces auteurs indiquent que les valeurs de TOC dans les sédiments de surface de la zone affectée par la polynie sont significativement plus élevées que celles mesurées dans les autres environnements arctiques ou subarctiques. Nos résultats indiquent que le rapport C/N est égal à 8 et 9 pour toutes les stations excepté à la station Kane2B où des valeurs atteignant 12 ont été mesurées. La matière organique des sédiments de surface de la baie de Baffin et du détroit de Nares provient essentiellement de la production primaire marine mais contient tout de même une petite part d'apport terrigène comme le suggèrent les valeurs du rapport C/N, légèrement supérieures à celles représentatives de la matière organique d'origine marine (5 à 7 ; Redfield, 1963). Cette part est plus importante dans le détroit de Nares où les sédiments holocènes sont riches en particules de charbons issues de séries paléogènes présentes sur le littoral de l'île d'Ellesmere (Kravitz, 1976).

Le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ est utilisé pour indiquer l'importance relative des apports marins vs terrigènes (Sackett, 1964) mais aussi les changements de concentration en CO_2 dans les eaux de surface (Jasper et Hayes, 1990 ; Rau et al., 1982 ; Rau et al., 1992). En général, la matière organique marine est isotopiquement plus lourde que celle des angiospermes (toundra et taïga) en C_3 qui constituent l'essentiel de la végétation arctique. Les plantes terrestres en C_4 ne se développent pas aux hautes latitudes et ne contribuent donc pas aux apports de carbone dans la région arctique (Teeri et Stowe, 1976 ; Ehleringer, 1979). Nos résultats montrent que le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ est relativement constant dans la région étudiée avec des valeurs oscillant autour de -22 et -21 ‰. A la station Kane2B, le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ est un peu plus élevé, supérieur à -20 ‰. Les études de Naidu et al. (1993, 2000) des isotopes stables du carbone dans les sédiments du plateau continental amériasién (mers de Bering, Chukchi, Sibérie et Beaufort) ont permis de déterminer des valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ terrigènes autour de -27 ‰ et -24 à -21 ‰ pour le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ marin. D'après Pomerleau et al. (2011), le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ marin est estimé à -21 ‰ dans la région de la baie de Baffin. Cette valeur est déduite de la moyenne du $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ des espèces dominantes de zooplanctons, consommateurs primaires, en baie de Baffin. D'après nos résultats, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ mesurées dans les sédiments des stations de la baie de Baffin et de la polynie NOW expriment la même tendance

que les valeurs de C/N, c'est-à-dire une matière organique d'origine marine avec un léger apport terrigène. La station Kane2B est particulière avec une valeur de $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ plus élevée (-19,5 ‰, Fig. III.4). En Arctique, les algues proliférant sous la glace de mer sont une composante spécifique qui peut intervenir dans le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ des sédiments. En effet, la faible concentration en CO_2 dissous dans l'eau recouverte par la glace de mer induit un enrichissement en $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ des algues de glace. Le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ dérivé des algues de glace fluctue autour de -18 ‰ (Hobson et Welch, 1992 ; Hobson et al., 1995). La valeur du $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ relevée à la station Kane2B traduit la présence de cette glace de mer pendant la majeure partie de l'année dans le détroit de Nares.

Le $\delta^{15}\text{N}$ mesuré dans les sédiments est utilisé pour tracer l'utilisation relative dans les eaux de surface des nitrates (NO_3^-), nutriment essentiel à la production primaire (Altabet et François, 1994 ; Farrell et al., 1995 ; François et al., 1992). Il est dépendant de la composition isotopique de l'azote présent dans la masse d'eau de surface et du fractionnement isotopique issu de l'assimilation des nutriments azotés par le phytoplancton. Dans la zone photique, le phytoplancton utilise préférentiellement les nitrates isotopiquement plus légers ($^{14}\text{NO}_3^-$). Nos résultats indiquent que le $\delta^{15}\text{N}$ est légèrement différent entre la baie de Baffin avec des valeurs comprises entre 7 et 9 ‰ et la région de la polynie NOW et du détroit de Nares qui présentent des valeurs plus faibles autour de 5 à 6 ‰. Malgré une intense activité biologique dans la polynie, les eaux pacifiques riches en nutriments arrivant de l'océan Arctique permettent de maintenir des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ relativement faibles. En revanche, les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ mesurées dans les sédiments de la baie de Baffin sont plus élevées traduisant une disponibilité en nutriments moindre dans les eaux de surface provenant de l'Atlantique Nord.

III.4.2 Distribution des foraminifères benthiques vivants

L'Arctique et la baie de Baffin en particulier sont des régions connues pour abriter de nombreux spécimens de foraminifères benthiques agglutinés (e.g., Schröder-Adams, 1990 ; Scott et Vilks, 1991 ; Wollenburg et Kuhnt, 2000 ; Lloyd, 2006). Les résultats de notre étude n'échappent pas à cette règle. En effet, toutes les stations étudiées présentent au moins 50 % d'individus agglutinés excepté la station BC1 avec seulement 26 % (Fig. III.5A). Les stations BC3, 200, 210, 115 et 101 contiennent le plus d'individus agglutinés dans leurs assemblages respectifs (>75 %). La station 210 est entièrement composée de foraminifères benthiques agglutinés.

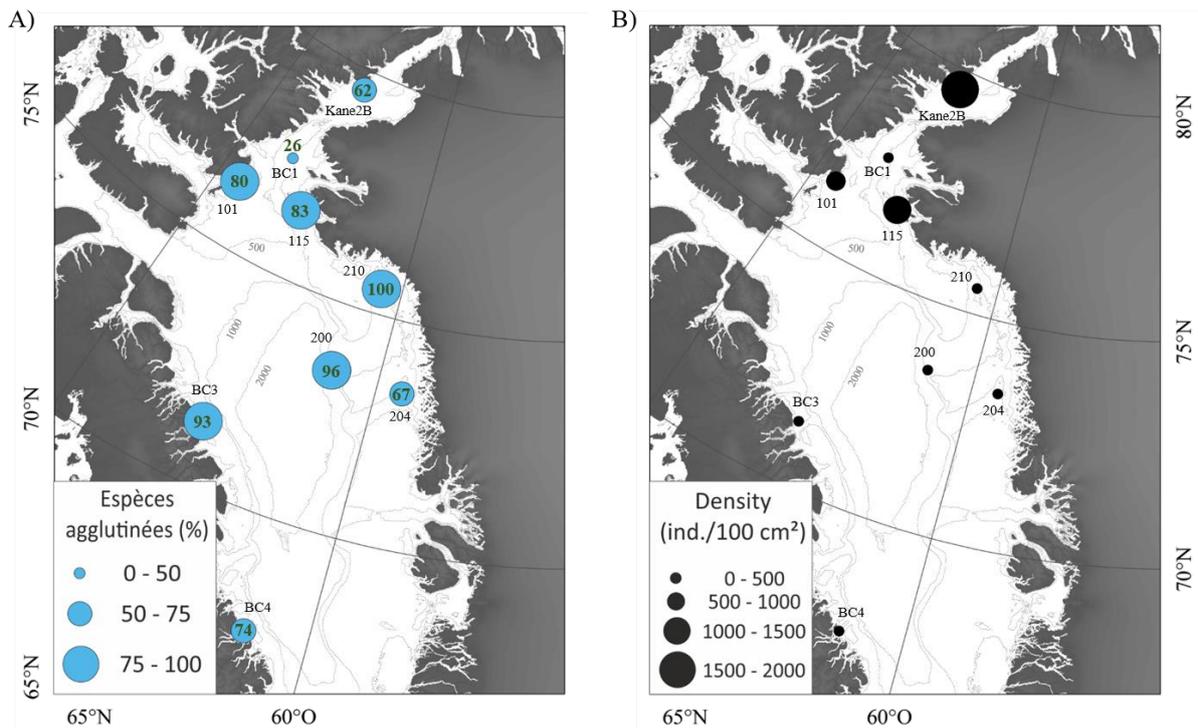


Figure III.5 : A) Proportion des espèces agglutinées et B) densité de foraminifères benthiques vivants par 100 cm² pour chaque station étudiée.

Les densités de faunes vivantes pour chaque carotte exprimées en nombre d'individus par 100 cm² sont représentées en Figure III.5B et au centre des diagrammes en secteur de la Figure III.6A. Les plus faibles densités sont rencontrées dans la baie de Baffin (entre 150 et 324 ind./100 cm²) et à la station BC1 (260 ind./100 cm²). Elle est plus élevée dans la polynie NOW avec une densité supérieur à 1000 ind./100 cm² à la station 115. La densité la plus forte est relevée à la station Kane2B avec 1756 ind./100 cm².

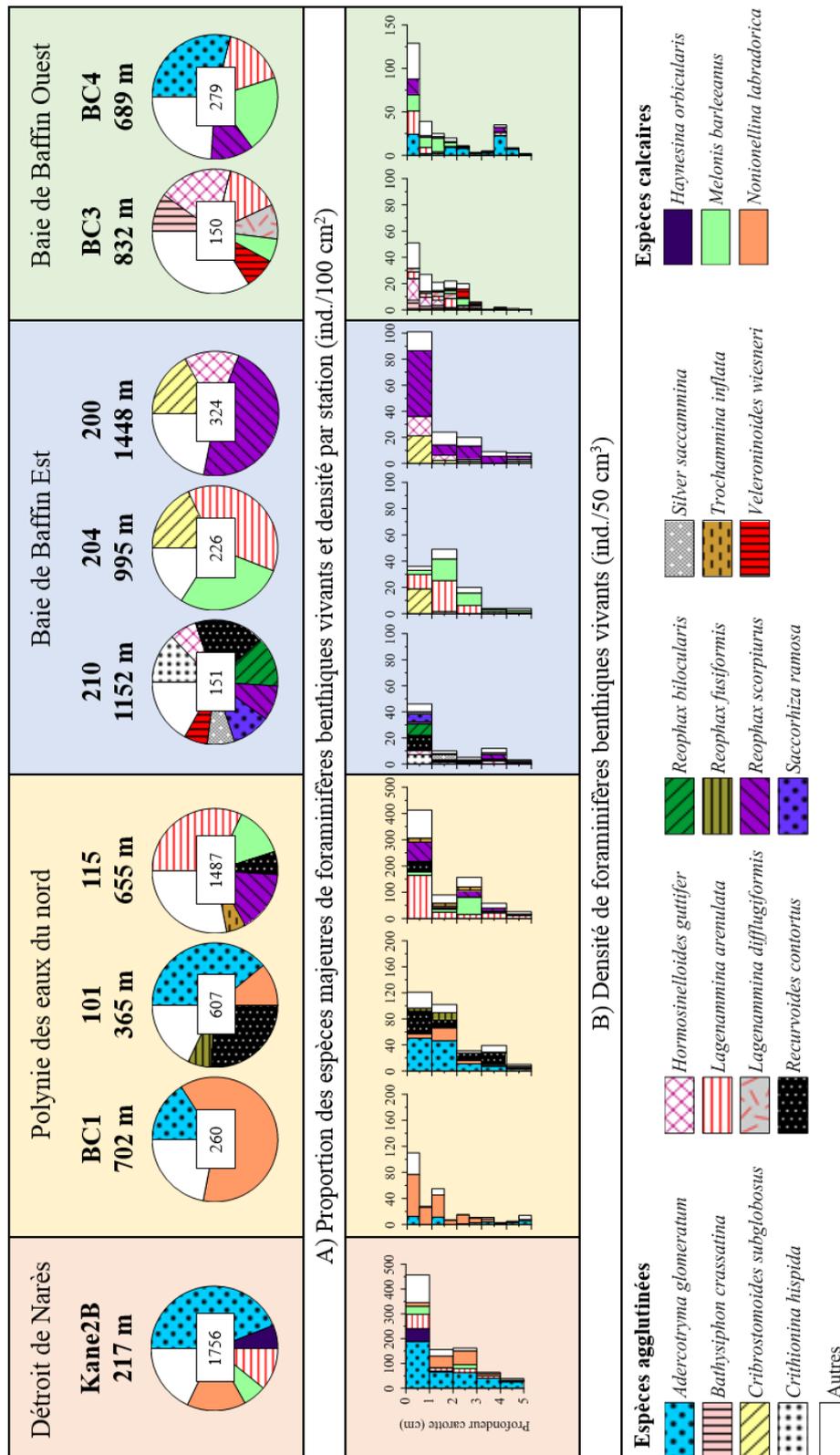


Figure III.6 A) Proportions des espèces majeures de foraminifères benthiques vivants dans les 5 premiers centimètres de sédiment des carottes. Les densités totales exprimées en nombre d'individus vivants par 100 cm² pour chaque station sont indiquées au centre des diagrammes. B) Distribution verticale des espèces majeures de foraminifères benthiques vivants présentée comme la densité des espèces par échantillon exprimée en nombre d'individus par 50 cm³ en fonction de la profondeur dans la carotte.

Chapitre III

Les espèces majeures observées dans les échantillons sont illustrées sur la planche en annexe 2. Pour toutes les stations, l'abondance relative des espèces majeures est illustrée en Figure III.6A. La station Kane2B située dans le détroit de Nares est dominée par une espèce agglutinée, *Adercotryma glomerata* (44 %). Une autre espèce agglutinée, *Lagenammina arenulata*, est présente avec une abondance relative de 11 %. Des espèces calcaires composent également l'assemblage de la station Kane2B avec notamment *Nonionellina labradorica* (15 %) et dans une moindre proportion, *Haynesina orbiculare* et *Melonis barleeanus* (6 % chacune). Les espèces *A. glomerata* et *N. labradorica* se retrouvent également en forte proportion au niveau de la polynie NOW, dans les carottes BC1 (respectivement 16 % et 62 %) et 101 (respectivement 26 % et 11 %). *Recurvoïdes contortus* (26 %) et *Reophax fusiformis* (6 %) s'associent à ces deux espèces dans la carotte 101. L'assemblage de la station 115, située dans la polynie NOW, est différent de celui des deux autres stations proches, 101 et BC1. Les espèces majeures présentent des similitudes avec celles retrouvées dans les carottes de la baie de Baffin. *Lagenammina arenulata* (32 %) est l'espèce dominante de cette station. Trois autres espèces agglutinées *Reophax scorpiurus* (16 %), *R. contortus* (6 %) et *Trochammina inflata* (5 %) ainsi qu'une espèce calcaire, *M. barleeanus* (13 %) viennent compléter l'assemblage de la station 115. Dans la baie de Baffin, les espèces de foraminifères benthiques vivants observées sont essentiellement agglutinées. Les assemblages se composent donc d'un mélange d'espèces agglutinées sans tendance particulière entre les stations. *Lagenammina arenulata*, *R. scorpiurus* et *Hormosinelloides guttifer* se retrouvent entre autre dans plusieurs carottes. *Melonis barleeanus* est la seule espèce calcaire faisant partie des espèces majeures de la baie de Baffin. L'espèce *A. glomerata* présente aux stations Kane2B, BC1 et 101 se distingue également à la station BC4 avec un pourcentage de 29 %.

La distribution verticale des foraminifères benthiques vivants pour chaque station est présentée en Figure III.6B. La densité et la diversité sont toujours plus importantes dans les 2 premiers centimètres de sédiment. La station Kane2B présente la densité de surface la plus élevée avec 457 ind./50 cm³. *Adercotryma glomerata* y est présente jusqu'à 5 cm alors que *N. labradorica* domine entre 1 et 3 cm de profondeur. A la station BC1, *N. labradorica* est abondante en surface puis sa densité diminue jusqu'à 3 cm. *Adercotryma glomerata* et *R. contortus* sont les espèces les plus abondantes à la station 101. Leur densité diminue avec la profondeur. La densité de *N. labradorica* est plus importante entre 1 et 2 cm. A la station 115, *L. arenulata* est l'espèce dominante présente jusqu'à 5 cm de profondeur. *Melonis barleeanus* est essentiellement abondante entre 2 et 3 cm de profondeur entraînant une augmentation de la

Chapitre III

densité de cet échantillon. La station 210 est la plus pauvre avec la station BC3. La densité de surface n'atteint que 46 ind./50 cm³. La majorité des taxons est contenu dans le premier centimètre. A la station 204, le niveau le plus dense n'est pas le niveau de surface mais le niveau compris entre 1 et 2 cm contrairement aux autres stations. Cet effet est dû à la présence de *M. barleeanus*, abondante entre 1 et 3 cm. Les trois espèces majeures de la station 200 sont regroupées dans le premier centimètre et la densité s'élève à 101 ind./50 cm³. *Reophax scorpiurus* est présente jusqu'à 5 cm. La station BC3 présente une faible densité de surface avec 51 ind./50 cm³. Les individus vivants sont très rares sous 3 cm de profondeur. La station BC4 contient la densité de surface la plus importante de la baie de Baffin avec 129 ind./50 cm³. *Melonis barleeanus* est présente depuis la surface jusqu'à 2 cm de profondeur. Un sursaut de densité est visible entre 3,5 et 4,5 cm du fait de la présence de l'espèce *A. glomerata*.

III.5 Discussion

Cette étude couvre une large région géographique s'étendant depuis des environnements relativement profonds de bas de pente à l'est et à l'ouest de la baie de Baffin jusqu'au bassin de Kane, moins profond, dans le détroit de Nares en passant par l'environnement particulier de la polynie NOW. Les caractéristiques environnementales de la baie de Baffin et du détroit de Nares apparaissent relativement contrastées en termes de masses d'eau, de biomasse phytoplanctonique et de flux de matière organique. Plusieurs auteurs ont déjà démontré l'importance de ces paramètres sur la distribution des foraminifères benthiques dans la baie de Baffin et l'Arctique canadien (Phleger, 1952 ; Marlowe et Vilks, 1963 ; Vilks, 1964 ; Vilks, 1969 ; Schröder-Adams, 1990 ; Hunt et Corliss, 1993 ; Lloyd, 2006 ; Schröder-Adams et Van Rooyen, 2011). Les différentes masses d'eau et les quantités de matière organique enregistrées dans la zone d'étude constituent des caractères discriminants auxquels s'ajoutent certaines spécificités comme les teneurs en CO₂ dans les eaux interstitielles et la colonne d'eau, en lien avec l'export et la dégradation de la matière organique produite ou la dynamique de la glace de mer. Ce contexte environnemental particulier permet d'expliquer la répartition des foraminifères benthiques vivants dans la région tant en termes de diversité que de densité ou de composition des assemblages.

III.5.1 Influence des processus de dissolution des carbonates sur les assemblages de foraminifères benthiques

Les foraminifères benthiques agglutinés sont largement présents sur les plateformes des mers arctiques et dans la baie de Baffin (e.g., Scott et Vilks, 1991 ; Wollenburg et Kuhnt, 2000). Plusieurs études ont reporté la dominance de ces espèces dans l'Arctique canadien (Phleger, 1952 ; Marlowe et Vilks, 1963 ; Vilks, 1964 ; Vilks, 1969 ; Schröder-Adams, 1990 ; Hunt et Corliss, 1993 ; Lloyd, 2006 ; Schröder-Adams et Van Rooyen, 2011). Selon ces différentes études, la glace de mer et les propriétés des masses d'eau seraient responsables de la distribution particulière des foraminifères benthiques agglutinés en instaurant un environnement hostile au développement des espèces calcaires par la dissolution des carbonates dans les eaux de fond corrosives. La CCD, peu profonde dans la région étudiée, induit une dissolution des carbonates dans la baie de Baffin à partir de 300 mètres de profondeur d'eau (Aksu, 1983). La dynamique saisonnière de la banquise favorise l'absorption du CO₂ atmosphérique dans les eaux froides de surface mais aussi la productivité primaire et donc le flux de matière organique qui décante sur le substrat océanique. Les eaux froides, denses et bien oxygénées des hautes latitudes circulant au fond oxydent cette matière organique entraînant la hausse de la pression partielle en CO₂ dans les eaux interstitielles du sédiment. La forte teneur en CO₂ à l'interface eau-sédiment provoque la dissolution des carbonates (e.g., de Vernal et al., 1992 ; Steinsund et Hald, 1994). En automne, au moment de la prise en glace de la mer, le CO₂ et le sel sont rejetés dans les eaux environnantes. La formation des saumures (eaux froides, salées et acides) notamment au niveau de la zone de polynie vont plonger pour alimenter les eaux de fond qui deviennent par ce biais corrosives. Pourtant, dans la carotte BC1 située dans la polynie NOW à environ 700 m de profondeur, les foraminifères benthiques agglutinés ne représentent que 26 % de la totalité des individus vivants observés. Une espèce calcaire y est largement dominante, *N. labradorica* (62 %). Cette espèce opportuniste est typique des eaux atlantiques nord et indicatrice d'une forte productivité en surface et donc d'une importante disponibilité en matière organique pour la communauté benthique (Cedhagen, 1991 ; Corliss, 1991 ; Polyak et Mikhailov, 1996). Malgré des eaux corrosives, un certain nombre d'individus calcaires (*N. labradorica* et *M. barleeanus* en particulier) ont été observés au niveau de la polynie NOW et du bassin de Kane (200-700 m) mais aussi dans les eaux plus profondes de la baie de Baffin (jusqu'à 1000 m). Dans la station 204 à l'est de la baie de Baffin, en particulier, les individus *M. barleeanus*, bien que vivants (coloration au rose Bengale intense), présentent d'importantes marques de dissolution (Fig. III.7). Malgré une coloration intense, il est envisageable que ces individus aient calcifiés

pendant une période où les eaux étaient moins corrosives et que la dissolution n'ait eu lieu que tardivement. Étant donné la profondeur de la station 204 (995m), la position de la CCD dans la zone et l'absence d'autres espèces calcaires à cette station, il semblerait toutefois plus probable que la calcification se fasse dans des conditions très corrosives. Une étude récente a effectivement montré que cette espèce serait susceptible d'intégrer des particules sédimentaires lors de la formation du test calcaire afin de renforcer son test et de palier à la dissolution des carbonates (Borrelli et al., 2018). Malgré des conditions à priori très défavorables, certaines espèces calcaires, typiquement des endofaunes intermédiaires évoluant entre 1 et 3 cm de profondeur dans le sédiment, peuvent donc survivre et représenter une part importante de l'assemblage des foraminifères benthiques de l'échantillon considéré (Fig. III.6).

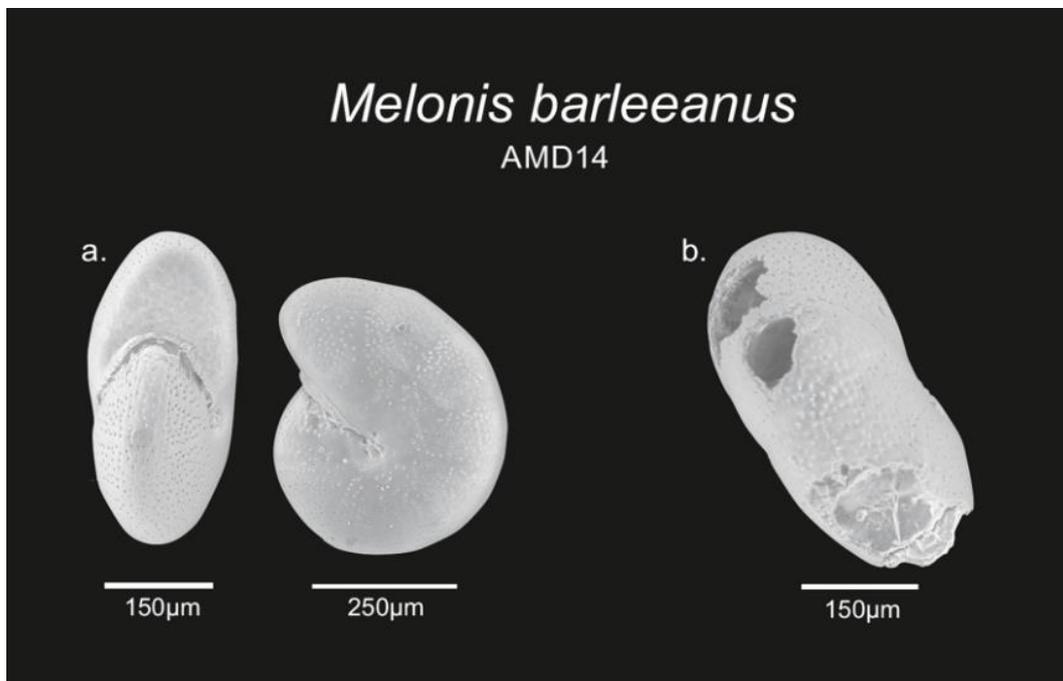


Figure III.7 : Tests de l'espèce *M. barleeanus* prélevés dans les échantillons de la carotte Kane2B (a.) et 204 (b.) illustrant la différence de préservation des tests.

La baie de Baffin et le détroit de Nares présentent une grande diversité d'espèces agglutinées retrouvées également classiquement dans les études sur les foraminifères benthiques de cette région de l'Arctique canadien. Ici, des espèces telles que *R. scorpiurus*, *L. arenulata* ou encore *H. guttifer* sont largement présentes au sein de la baie de Baffin, du nord au sud et de l'est à l'ouest. Cependant, deux espèces semblent se distinguer par une répartition spatiale particulière. *Recurvoïdes contortus* est présente au nord de la baie de Baffin, aux stations 210, 115 et 101. Dans de précédentes études, elle a été relevée dans la baie de Baffin et l'archipel arctique canadien. D'après Schröder-Adams et Van Rooyen (2011), *R. contortus* serait typique des eaux atlantiques de la baie de Baffin. Dans notre étude, cette espèce semble

adaptée aux eaux atlantiques particulièrement froides du nord de la baie de Baffin. *Adercotryma glomerata* est une espèce récurrente dans le détroit de Nares aux stations Kane2B, 101 et BC1 ainsi qu'à l'ouest de la baie de Baffin à la station BC4. Schröder-Adams et Van Rooyen (2011) ont observé cette espèce essentiellement dans leurs stations les plus profondes de la baie de Baffin (< 2000 m de profondeur) où les eaux sont les plus froides. *Adercotryma glomerata* est une espèce commune aux hautes latitudes dans les eaux froides de l'Atlantique Nord et de l'Arctique (e.g., Hunt et Corliss, 1993 ; Schröder-Adams, 1990 ; Hald et Korsun, 1997 ; Lloyd, 2006). Dans notre étude, cette espèce est présente principalement dans le détroit de Nares, et sur la bordure occidentale de la baie de Baffin, soit sur le corridor d'écoulement des eaux froides de l'océan Arctique à l'océan Atlantique.

Conformément à la littérature, une large part des foraminifères benthiques vivants observés dans cette étude sont de type agglutinés. L'association de différents facteurs tels que le couvert de glace saisonnier, le flux de matière organique et les températures froides des masses d'eau induit leur caractère corrosif dans la région. La dissolution des carbonates apparaît comme étant un facteur de contrôle des faunes important mais ne permet pas d'expliquer entièrement la distribution des foraminifères benthiques vivants dans la zone d'étude.

III.5.2 Relation entre la productivité primaire et la distribution des foraminifères benthiques

La distribution des foraminifères benthiques vivants est influencée par divers paramètres biotiques et abiotiques parmi lesquels l'oxygénation des eaux de fond et l'apport de matière organique exercent un contrôle important sur les faunes (e.g. Jorissen et al., 1995 ; Wollenburg et Mackensen, 1998a, 1998b ; Van der Zwaan, 1999). Dans les environnements arctiques, zones de plongements d'eau, l'oxygénation des eaux de fonds est rarement limitante. Ainsi, le flux et la qualité de la matière organique sont des facteurs dominants contrôlant la distribution des foraminifères benthiques.

Les densités de foraminifères benthiques vivants les plus importantes dans cette étude sont relevées dans le bassin de Kane avec 1756 ind./100 cm² et au niveau de la polynie NOW (1487 ind./100 cm²). Les densités plus fortes au niveau de la polynie apparaissent cohérentes avec les observations de forte productivité dans cette zone (Klein et al., 2002, Odate et al., 2002, Tremblay et al., 2002) liée à la conjonction des facteurs physiques comme la disponibilité de lumière, la stratification des eaux et le mélange vertical ainsi que l'advection de nutriments dans

la couche photique. Pourtant, une certaine disparité entre les densités de faunes vivantes relevées dans les trois stations de la polynie NOW est à remarquer. D'une part, entre l'est et l'ouest de la polynie, au niveau des stations 115 et 101 échantillonnées à la même période durant la campagne de juillet 2014, la différence est notable avec une densité plus élevée à l'est (1487 ind./100 cm²) qu'à l'ouest (607 ind./100 cm²). Cette observation transcrit la disparité de la productivité primaire plus précoce et active à l'est (Bergeron et Tremblay, 2014) en raison de conditions physiques particulières (e.g., SST, banquise, stratification). D'autre part, la station BC1, dans la région centrale de la polynie, présente la densité la plus faible relevée dans la région de la polynie NOW (260 ind./100 cm²). Cela est très probablement à mettre en relation avec la période d'échantillonnage. En effet, les sédiments de la station BC1 ont été prélevés en début d'automne à une période où la polynie, largement ouverte sur la baie de Baffin, n'en est plus vraiment une (Tremblay et al., 2002). En automne, la productivité primaire est plus faible qu'en été dû à la stratification des eaux et à la baisse de l'irradiance solaire à la surface de l'eau, limitant ainsi considérablement l'export de nourriture au fond. Concernant la station Kane2B, les conditions environnementales diffèrent puisque le bassin de Kane est situé au-delà du pont de glace marquant la limite nord de la polynie NOW. Pour autant, la densité des foraminifères benthiques vivants est la plus importante de toute l'étude. Alors que la quantité de TOC demeure assez faible pour cette station, le rapport C/N révèle un matériel plutôt labile. La disponibilité en nutriments apportés par les eaux froides de l'Arctique induit une productivité relativement importante dans cette région. De plus, le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ mesuré dans le sédiment de surface de cette carotte révèle un export d'algues de glace de mer alimentant la chaîne alimentaire benthique dans le bassin de Kane. Des images satellites MODIS Terra (Fig. III.8) montrent que la situation dans le bassin de Kane en juillet 2014 est assez atypique comparée à la même période en 2013 et 2015. En effet, la glace de mer se disloque plus précocement pendant l'été 2014 s'apparentant ainsi à des conditions de type polynie. Burgers et al. (2017) ont également observé un bloom phytoplanctonique de sub-surface dans le bassin de Kane pendant l'été 2014 au niveau d'un seuil topographique entraînant un upwelling localisé et donc un apport de nutriments qui alimenterait le bloom. Dans la baie de Baffin, les densités de foraminifères observées dans les sédiments de surface ne présentent pas de variations remarquables entre l'est et l'ouest, malgré les caractéristiques environnementales contrastées en termes de masses d'eau, couvert de banquise ou encore biomasse phytoplanctonique. Cependant, les densités des foraminifères benthiques vivants sont sensiblement plus faibles que dans le détroit de Nares. Les mesures de $\delta^{15}\text{N}$ dans le sédiment indiquent une disponibilité plus faible en nutriments dans les eaux de l'Atlantique Nord alimentant la baie de Baffin. La

productivité primaire est moins intense qu'au niveau de la polynie NOW et cela se reflète dans les densités enregistrées dans cette étude.

Les interprétations des différentes densités de foraminifères benthiques restent tout de même à confirmer par l'estimation de l'effet du patchiness qui n'a pas été établi par l'étude de carottes répliques.

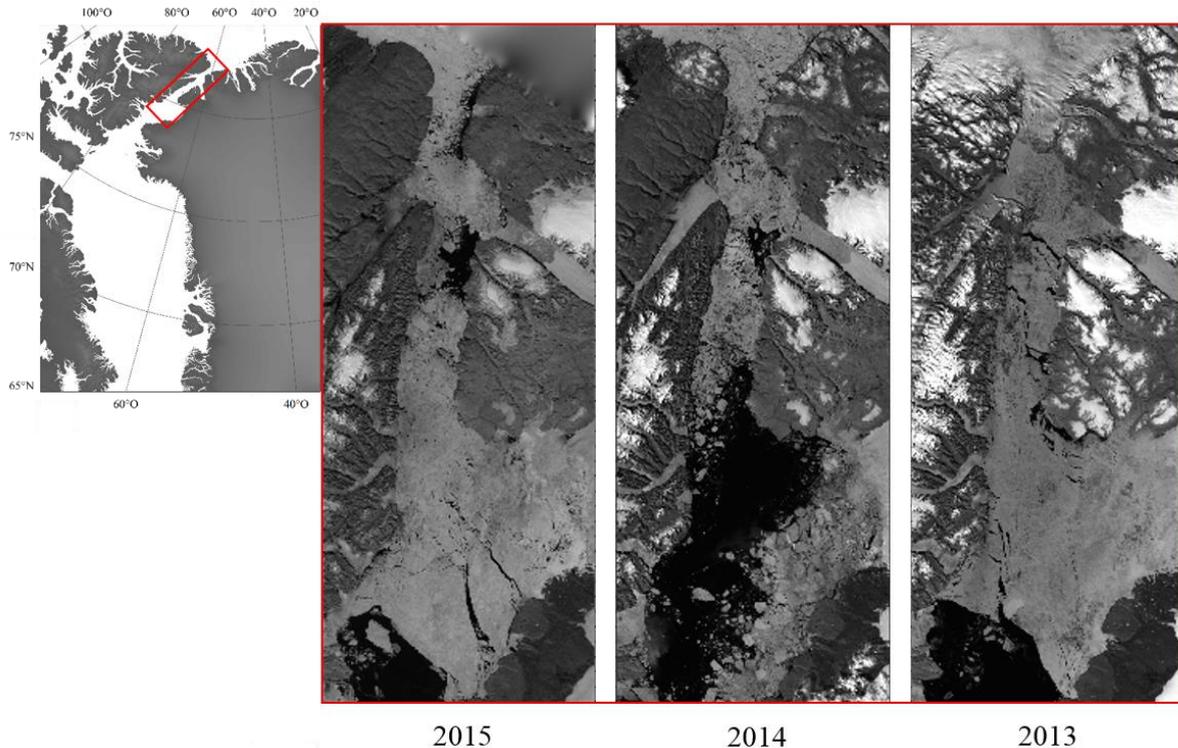


Figure III.8 : Illustration du couvert de banquise dans le détroit de Narès en juillet 2015 (gauche), 2014 (centre) et 2013 (droite) issue des images satellites MODIS Terra.

Les densités de foraminifères benthiques vivants observées dans la zone d'étude semblent être en adéquation avec les concentrations en Chl a mesurées localement au droit des stations échantillonnées en Juillet 2014 et Octobre 2015. Le flux de matière organique serait donc un paramètre déterminant pour la prolifération des espèces de foraminifères benthiques dans la région de la baie de Baffin et du détroit de Nares.

Outre les densités de faunes, les assemblages de foraminifères benthiques montrent de grandes disparités géographiques. Deux assemblages principaux caractérisent les populations dans cette étude. Un premier assemblage est dominé par les espèces *N. labradorica* et *A. glomerata*. Un second assemblage est essentiellement constitué d'un assortiment d'espèces agglutinées associées dans certain cas à l'espèce calcaire *M. barleeanus*. Dans le bassin de Kane, l'espèce majeure *A. glomerata* témoigne de la présence importante des eaux froides

arctiques tandis que les espèces *N. labradorica* et *M. barleeanus* soulignent l'export et la disponibilité de la matière organique dans l'environnement benthique (e.g., Wollenburg et Mackensen, 1998a, 1998b ; Rytter et al., 2002 ; Jennings et al., 2004). Les espèces de foraminifères benthiques vivants observées dans les carottes de la polynie NOW se démarquent par deux assemblages différents entre l'est et l'ouest de la polynie, à l'entrée du détroit de Nares. En effet, les stations BC1 et 101 à l'est sont caractérisées par l'abondance commune des espèces *A. glomerata* et *N. labradorica* alors que la station 115 à l'ouest présente une diversité d'espèces plus importante et majoritairement agglutinées. *Adercotryma glomerata* souligne l'écoulement des eaux froides vers le sud le long de l'île d'Ellesmere dans le détroit de Nares. La polynie NOW est considérée comme étant la région la plus productive de l'Arctique malgré une baisse drastique de la production et de la biomasse phytoplanctonique révélée par plusieurs études récentes (Bélangier et al., 2013 ; Bergeron et Tremblay, 2014 ; Marchese et al., 2017 ; Blais et al., 2017). Le bloom de printemps démarre fin avril-début mai à l'est de la polynie, le long des côtes groenlandaises du fait du retrait précoce de la banquise induit par l'influx d'eau d'origine atlantique relativement chaude apportée par le courant ouest groenlandais (Marchese et al., 2017). L'assemblage de foraminifères benthiques vivants à la station 115 est constitué en majorité d'espèces agglutinées retrouvées également dans les carottes de la baie de Baffin, soulignant l'influence de cette masse d'eau atlantique corrosive. La présence de l'espèce *M. barleeanus*, endofaune intermédiaire, traduit le caractère relativement dégradée de la matière organique disponible en été dans cette zone (Corliss, 1985, 1991 ; Wollenburg et Mackensen, 1998b ; Jennings et al., 2004). Le bloom survient plus tardivement à l'ouest de la polynie, vers le début du mois de Juin (Marchese et al., 2017). Aux stations BC1 et 101 échantillonnées en octobre et en juillet respectivement, *N. labradorica* est abondante. Cette espèce est fortement associée à la production épisodique de phytodétritus frais dans les zones de haute productivité saisonnière (Hald et Steinsund, 1992 ; Rytter et al., 2002 ; Polyak et al., 2002) traduisant l'existence d'un bloom de printemps puis d'un bloom d'automne moins intense.

La particularité des assemblages de la baie de Baffin, au sud de la polynie NOW, est la dominance des espèces agglutinées. La seule espèce calcaire vivante observée dans les carottes de cette région est *M. barleeanus*, espèce indicatrice d'une matière organique relativement altérée dans les sédiments de la baie de Baffin. Entre l'est et l'ouest de la baie de Baffin, les faunes ne montrent pas de différences flagrantes en termes d'espèces ou d'abondance. Cela s'explique par le fait qu'aux profondeurs d'échantillonnage des carottes dans la baie de Baffin, la masse d'eau atlantique est dominante. Toutefois, la présence de l'espèce indicatrice d'eau

froide *A. glomerata* à la station BC4 est tout de même notable et traduirait l'influence des eaux arctiques transportées par le courant de Baffin. Les conditions environnementales dans la baie de Baffin sont relativement stables en été et en automne. Un échantillonnage plus tôt dans la saison aurait peut-être permis de tracer le retrait de la glace de mer, amorcé à l'est et plus tardif à l'ouest de la baie.

La densité et la diversité des faunes ainsi que les assemblages semblent bien refléter la relation entre l'environnement pélagique et l'environnement benthique dans le lien entre la productivité primaire, le flux de matière organique et la fraîcheur de cette matière organique disponible au fond. Les foraminifères benthiques répondent aux apports de nourriture par l'abondance de certaines espèces caractéristiques. De plus, les assemblages apparaissent étroitement liés aux caractéristiques des différentes masses d'eau dominantes dans la baie de Baffin ou le détroit de Nares.

III.6 Conclusion

Cette étude apporte des informations importantes sur l'écologie des faunes de foraminifères benthiques de la baie de Baffin et du détroit de Nares. Les assemblages de foraminifères benthiques vivants sont liés aux environnements particuliers composants la zone étudiée. La nature des masses d'eau et notamment leur caractère corrosif ainsi que la productivité primaire et le flux de matière organique associé sont des paramètres essentiels influençant la distribution des foraminifères benthiques. La dissolution des carbonates est un facteur d'influence majeur sur les faunes de foraminifères benthiques dans la baie de Baffin et explique la dominance des formes agglutinées sur les formes carbonatées dans cette région. La densité des faunes vivantes est étroitement liée au flux de matière organique produite en surface. Ce phénomène s'illustre très nettement au regard des différences notables entre les densités relevées dans la baie de Baffin et celles observées dans la polynie NOW. De plus, des espèces particulières sont indicatrices de la quantité et de la qualité de nourriture disponible dans l'environnement benthique. Notamment, l'espèce *N. labradorica* répond rapidement et massivement à ces apports épisodiques de nourriture tandis que *M. barleeanus* s'adapte dans les milieux où la matière organique est plus dégradée.

Mieux conditionner le fonctionnement écologique des foraminifères benthiques évoluant dans des environnements complexes soumis à un couvert de glace saisonnier s'avère indispensable pour une utilisation optimale de ces faunes en tant que proxies paléoenvironnementaux dans les régions arctiques.

**Chapitre IV : Distribution des foraminifères
benthiques vivants sur la marge continentale ouest
de la mer de Barents et évolution depuis le
XIXème siècle**

IV.1 Introduction

Les foraminifères benthiques, de par leur abondance et leur diversité dans les milieux marins, leur grande capacité de fossilisation et leur réponse rapide aux changements environnementaux sont communément utilisés comme proxies paléocéanographiques (e.g., Polyak et Mikhailov, 1996 ; Seidenkrantz et al., 2007 ; Jennings et al., 2011 ; Polyak et al., 2013 ; Lazar et Polyak, 2016 ; Rasmussen et Thomsen, 2017). Toute tentative de reconstruction environnementale dans l'océan Arctique par le biais de l'étude des assemblages de foraminifères benthiques fossiles requiert une bonne connaissance de leur adaptation aux changements biologiques, chimiques et physiques de leur milieu de vie. Plusieurs études ont montré l'influence de divers facteurs (les propriétés des masses d'eau, l'oxygénation du sédiment, la quantité et le degré de minéralisation de la matière organique dans les premiers centimètres du sédiment) sur les faunes vivantes de foraminifères benthiques (e.g., Jorissen et al., 1995 ; Wollenburg et Mackensen, 1998a, 1998b ; Van der Zwaan, 1999). Malgré un intérêt particulier des scientifiques pour l'étude des environnements et paléoenvironnements du domaine arctique où les changements climatiques globaux sont particulièrement amplifiés, l'écologie des foraminifères benthiques modernes aux très hautes latitudes boréales demeure encore mal connue. La mer de Barents, proche de la Norvège, a fait l'objet de nombreux travaux en océanographie, biologie et géologie marines depuis plusieurs décennies. Cette région polaire est particulièrement sensible au réchauffement climatique actuel qui s'y manifeste essentiellement sous la forme d'un recul de la banquise (Parkinson et al., 1999), de l'augmentation de l'absorption des radiations solaires (Stroeve et al., 2012), de l'augmentation des températures atmosphériques et océaniques (Smedsrud et al., 2010), et d'une atlantification accentuée de la région (Årthun et al., 2012 ; Barton et al., 2018). Ces différents aspects impactent l'écosystème océanique. La mer de Barents constitue également une des régions principales d'échange de masses d'eau entre l'océan Atlantique et l'océan Arctique. Cette interaction entre les masses d'eau atlantique et arctique couplée à la fonte saisonnière de la glace de mer, aux vents puissants entraînant le mélange efficace de la colonne d'eau et à l'influence des eaux côtières norvégiennes riches en nutriments, est responsable de forts taux de production primaire (Signorini et McClain, 2009) qui alimentent l'écosystème benthique.

L'écologie des foraminifères benthiques en mer de Barents a été décrite dans plusieurs études sur la base de faunes vivantes (rose Bengale) distribuées sur le plateau continental (Hald et Steinsund, 1992 ; Steinsund et Hald, 1994 ; Ivanova et al., 2008 ; Wollenburg et Mackensen, 2009 ; Saher et al., 2009, 2012 ; Dijkstra et al., 2015, 2017). Ces informations ont contribué aux

Chapitre IV

reconstructions paléocéanographiques de la région à différentes échelles de temps (Polyak et Mikhailov, 1996 ; Kiyko et Pogrebov, 1997 ; Dijkstra et al., 2015, 2017). Ces études préalables se sont focalisées essentiellement sur l'environnement du plateau continental. Notre étude vise à décrire l'écologie des foraminifères benthiques vivants durant l'été 2014 sur la marge continentale ouest de la mer de Barents située entre le nord de la Norvège et le sud du Svalbard, couloir majoritaire de transport de la masse d'eau atlantique vers le détroit de Fram. Les stations d'échantillonnage sont distribuées sur une large gamme bathymétrique et latitudinale, et ce afin de s'approcher d'une vision intégrée de la distribution des foraminifères benthiques vivants dans la région. De plus, l'examen dans ces mêmes échantillons des assemblages de faunes fossiles autorise une première estimation des variations des conditions paléoenvironnementales (couvert de banquise, productivité primaire, influence de la masse d'eau atlantique) au cours des deux derniers siècles, période comprenant la transition du Petit Age Glaciaire (PAG) à l'époque moderne.

IV.2 Zone d'étude

IV.2.1 Situation géographique et topographie

La mer de Barents est située entre les côtes nord de la Norvège et le Svalbard (70°N - 80°N). Cette mer épicontinentale est bordée à l'est par la mer de Kara et à l'ouest par la mer de Norvège. A ces hautes latitudes, la quantité de lumière reçue varie saisonnièrement, passant de l'obscurité totale en hiver au jour continu l'été. Formée de bassins profonds (environ 300-400 m) et de bancs de sable (Hunt et al., 2013), elle couvre 1,5 millions de km² et sa profondeur moyenne est d'environ 230 m (Loeng et Drinkwater, 2007).

Au niveau de la pente continentale, en bordure ouest de la mer de Barents, plusieurs structures sédimentaires caractéristiques sont identifiables sous la forme de hauts-fonds séparés par de profondes dépressions glaciaires. Ces dépressions formaient les conduits principaux des écoulements glaciaires drainant les anciennes calottes du Svalbard et de la mer de Barents (Rebesco et al., 2014 ; Pedrosa et al., 2011). Les embouchures de ces voies glaciaires sont caractérisées par des lobes sédimentaires ou Trough Mouth Fans (TMFs), zones de dépôt majeures des sédiments transitant depuis la plateforme continentale. Ces dépôts sédimentaires seraient engendrés par des coulées de débris glaciogéniques (Laberg et Vorren, 1995 ; Vorren et Laberg, 1997) mais également par des contourites (Van Weering et al., 2008) ou des panaches d'eau de fonte subglaciaire (Taylor et al., 2002).

IV.2.2 Contexte hydrologique

La mer de Norvège et la mer de Barents sont des zones de transitions des eaux atlantiques chaudes et salées vers l’océan Arctique et des eaux froides et moins salées de l’Arctique vers l’Atlantique Nord (Loeng et Drinkwater, 2007). L’interaction entre ces deux masses d’eau forme de puissants fronts hydrologiques. Le front polaire sépare les eaux arctiques des eaux atlantiques (Fig. IV.1). La circulation océanique et les masses d’eau transportées dans la mer de Barents sont fortement contraintes par la bathymétrie, de même que la position du front polaire (Parsons et al., 1996).

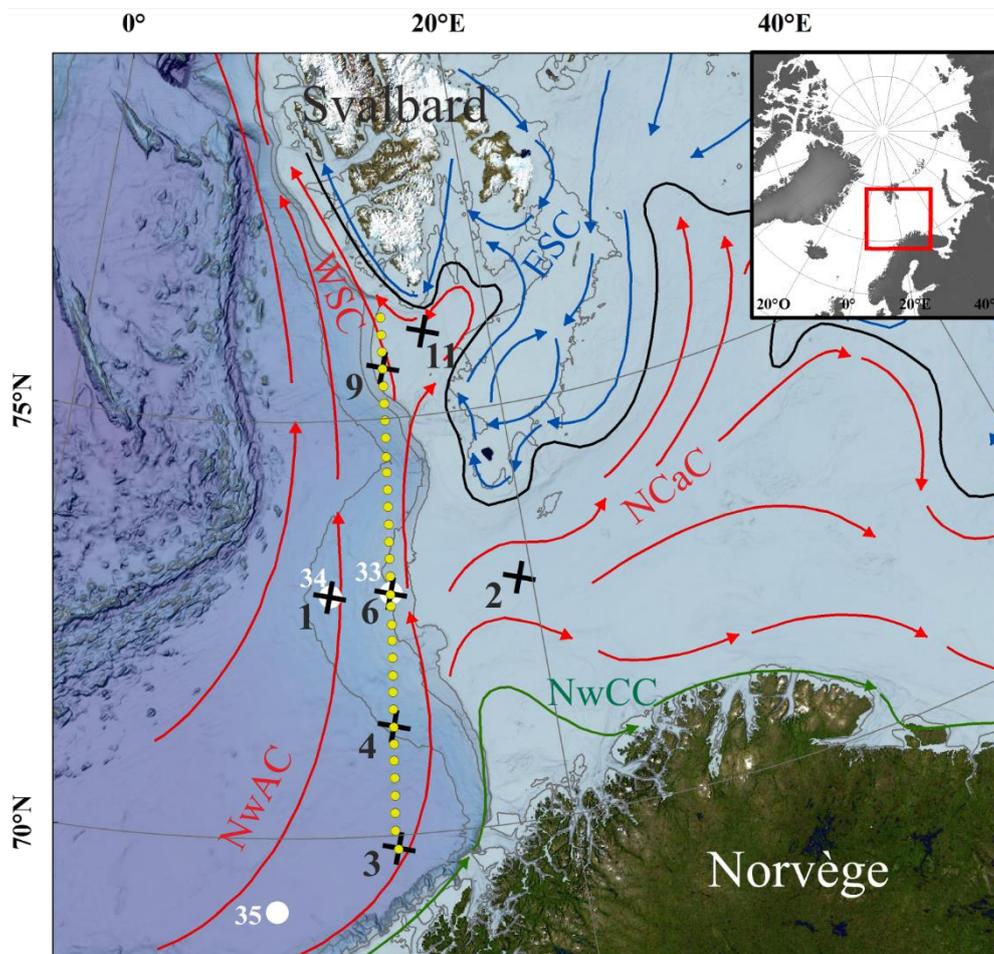


Figure IV.1 : Carte illustrant la bathymétrie, les principales structures topographiques de la zone d’étude, la circulation océanique de surface modifiée d’après Loeng et Drinkwater, 2007 et Lind et Ingvaldsen, 2011 (NwAC : Norwegian Atlantic Current ; NCaC : North Cape Current ; WSC : West Spitzbergen Current ; NwCC : Norwegian Coastal Current ; ESC : East Spitzbergen Current), la position du front polaire et la localisation des sept carottes étudiées (croix noires). Les points jaunes indiquent la position des stations de mesures CTD dans la colonne d’eau jusqu’à 600 m de profondeur sur un transect sur-nord tandis que les points blancs montrent la position des stations de mesures CTD effectuées jusqu’au fond de la colonne d’eau. La bathymétrie est issue de l’International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO – www.gebco.net).

La mer de Barents comprend différentes masses d'eau aux caractéristiques physiques bien définies (Loeng, 1991). Chaude ($T > 2^{\circ}\text{C}$) et salée ($S > 35$), la masse d'eau atlantique s'écoule le long de la pente continentale norvégienne par le Norwegian Atlantic Current (NwAC) puis se sépare en deux branches à l'extrême nord de la Norvège (Fig IV.1). Une petite partie des eaux atlantiques entre dans la mer de Barents, par le North Cape Current (NCaC) en longeant la côte nord-européenne ou en s'engouffrant dans les creux topographiques de Bjørnøyrenna et Storfjorden (Fig. IV.1). La majorité de la masse d'eau atlantique longe la pente continentale le long de la mer de Barents, puis l'archipel du Svalbard, à travers le West Spitsbergen Current (WSC). Le WSC est considéré comme étant le vecteur principal du transport de sel et de chaleur dans l'océan Arctique à travers le détroit de Fram. Le Norwegian Coastal Current (NwCC), véhicule une masse d'eau relativement chaude ($T > 3^{\circ}\text{C}$) au sud de la mer de Barents. Un front de salinité sépare ces eaux côtières des eaux atlantiques. La masse d'eau côtière, de par sa faible salinité ($S < 34,7$), porte la signature des eaux de la mer Baltique et de la mer du Nord. Cette caractéristique est accentuée par le déversement d'eau douce des rivières à la côte (Saetre, 2007). Au nord, les eaux polaires arctiques sont caractérisées par une faible température et une faible salinité ($T < 0^{\circ}\text{C}$; $34,3 < S < 34,7$). Le contraste avec les eaux atlantiques plus chaudes et plus salées induit la formation d'une masse d'eau caractérisée par une température inférieure à 0°C et une salinité comprise entre 34,4 et 35. Durant l'automne et l'hiver, des eaux de fond sont générées à partir de cette masse d'eau de mélange. Leur formation est initiée par la production de banquise et le refroidissement de la couche supérieure de la colonne d'eau. La convection se déclenche alors au-dessus des hauts-fonds et dans les polynies (Midttun, 1985) ; ces eaux de fond, caractérisées par des températures très basses ($T < 1,7^{\circ}\text{C}$) et des salinités relativement élevées ($S > 35$), s'écoulent alors dans les dépressions locales et vers l'est de la mer de Barents.

Du fait de ces différentes masses d'eau bien définies et de la topographie, des phénomènes d'ondes de marée interne sont rapportés dans la zone (Morozov et al., 2003 ; Kagan et Sofina, 2014).

IV.2.3 Dynamique de la cryosphère

La présence des eaux froides polaires permet la prise en glace d'une partie de la mer de Barents. Cette glace de mer, fortement influencée par la circulation des masses d'eau, connaît également une forte variabilité saisonnière. Le couvert de glace est minimal en août-septembre, lorsque le front de glace recule à l'extrême nord de la marge continentale. Fin octobre, la glace

Chapitre IV

recommence à se former puis progresse régulièrement depuis le nord vers le sud, de novembre à janvier. Le maximum de glace s'établit en mars-avril et couvre environ 60% de la mer de Barents, laissant le sud et l'ouest libre de glace, du fait de l'apport d'eau chaude atlantique (Loeng et Drinkwater, 2007). Durant les années particulièrement froides, 80% de la mer de Barents est englacée en hiver et 15 à 30% en été (Loeng et Drinkwater, 2007).

IV.2.4 Production primaire

La production phytoplanctonique annuelle dans la mer de Barents varie entre 20 et 200 g.C.m⁻² avec les plus fortes concentrations au niveau de la masse d'eau atlantique (Loeng et al., 2005). En général, la production dans les eaux polaires se restreint aux blooms de printemps, liés au retrait de la banquise, alors qu'une grande partie de la production primaire dans les eaux atlantiques survient plus tardivement, en été et en automne.

Le couvert de glace et les eaux de fonte, la disponibilité en nutriments dans la colonne d'eau et la luminosité sont autant de paramètres physiques fluctuant selon les saisons, qui influencent la production primaire (Reigstad, 2008). Plusieurs phases de blooms phytoplanctoniques se succèdent dans la masse d'eau atlantique, principalement dominées par des espèces de diatomées (Loeng et Drinkwater, 2007) et de coccolithophoridés (Giraudeau et al., 2016). Au printemps, la colonne d'eau se stratifie sur une large partie de la mer de Barents, entraînant des pics d'activités phytoplanctoniques. Au sud, la stratification est amorcée par les faibles salinités des eaux côtières. Au nord, les eaux de fonte de la banquise provoquent la stratification de la colonne d'eau. En juin-juillet, la production phytoplanctonique suit le retrait de la glace de mer, jusqu'à la fin de l'été. En août-septembre, la majorité des nutriments de la colonne d'eau a été consommée et se retrouve contenue dans la biomasse phytoplanctonique. En hiver, la production est ralentie et la distribution des nutriments au sein de la colonne d'eau devient plus homogène.

IV.3 Matériels et méthodes

La mission océanographique MOCOSSED 2014 qui s'est déroulée en août 2014 entre le nord de la Norvège et le sud de l'archipel du Svalbard à bord du navire de recherche le NO « Pourquoi pas ? » a permis l'acquisition de diverses données océanographiques. La position des stations de carottage suit la bordure ouest de la mer de Barents, le long de la marge continentale (Tableau IV.1 ; Fig. IV.1). Des mesures dans la colonne d'eau et des carottes courtes préservant l'intégrité du sédiment de surface (carottier multitube) ont été réalisées lors de cette mission

Chapitre IV

(Fig. IV.1). Les carottes d'interface ont été prélevées à l'aide d'un carottier multitube de type Oktopus GmbH équipé de 8 tubes de 10 centimètres de diamètre. Pour chaque station, un tube a été consacré aux foraminifères benthiques et aux profils d'oxygène et un autre tube a été utilisé pour les différentes analyses sédimentaires et géochimiques. Ces carottes ont été découpées à bord tous les 0,5 cm pour les 2 premiers centimètres puis tous les centimètres jusqu'à 5 cm de façon à obtenir une meilleure résolution dans la zone où les foraminifères benthiques sont classiquement majoritairement concentrés. Une dernière tranche entre 5 et 10 cm a également été échantillonnée.

Tableau IV.1 : Localisation des sites de carottages de l'étude.

Stations	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 6	St. 9	St. 11
Longitude	11,72	19,47	13,85	13,97	14,21	14,63	16,74
Latitude	72,88	72,90	69,83	71,29	72,88	75,60	76,00
Profondeur (m)	1823	423	2649	1909	972	394	326

IV.3.1 Mesures des paramètres hydrologiques

Des mesures physiques et biologiques ont été effectuées dans la colonne d'eau à intervalle régulier le long du transect sud-nord (Fig. IV.1) à l'aide d'une sonde Conductivity Temperature Depth (CTD : température, salinité (conductivité) et profondeur (pression)) couplée à un fluorimètre (concentration en chlorophylle *a* (Chl *a*)). Ces différents capteurs ont été mis en œuvre sur les premiers 600 mètres de la colonne d'eau. Trois stations ont été sondées jusqu'au fond afin d'obtenir les profils verticaux complets de la température et la salinité dans la colonne d'eau.

IV.3.2 Analyses sédimentaires

Des prélèvements ont été effectués tous les centimètres jusqu'à 5 cm pour mesurer la taille des grains des sédiments de surface de chaque carotte étudiée. Ces mesures ont été réalisées au laboratoire EPOC à l'aide d'un granulomètre de type Malvern Mastersizer 2000 hydro G, qui estime la taille des grains par diffraction laser. L'analyse Malvern est généralement reconnue fiable pour des particules sphériques, mais elle a tendance à surestimer la taille des argiles. Pour pallier à cela, la limite silt-argile est prise à 10 μm et non à 4 μm qui correspond à la limite théorique. La limite silt-sable est quant à elle fixée à 63 μm .

IV.3.3 Analyses géochimiques et modèle d'âge

Les profils d'oxygène dans les premiers centimètres de sédiment ont été mesurés pour chaque station directement après le carottage à partir de microelectrodes Clark de 100 µm de diamètre dans un caisson à température contrôlée identique à celle mesurée au fond. Les microelectrodes étaient connectées via un convertisseur A/D à un pico ampèremètre (PA2000, Unisense).

Différents paramètres géochimiques ont été mesurés au laboratoire EPOC sur les 5 premiers centimètres de chaque carotte étudiée à partir d'échantillons lyophilisés. Les teneurs en carbone organique total (TOC) du sédiment ont été mesurées en utilisant un analyseur du type LECO CS 125 (Cauwet et al., 1990). Les teneurs en azote total (TN) ainsi que les rapports isotopiques du carbone organique ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) et de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) ont été obtenus par spectrométrie de masse en utilisant l'IRMS Isoprime couplé à un analyseur élémentaire Flash 2000. Le TOC et le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ont été analysés après décarbonatation du sédiment avec de l'HCl (1N). Le TOC et le TN sont exprimés en pourcentage (%) et les rapports isotopiques en pour mille (‰). Les erreurs analytiques sont environ de $\pm 0,1$ % pour les valeurs de TOC et TN et $\pm 0,1$ ‰ pour les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ et $\delta^{15}\text{N}$. Le rapport C/N a été calculé en divisant le TOC par le TN.

Les analyses continues et semi-quantitatives de certains éléments chimiques sélectionnés ont été réalisées en utilisant un XRF-AVAATECH Core Scanner. Les mesures ont été effectuées sur les 10 premiers centimètres de sédiment pour les stations 1, 2 et 6 avec un pas de 2 millimètres. Les éléments discutés dans notre étude sont le calcium (Ca), le silicium (Si), le potassium (K), le fer (Fe) et le titane (Ti), mesurés pour une tension d'émission de 10 kV et un temps d'acquisition de 10 secondes, de ainsi que le brome (Br) (tension de 30 kV, 15 secondes de temps d'acquisition). Afin de s'affranchir des artéfacts éventuels induits par la forte teneur en eau des sédiments d'interface, chaque élément a été normalisé en suivant la méthode décrite par Bahr et al. (2014), c'est-à-dire en divisant l'élément considéré par la somme de tous les éléments traités dans la même gamme d'énergie.

L'activité du plomb a été mesurée au laboratoire EPOC par la méthode de spectrométrie gamma sur les 5 premiers centimètres des carottes des stations 1, 2 et 6. Le ^{210}Pb présent dans le sédiment récent provient de deux sources différentes : le ^{210}Pb issu de la désintégration du ^{226}Ra dans le sédiment est indépendant du temps ; le ^{210}Pb peut également être issu de la désintégration radioactive du ^{222}Rn atmosphérique. Ce radionucléide qui se retrouve dans la colonne d'eau (poussières atmosphériques, précipitations) est rapidement adsorbé sur la matière

Chapitre IV

en suspension et incorporé au sédiment marin. Le ^{210}Pb issu de la désintégration du ^{222}Rn est alors dit en excès ($^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$) et se désintègre avec une période de demi-vie de $22,3 \pm 0,12$ ans et permet donc d'établir une datation du sédiment. Le $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ a été calculé en soustrayant les valeurs de ^{210}Pb total à celles du ^{226}Ra . Trois points de mesure par carotte ont été effectués et permettent de déterminer le taux de sédimentation en cm.an^{-1} et le taux d'accumulation (Mass Accumulation Rate - MAR) en $\text{g.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$. En connaissant le poids du sédiment et l'épaisseur de la couche, la masse cumulée peut être calculée. Grâce au MAR et à la masse cumulée, l'âge de chaque couche a pu être calculé (Tableau IV.2 ; Fig. IV.2). L'erreur sur la datation reste élevée, autour de 20% c'est-à-dire une incertitude de plus ou moins 1 an pour un âge de 5 ans.

Tableau IV.2 : Cadre chronologique (années calendaires AD) et taux de sédimentation (TS en mm/an) des 3 carottes/stations ayant fait l'objet d'une datation au ^{210}Pb . Les âges entre parenthèses sont estimés à partir des taux de sédimentation calculés pour le sommet des carottes.

Profondeur (cm)	carotte	St. 1		St. 2		St. 6	
		Date (AD)	TS (mm/an)	Date (AD)	TS (mm/an)	Date (AD)	TS (mm/an)
0		2014		2014		2014	
0,25		2009	0,095	2008	0,079	2005	0,054
0,75		2004	0,089	2001	0,074	1996	0,053
1,25		1998	0,083	1995	0,072	1988	0,062
1,75		1991	0,080	1987	0,070	1979	0,056
2,5		1978	0,076	1972	0,066	1959	0,050
3,5		1963	0,066	1956	0,059	1937	0,046
4,5		1946	0,060	1936	0,050	1916	0,047
5,5		(1930)	(0,063)	(1917)	(0,055)	(1894)	(0,047)
6,5		(1914)	(0,063)	(1898)	(0,055)	(1873)	(0,047)
7,5		(1898)	(0,063)	(1880)	(0,055)	(1852)	(0,047)
8,5		(1882)	(0,063)	(1862)	(0,055)	(1830)	(0,047)
9,5		(1867)	(0,063)	(1844)	(0,055)	(1809)	(0,047)

Les tendances des profils de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ présentent une décroissance progressive avec la profondeur (Fig. IV.2). Cette observation indiquerait un dépôt régulier sans perturbation importante des sédiments de surface ce qui conforte les modèles d'âge estimés.

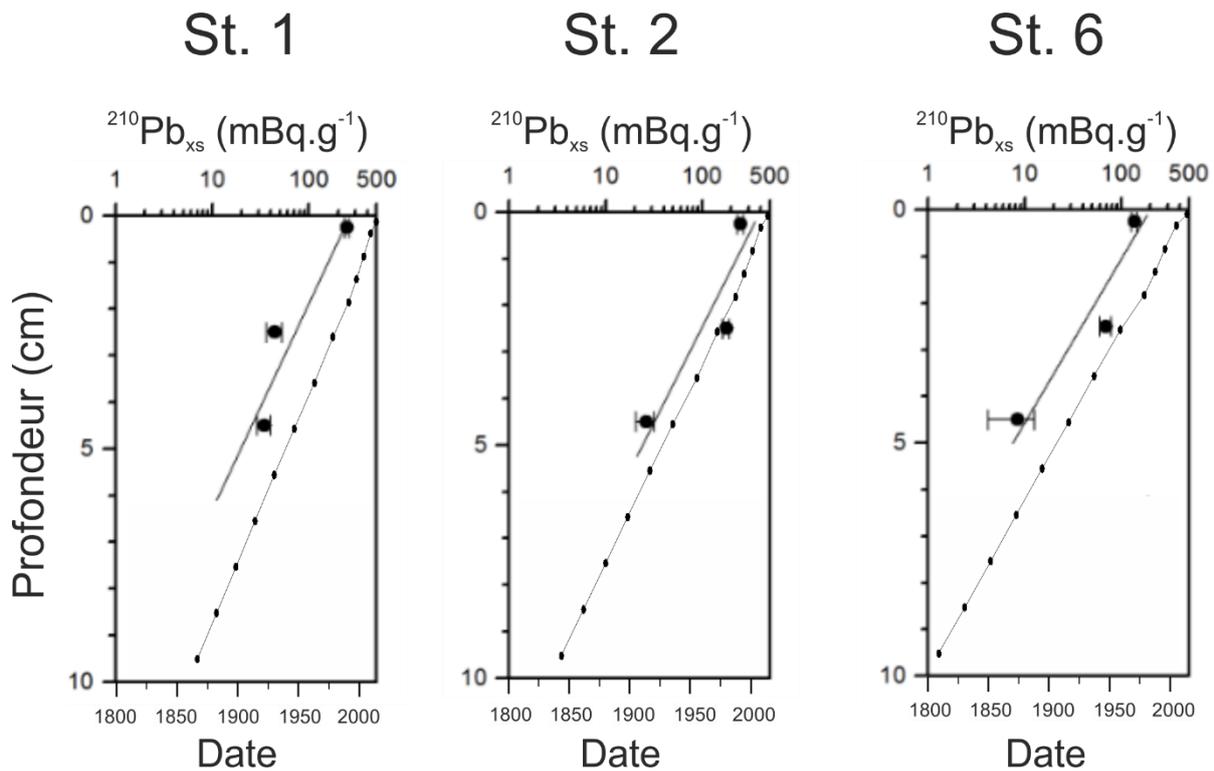


Figure IV.2 : Valeurs du $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ et sa courbe de tendance ainsi que le modèle d'âge calculé pour chaque carotte.

IV.3.4 Données faunistiques

Les échantillons dédiés à l'analyse des foraminifères benthiques ont été mélangés à une solution d'éthanol (96%) et de rose Bengale (1.5 g.L⁻¹) directement après le prélèvement et la découpe des carottes à bord afin de marquer les organismes vivants et de conserver cette coloration jusqu'au moment de l'analyse (Walton, 1952 ; Murray et Bowser, 2000). Au laboratoire EPOC, les échantillons ont été lavés et tamisés à travers deux tamis de 63 μm et 125 μm . Les foraminifères benthiques contenus dans la fraction > 125 μm sont au cœur de cette étude. Pour chaque station étudiée, la totalité des foraminifères benthiques colorés au rose Bengale dans cette fraction a donc été prélevée à l'aide d'un pinceau, dans un milieu liquide (éthanol et eau milli-Q[®]) sous une loupe binoculaire, depuis l'échantillon de surface jusqu'à 5 cm. La coloration rose des faunes vivantes est généralement bien visible par transparence à travers le test des organismes. Cependant, cette coloration peut présenter des différences selon les espèces, variant du rose léger au rouge foncé voir brun-violet (Schönfeld et al., 2012). De plus, la méthode de marquage de l'endoplasme des organismes vivants au rose Bengale présente quelques biais à savoir par exemple que les tissus peuvent être préservés dans les environnements profonds et anoxiques et la coloration aura donc tendance à marquer des individus morts en réalité (Bernhard et al., 2006). Néanmoins, la méthode du rose Bengale

montre des résultats fiables et reste la méthode la plus appropriée pour l'étude des foraminifères benthiques vivants (Murray and Bowser, 2000). Un critère strict a été appliqué afin de ne collecter que les individus vivants au moment du prélèvement des carottes : toutes les loges doivent être colorées exceptée la dernière (Fontanier et al., 2002 ; Phipps et al., 2012). Les foraminifères benthiques morts ont été piqués, après séchage du sédiment, dans les échantillons des carottes des stations 1, 2 et 6 pour tous les niveaux jusqu'à 10 cm de profondeur. Le protocole FOBIMO (Schönfeld et al., 2012) recommande de comptabiliser au moins 300 spécimens pour garantir une représentation réaliste des faunes. Cependant, un minimum de 100 spécimens suffirait à mettre en évidence les tendances des assemblages des faunes de foraminifères benthiques (Fatela et Taborda, 2002). Les échantillons ont été divisés en parts égales à l'aide d'un Otto microsampler de manière à obtenir un minimum de 300 spécimens. Les foraminifères benthiques ont été identifiés d'après la classification de Loeblich et Tappan (1988) et la nomenclature a été vérifiée sur la base de données WoRMS. Les espèces sont considérées comme majeures lorsqu'elles représentent au moins 5% de l'assemblage total de foraminifères benthiques comptés dans la carotte.

Le volume du sédiment réel de chaque échantillon a été mesuré suivant la méthode décrite par le protocole FOBIMO (Schönfeld et al., 2012). La densité des faunes vivantes pour chaque niveau a été standardisée pour un volume de sédiment de 50 cm³. La densité totale des faunes vivantes dans chaque carotte est présentée comme étant le nombre total d'individus vivants standardisé pour une surface de sédiment de 100 cm². Le logiciel PAST (Hammer et al., 2001) a permis de calculer trois indices de biodiversité à partir des comptages des faunes vivantes : la richesse spécifique S (nombre d'espèces vivantes présentes dans la carotte), l'indice de Shannon H' (Shannon et Weaver, 1949) et l'indice d'Evenness E (Buzas et Gibson, 1969).

IV.4 Résultats

IV.4.1 Caractéristiques hydrologiques, sédimentologiques et géochimiques

Le contexte hydrologique de la zone d'étude a été décrit dans l'étude de Giraudeau et al. (2016). Trois masses d'eau caractérisées par leurs température et salinité sont distribuées selon les courants influençant l'ouest de la mer de Barents et l'est de la mer de Norvège. Les profils sud-nord de température, salinité et concentration en Chl *a* sont présentés en Figure IV.3.

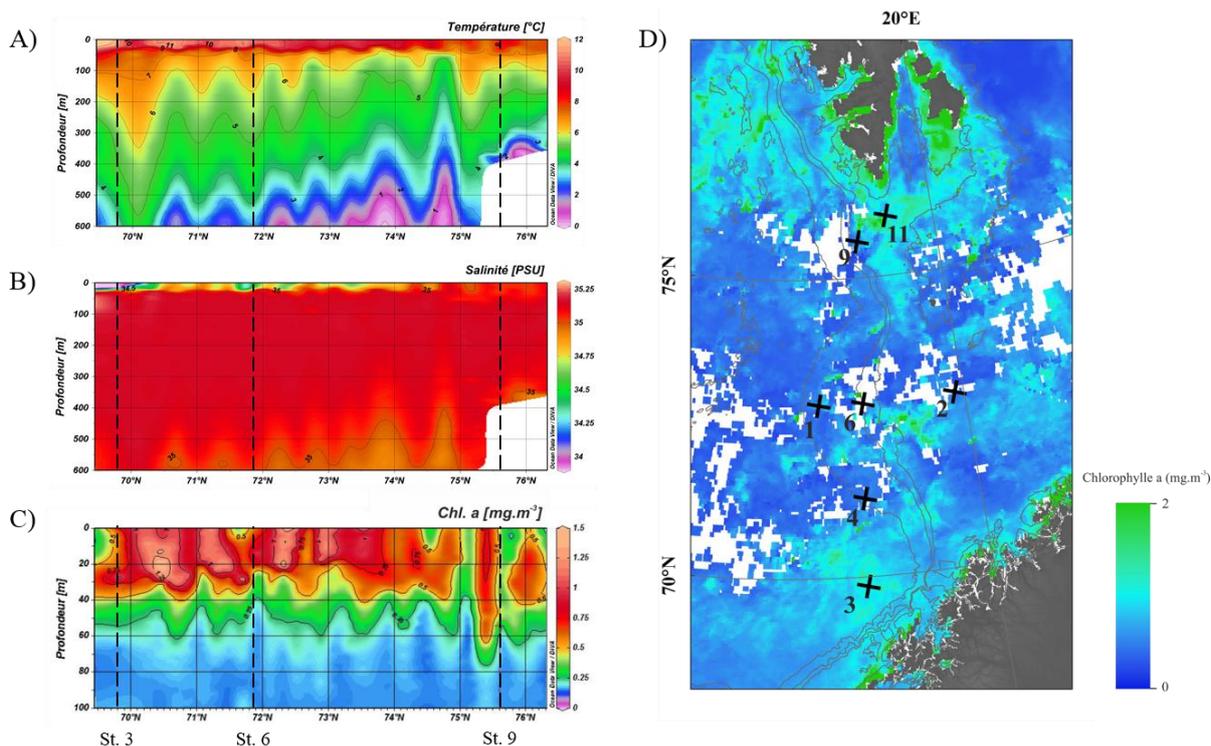


Figure IV.3 : Température (A), salinité (B) et concentration en Chl a (C) mesurés dans la colonne d'eau le long du profil nord-sud (Longitude autour de 14°E ; Latitude entre 69.45°N et 76.32°N) localisé dans la figure IV.1. Les mesures ont été réalisées depuis la surface jusqu'à 600 m de profondeur. Un zoom sur les 100 premiers mètres de la colonne d'eau (C) permet de visualiser en détail la distribution de la Chl. a. (D) Concentrations mensuelles de Chl. a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) en Août 2014.

La masse d'eau atlantique (NwAW) occupe largement la colonne d'eau sondée. La température de la NwAW est comprise entre 8 et 2°C et la salinité est supérieure à 35. Dans la partie sud de la zone d'étude, une couche d'eau de surface relativement chaude ($>8^{\circ}\text{C}$) et moins salée (<35) que la NwAW s'étend jusqu'à environ 74,5°N. Cette masse d'eau côtière norvégienne (NwCW) est séparée de la NwAW par une pycnocline marquée autour de 30 m de profondeur. La concentration en Chl a représentant la biomasse phytoplanctonique varie entre 0,3 et 1,5 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ entre 0 et 50 mètres de profondeur et présente des valeurs plus élevées et plus concentrées au sud, dans la couche d'eau de surface NwCW (Figure IV.3C). La carte de la Figure IV.3D permet de visualiser la répartition de la biomasse phytoplanctonique (Chl a) dans la zone d'étude au mois d'Août 2014. Une forte concentration en Chl a (environ 2 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) s'observe également aux alentours du Svalbard, notamment au niveau de la station 11. Dans la partie la plus profonde de la colonne d'eau mesurée, la température est inférieure à 2°C et la salinité, plus faible que celle de la NwAW, indique la présence de la masse d'eau de fond de la mer de Barents (BBW) à partir de 450 m de profondeur environ. Les trois bathysondes 33, 34 et 35 permettent de visualiser la structure de la colonne d'eau au-delà de 600 m de profondeur

(Fig. IV.4). Les trois masses d'eau décrites précédemment sont clairement définies sur ces profils. La BBW apparait très stable à partir d'environ 800 m de profondeur. Elle se forme dans la mer de Barents et déferle le long de la pente continentale entre 500 et 800 m de profondeur jusqu'au fond de la mer de Norvège (Blindheim, 1989). Les interfaces eau-sédiment des stations 1, 3, 4 et 6 sont sous l'influence de la masse d'eau de fond BBW froide ($<0^{\circ}\text{C}$) tandis que les stations 2, 9 et 11 se situent plutôt dans la zone de transition entre la NwAW et la BBW.

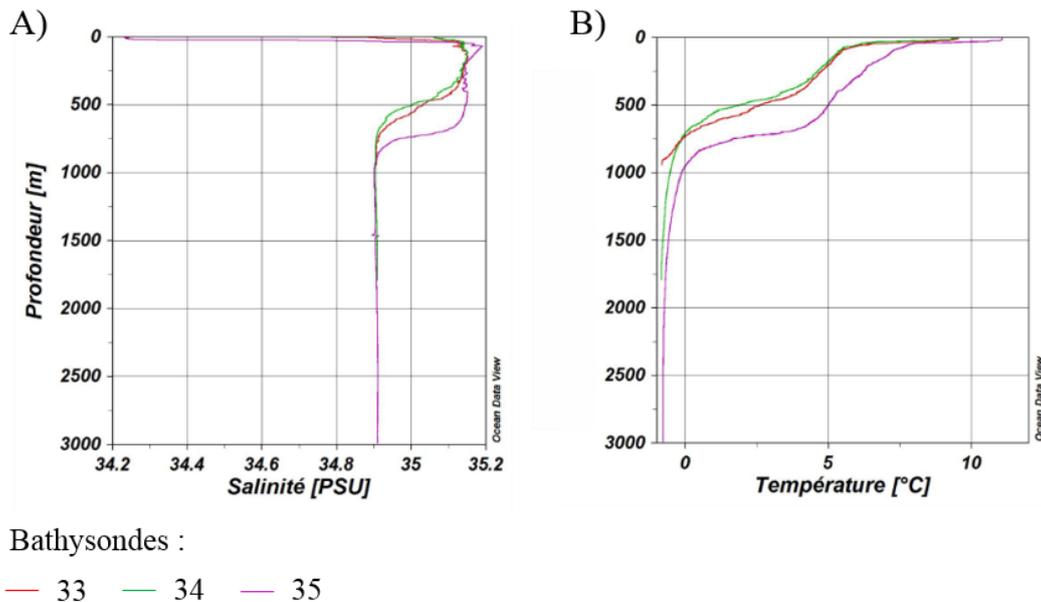


Figure IV.4 : Profils de température et salinité aux stations 33, 34 et 35 (voir figure 1 pour localisation).

Les paramètres sédimentologiques et géochimiques mesurés pour cette étude sont présentés en Figure IV.5. Le sédiment est principalement argileux aux stations les plus profondes (1, 3 et 4) et légèrement plus grossier (silts) au niveau des autres stations situées sur le talus et la plateforme continentale. Ces stations sont localisées dans des paléovallées glaciaires, Bjørnøyrenna (stations 2 et 6) et Storfjorden (stations 9 et 11). La station 6 présente les valeurs de TOC et TN les plus faibles (respectivement 0,26 et 0,06 %) tandis que les valeurs les plus élevées sont mesurées dans les sédiments de la station 11 (respectivement 1,86 et 0,19 %) proche du Svalbard et du front polaire. Le rapport C/N ainsi que le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ sont utilisés afin de déterminer l'origine de la matière organique et d'évaluer l'importance des apports marins par rapport aux apports terrigènes. Redfield (1963) considère un rapport C/N inférieur à 7 pour qualifier une origine marine de la matière organique. Nos mesures indiquent ainsi que la matière organique présente dans les sédiments de notre zone d'étude est majoritairement d'origine marine. Cependant, un très léger enrichissement en matière organique terrigène est observable

à la station 4 (8,5), devenant un peu plus important au niveau de la station 11 (9,8). Le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ confirme cette tendance d'une large dominance des apports de matière organique marine dans les sédiments, avec des valeurs oscillants entre -21,6 et -23,1 ‰. En effet, Naidu et al. (1993, 2000) interprètent les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ comprises entre -21 et -24 ‰ comme étant indicatrices d'une matière organique d'origine marine dans les sédiments de l'Arctique. Les valeurs de TOC, TN, C/N et $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ caractérisant les sédiments de surface de notre étude sont en adéquation avec celles mesurées dans les sédiments de surface de la mer de Barents par Knies et Martinez (2009). Le $\delta^{15}\text{N}$ mesuré dans les sédiments est utilisé pour tracer l'utilisation relative des nutriments, en particulier le nitrate (NO_3^-) dans la colonne d'eau par les producteurs primaires (Altabet et François, 1994 ; Farrell et al., 1995 ; François et al., 1992). Les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ mesurées dans les sédiments des stations 1, 3, 4 et 6 sont proches de 6 ‰. Celles des stations 2, 9 et 11 sont légèrement plus légères, autour de 5 ‰. Dans la zone photique, le phytoplancton utilise préférentiellement les nitrates isotopiquement plus légers ($^{14}\text{NO}_3^-$). Nos résultats indiquent donc une utilisation plus importante des nutriments au sud de la zone d'étude qu'au nord ou à l'est. Cependant, la biomasse phytoplanctonique consommant des nutriments est également florissante autour du Svalbard et près du front polaire (Fig. IV.3D). L'apport en nutriments serait ainsi suffisamment important pour soutenir une forte productivité primaire dans cette partie de la mer de Barents, sans appauvrir le stock de $^{14}\text{NO}_3^-$ disponible.

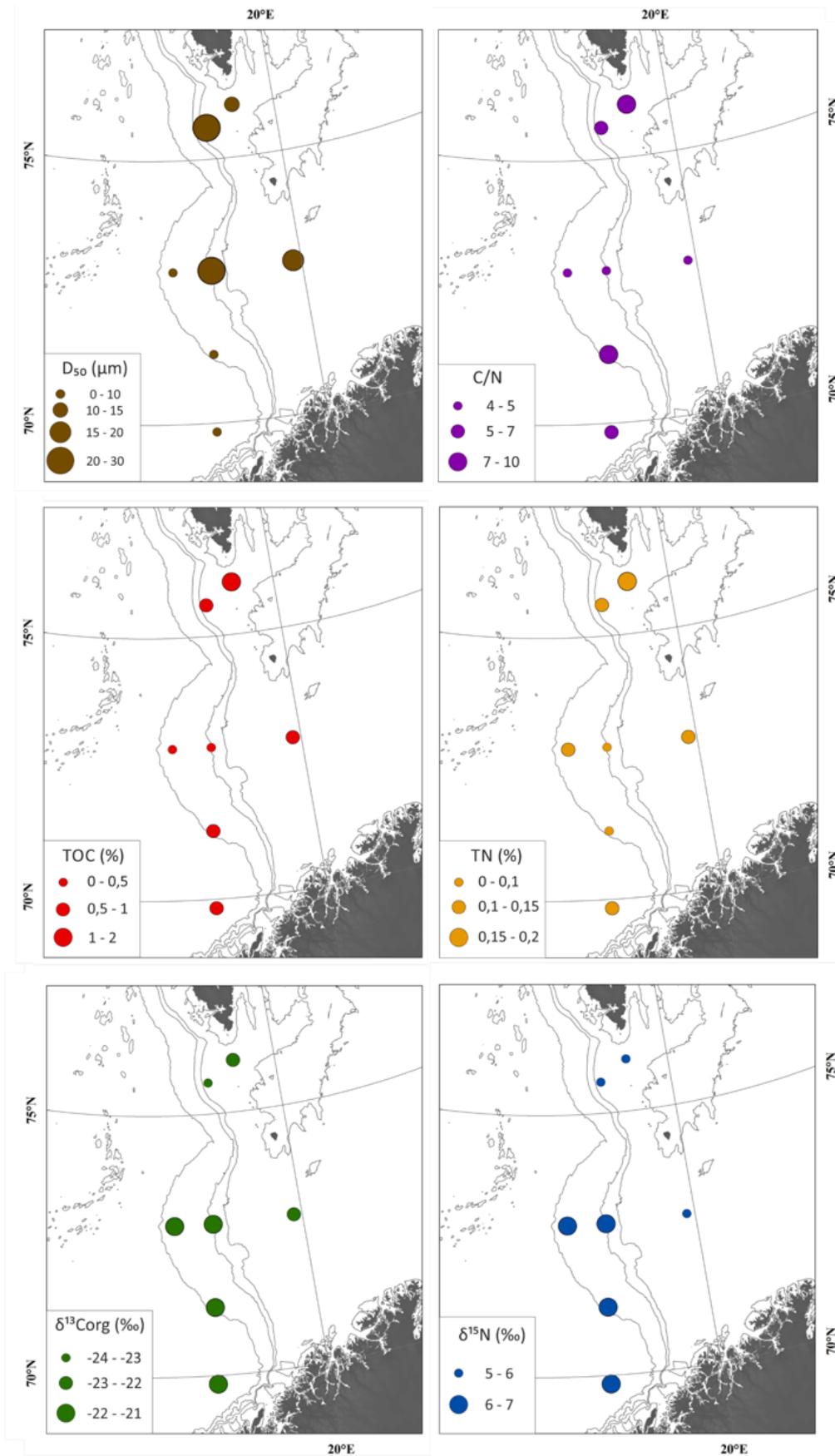


Figure IV.5 : Distribution des principaux paramètres environnementaux mesurés sur les 5 premiers centimètres du sédiment puis moyennés (D_{50} , TOC, TN, C/N, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$).

Les profils d'oxygène depuis l'interface eau-sédiment jusque dans les premiers centimètres de la colonne sédimentaire de chaque carotte étudiée sont présentés en Figure IV.7B. Le pourcentage de saturation en oxygène est relativement stable à l'interface eau-sédiment avec des valeurs comprises entre 80 et 90 %. Dans les sédiments des stations situées sur le talus ou au pied de la pente continentale (Sts. 1, 3, 4 et 6), l'oxygène est disponible sur au moins 5 cm. En revanche, la teneur en oxygène diminue beaucoup plus rapidement dans les sédiments des stations situées sur le plateau continental (Sts. 2, 9 et 11). L'anoxie est atteinte autour de 2,5 cm de profondeur pour les stations 2 et 9 et autour de 1,5 cm de profondeur pour la station 11. La consommation en oxygène est plus importante dans les sédiments de surface du plateau continental du fait d'une communauté d'organismes benthiques (macro à microfaunes) plus importante et diversifiée vivant dans cet environnement.

IV.4.2 Distribution des assemblages de foraminifères benthiques vivants

La Figure IV.6 montre les trois indices de biodiversité calculés pour chaque station. La richesse spécifique la plus faible avec 27 espèces est observée à la station 3, la plus profonde. Dans les autres stations, le nombre d'espèces de foraminifères benthiques vivants varie très peu (environ 40). Les indices H' et E sont plus élevés pour les stations situées sur le plateau continental (Sts. 2, 9 et 11). Une légère décroissance des indices avec la profondeur des stations dans la colonne d'eau est observable. Cela traduit une meilleure répartition de l'abondance des espèces aux stations les moins profondes tandis qu'une espèce doit dominer aux stations les plus profondes.

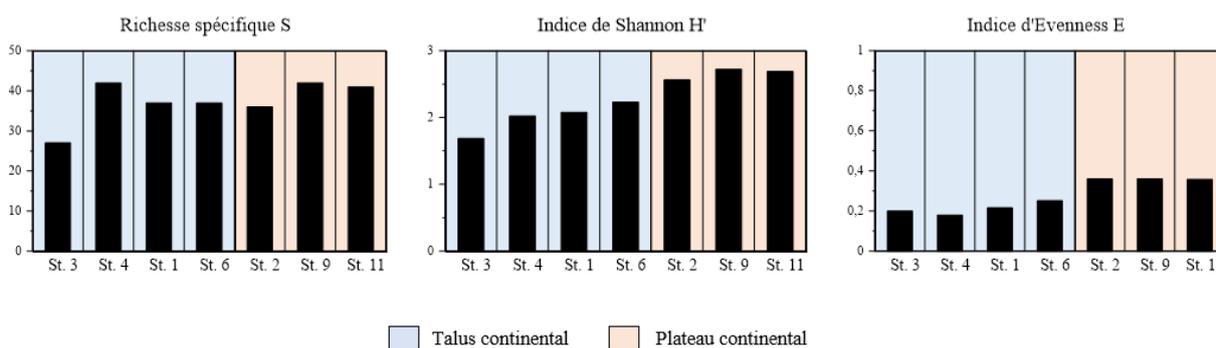


Figure IV.6 : Indices écologiques décrivant les assemblages de foraminifères benthiques vivants >125 μm observés pour chaque station.

Les densités de faunes vivantes, indiquées au centre des diagrammes en secteur de la Figure IV.7A, sont relativement élevées dans chaque carotte étudiée. La densité la plus faible est enregistrée dans la carotte de la station 1 avec 900 ind./100 cm^2 tandis que la densité la plus élevée avec 3088 ind./100 cm^2 est relevée dans la carotte de la station 11. Les densités observées ne montrent pas de relation directe avec la profondeur des stations.

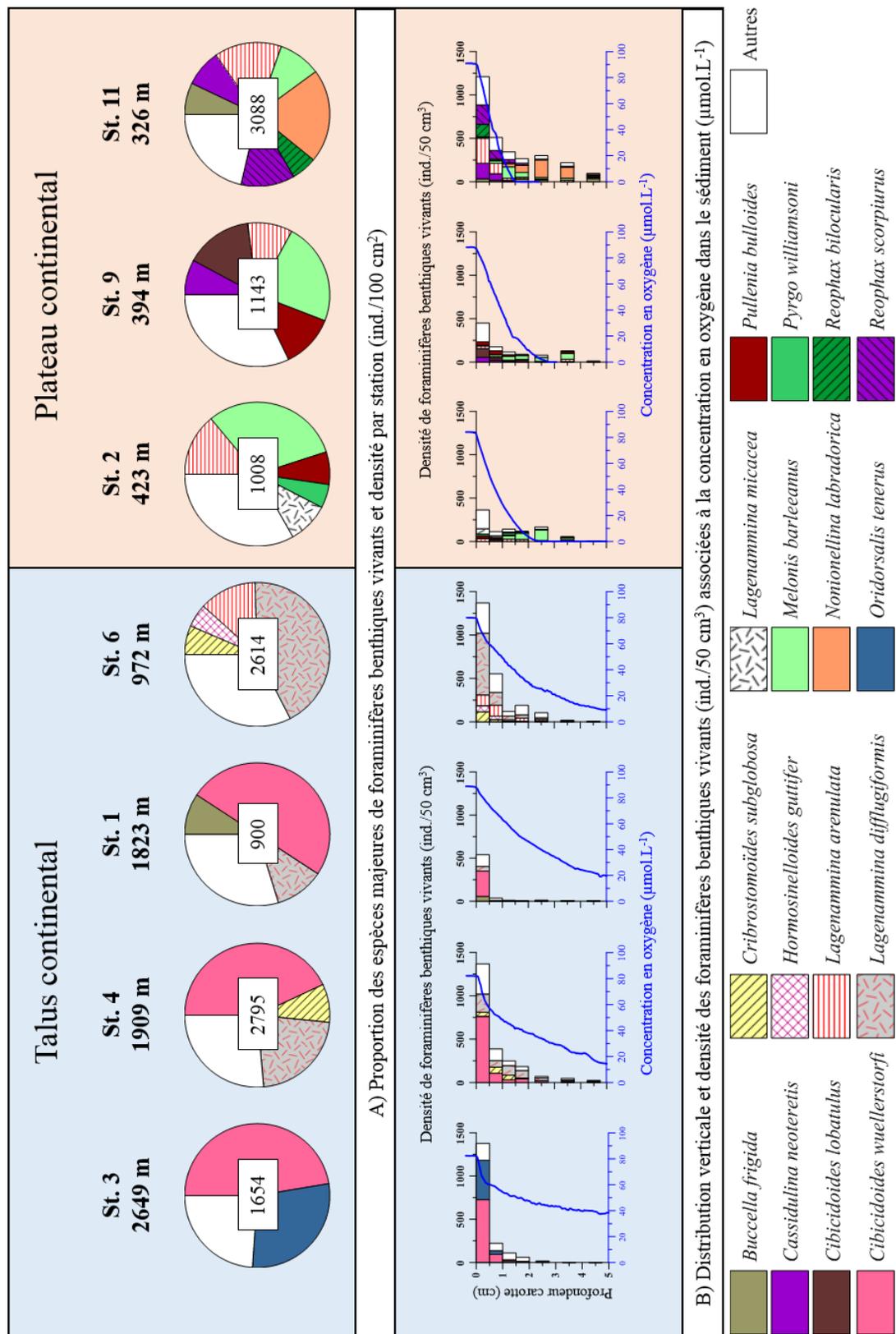


Figure IV.7 : A) Proportion des espèces majeures de foraminifères benthiques vivants dans les 5 premiers centimètres de sédiment des carottes. Au centre des diagrammes, les densités totales sont exprimées en nombre d'individus vivants par 100 cm² pour chaque station. B) Distribution verticale des espèces majeures de foraminifères benthiques vivants présentée comme la densité de chaque espèce (ind./50 cm³) en fonction de la profondeur de sédiment associée au pourcentage de saturation en oxygène mesuré dans le sédiment de chaque carotte.

Les espèces majeures observées dans les échantillons sont illustrées par la planche en annexe 3. La Figure IV.7A illustre pour chaque station étudiée l'abondance relative des espèces majeures de foraminifères benthiques vivants. L'espèce *Cibicidoides wuellerstorfi* domine largement les stations les plus profondes, 1 (50 %), 3 (47 %) et 4 (43 %). *Oridorsalis tenerus* représente 29 % de l'assemblage de la station 3 située à plus de 2000 m de profondeur. Dans les stations 1, 4 et 6, l'espèce agglutinée *Lagenammina difflugiformis* est abondante. Elle domine même largement l'assemblage de la station 6 (43 %), composé principalement d'espèces agglutinées. Les stations 2, 9 et 11 situées sur le plateau continental présentent des assemblages sensiblement différents de ceux caractérisant les stations plus profondes de la pente. La diversité des espèces majeures s'avère plus importante. Les espèces *Lagenammina arenulata* et *Melonis barleeanus* sont communes aux trois stations. L'espèce *Pullenia bulloides* est présente dans les stations 2 et 9 et l'espèce *Cassidulina neoteretis* constitue environ 8 % des assemblages des stations 9 et 11. L'espèce *Nonioninella labradorica* est dominante dans la station 11 et est absente dans les autres stations.

La distribution verticale en tant que densité des espèces de foraminifères benthiques vivants dans les carottes est présentée en Figure IV.7B. Les faunes vivantes sont essentiellement concentrées dans les 2 premiers centimètres du sédiment. Dans les stations situées sur la pente continentale, la densité diminue progressivement avec la profondeur dans le sédiment et très peu d'individus sont comptabilisés au-delà de 2 cm de profondeur. Les stations situées au niveau de la plateforme continentale ont des distributions verticales plus irrégulières avec notamment la présence des espèces *M. barleeanus* et *N. labradorica* qui prolifèrent plus en profondeur dans le sédiment, entre 1 et 4 cm, et contribuent au maintien d'une densité relativement importante à ces profondeurs.

IV.4.3 Distribution des assemblages de foraminifères benthiques morts et variations des éléments traces mesurés au XRF

L'évolution temporelle des éléments traces tels que Ca, Si, K, Fe, Ti et Br ainsi que des assemblages des foraminifères benthiques morts dans les carottes des stations 1, 6 et 2 est présentée en Figure IV.8. Les variations des éléments chimiques sélectionnées montrent sensiblement les mêmes tendances pour les stations 1 et 6. Avant les années 1910-1920 voire même 1930-1940 pour la station 6, les concentrations élémentaires relatives sont relativement stables. Puis, Ca et Br augmentent tandis que Si, K, Fe et Ti diminuent progressivement jusqu'aux années 1980. Une phase particulière est identifiée entre 1950-1960

et 1980. En effet, Ca diminue puis ré-augmente alors que K, Fe et Ti varient à l'inverse. A partir des années 1980, les éléments chimiques sont plus stables. Les éléments chimiques mesurés sur les 10 premiers centimètres de la carotte de la station 2 présentent des variations différentes. Ca et Br diminuent jusque dans les années 1900, restent relativement stables durant le dernier siècle puis augmentent à partir des années 2000. Si, K et Ti oscillent autour de valeurs moyennes jusque dans les années 2000 puis diminuent drastiquement. Fe augmente puis se stabilise autour des années 1900 et diminue à partir des années 1980.

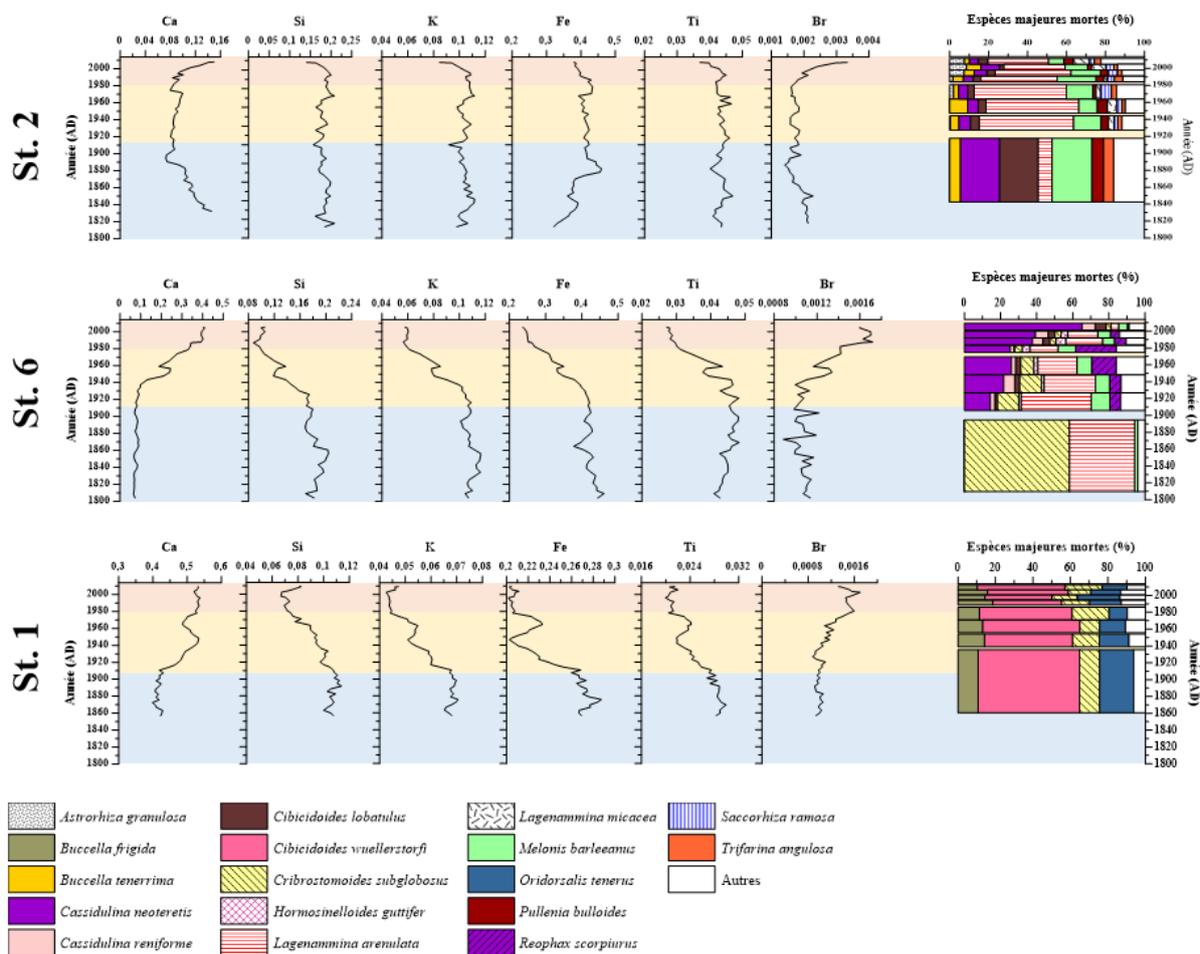


Figure IV.8 : Mesures XRF de l'intensité des éléments sélectionnés dans les carottes des stations Sts. 1, 2 et 6 en fonction de l'âge. L'abondance relative des espèces majeures de foraminifères benthiques fossiles est représentée sur la droite de la figure. Les bandeaux colorés soulignent les périodes de variations des conditions environnementales discutées dans cette étude.

Les assemblages de foraminifères benthiques morts des trois stations étudiées sont différents entre les stations malgré la présence d'espèces communes. Les assemblages de la station 2 située sur le plateau continental se composent d'espèces calcaires et d'espèces agglutinées dont certaines sont également présentes dans les faunes vivantes. La proportion d'espèces agglutinées diminue avec la profondeur dans la carotte. Cependant, les espèces ne

présentent pas de changement important. A l'inverse, la station 6 située sur la pente présente une proportion d'espèces agglutinées (*C. subglobosus* et *L. arenulata*) plus importante en profondeur que dans les niveaux de surface. D'autre part, la proportion de l'espèce *C. neoteretis* augmente progressivement depuis les années 1900 jusqu'à nos jours. Toutefois, cette espèce ne fait pas partie des espèces majeures de l'assemblage des foraminifères benthiques vivants de la station 6 (Fig. IV.7). L'assemblage de foraminifères benthiques morts caractérisant la station 1 en bas de pente se compose de quatre espèces majeures (*Buccella frigida*, *C. wuellerstorfi*, *C. subglobosus* et *O. tenerus*). La proportion de ces espèces apparaît relativement constante le long de la carotte étudiée.

IV.5 Discussion

IV.5.1 Distribution des foraminifères benthiques vivants en lien avec l'environnement hydrologique et sédimentaire

Les foraminifères benthiques répondent à un ensemble de paramètres environnementaux tels que les propriétés physiques des masses d'eau (température, salinité), la profondeur d'eau, le flux de matière organique (source, quantité, qualité) et l'oxygénation du sédiment (e.g., Jorissen et al., 1995 ; Wollenburg et Mackensen, 1998a, 1998b ; Murray, 2006). Les assemblages présentent deux tendances relativement marquées entre les stations profondes du talus influencées par les eaux profondes de la mer de Barents BBW et celles situées sur le plateau continental plutôt affectées par les eaux atlantiques NwAW. Classiquement, les profils d'oxygène montrent des pénétrations de l'oxygène plus importantes dans les stations profondes et des profondeurs de pénétration plus faibles dans les stations du plateau, ceci étant directement lié à la dégradation de la matière organique plus abondante dans les stations moins profondes. Néanmoins, ce facteur n'apparaît pas limitant car certaines espèces, notamment *M. barleeanus* ou *N. labradorica*, prolifèrent dans les niveaux anoxiques des carottes des stations 2, 9 et 11. Plusieurs études ont déjà démontré le caractère non restrictif de l'oxygénation des sédiments pour le développement des foraminifères benthiques dans divers environnements océaniques (e.g., Belanger et Streeter, 1980 ; Licari et al., 2003 ; Caille et al., 2014 ; Dessandier et al., 2015).

Au-delà des différentes masses d'eau, la relation entre les paramètres environnementaux relevés et les faunes vivantes enregistrées dans notre étude n'apparaît pas évidente. La densité est relativement élevée pour toutes les stations et semble indépendante des variations de

granulométrie ou de quantité de matière organique disponible. Cependant, la situation est conforme aux autres études traitant des foraminifères benthiques récents dans l'Atlantique Nord (e.g., Mackensen et al., 1985 ; Hald et Steinsund, 1992 ; Korsun et Hald, 2000 ; Saher et al., 2012, 2009 ; Dijkstra et al., 2017 ; Jernas et al., 2018).

L'environnement profond en bas de pente est stable, caractérisé par la masse d'eau froide BBW, un flux de matière organique relativement faible et un état de dégradation avancé de cette matière organique dite réfractaire se déposant au fond. *Cibicidoides wuellerstorfi* est une endofaune superficielle bien adaptée à cet environnement profond et abondante aux hautes latitudes entre 1000 et 3000 mètres de profondeur. Elle a été observée au sud-ouest de la mer de Norvège, en bas de pente continentale dans l'étude de Mackensen et al. (1985) ainsi que dans l'océan Arctique (Osterman et al., 1999). D'après notre étude, *C. wuellerstorfi* abonde dans les sédiments de surface bien oxygénés avec des apports de matière organique faibles à modérés. La station 3, située à plus de 2500 mètres de profondeur, présente une abondance relative importante de l'espèce *O. tenerus*. Cette espèce est classiquement présente dans les environnements oligotrophes des grands fonds océaniques de l'Arctique et de l'Atlantique Nord (e.g., Belanger et Streeter, 1980 ; Mackensen et al., 1985 ; Ishman et Foley, 1996 ; Wollenburg et Mackensen, 1998a, 1998b ; Husum et al., 2015).

La plateforme continentale de la mer de Barents présente des environnements océaniques plus contrastés. La station 2 est située à l'ouest et au centre de la mer de Barents dans le passage Bjørnøyrenna, voie d'entrée principale de la masse d'eau atlantique dans la mer de Barents. Les stations 9 et 11 plus au nord, se situent plus proche du Svalbard et du front du polaire. De plus, la glace de mer saisonnière recouvre le nord de la mer de Barents et la limite d'extension de la banquise hivernale peut s'étendre jusqu'au niveau des stations 9 et 11. La productivité primaire y est plus intense et le flux de matière organique alimentant l'écosystème benthique est par conséquent plus important qu'au niveau de la station 2, localisée dans un milieu océanique plus ouvert (Knies et Martinez, 2009).

Les stations situées sur le plateau continental présentent des assemblages plus diversifiés et constitués d'espèces différentes comparativement aux stations plus profondes de bas de pente continentale. Les disparités environnementales constatées sur la plateforme continentale se reflètent également dans les assemblages de foraminifères benthiques. Tout d'abord, *M. barleeanus* est une espèce commune aux trois stations du plateau continental mais avec une contribution qui diminue vers le nord. Elle traduit une disponibilité en matière organique relativement importante mais dans un état de dégradation avancé (Hald et Steinsund, 1996 ;

Jennings et al., 2004). Au nord, la présence du front polaire est bien connue pour avoir une influence majeure sur l'état trophique de la colonne d'eau (e.g., Sakshaug et Slagstad, 1992 ; Reigstad et al., 2002 ; 2008 ; Qu et al., 2006) et donc sur l'écologie benthique. *Cassidulina neoteretis*, une espèce typique de la masse d'eau atlantique (Mackensen et Hald, 1988 ; Carmack 1990 ; Jennings et Helgadottir, 1994 ; Steinsund et Hald, 1994 ; Lubinski et al., 2001 ; Rytter et al., 2002 ; Jennings et al., 2004), associée à des apports épisodiques de matière organique fraîche (Gooday et Lambshead, 1989), est présente dans les assemblages des stations 9 et 11. Le gradient de productivité primaire, plus élevé en remontant vers le nord et la côte du Svalbard se reflète dans les assemblages de foraminifères benthiques entre la station 9 et la station 11. En effet, la station 11 présente un maximum de densité relevé par rapport aux autres stations et un assemblage dominé par l'espèce *N. labradorica*. La proximité du front polaire et du Svalbard implique un apport de nourriture plus conséquent alimentant l'écosystème benthique. La présence de *N. labradorica* associée à *C. neoteretis* est typique des milieux riches en matière organique fraîche issue d'une productivité primaire bien développée.

L'assemblage de la station 6, située à mi-pente entre la station 2 sur le plateau et la station 1 plus profonde est particulière. Il est presque entièrement composé de foraminifères benthiques agglutinés (Fig.IV.7). La localisation de cette station pourrait expliquer le faible pourcentage de TOC mesuré ainsi que l'assemblage atypique observé. La pente continentale à l'ouest de la mer de Barents est un milieu instable, soumis aux ondes de marée interne (Morozov et al., 2003 ; Kagan et al., 2014) ainsi qu'aux phénomènes de néphéloïdes de fond (Thomsen et Graf, 1994). Ces instabilités sédimentaires ne permettent pas le dépôt et la conservation de matière organique en quantité importante sur la pente continentale. Une forte proportion de foraminifères benthiques agglutinés est habituellement attribuée à des conditions oligotrophes du milieu résultant d'une baisse de la quantité et de la qualité de la matière organique disponible (Schmiedl et al., 1997 ; Kurbjeweit et al., 2000 ; Koho, 2008 ; Phipps et al., 2012). En effet, les espèces agglutinées ont de plus faible besoin trophique que les espèces calcaires, leur permettant de vivre dans des milieux plus limités en nourriture comme c'est le cas pour la station 6 caractérisée par des teneurs en TOC et TN faibles.

Les espèces de foraminifères benthiques vivants composant les différents assemblages des stations étudiées sont conformes aux espèces classiquement recensées en Atlantique Nord dans les autres études (e.g., Mackensen et al., 1985 ; Hald et Steinsund, 1992 ; Korsun et Hald, 2000 ; Saher et al., 2012, 2009 ; Dijkstra et al., 2017 ; Jernas et al., 2018). Les environnements profonds stables et oligotrophes sont dominés par C. wuellerstorfi au-delà

de 1800 mètres et O. tenerus au-delà de 2500 mètres de profondeur. Les assemblages de foraminifères benthiques vivants des stations situées sur le plateau continental semblent plutôt contrôlés par la disponibilité en matière organique et donc indirectement par la productivité primaire qui s'établit en surface avec la présence d'espèces typiques telles que M. barleeanus, C. neoteretis et N. labradorica. Enfin, l'instabilité sédimentaire et hydrologique affectant la pente continentale se traduit par la dominance d'espèces agglutinées, moins exigeantes en termes de nourriture disponible pour leur développement.

IV.5.2 Evolution temporelle depuis le XIXème siècle

L'étude des assemblages de foraminifères benthiques fossiles sur les 10 premiers centimètres de sédiment, couvrant les 2 derniers siècles (Tableau IV.2 ; Fig. IV.2), combinée à l'analyse des éléments majeurs (Fig. IV.8) sur les stations 1, 6 et 2 du transect ouest-est nous permet de mieux comprendre l'évolution des conditions environnementales. Les éléments chimiques mesurés ont été sélectionnés afin d'apporter des informations intéressantes sur les conditions environnementales générales caractérisant la zone étudiée. Ca est un indicateur de l'intensité de la productivité primaire marine tandis que les éléments Si, K, Fe, et Ti sont caractéristiques des apports terrigènes (Møller et al., 2006). Du fait de la situation géographique des stations étudiées relativement éloignées des côtes, l'abondance des éléments signant des apports terrigènes, relativement au Br qui est un composant indicateur de la matière organique marine, permet de retracer les variations de sédimentation apportée par la fonte de la banquise.

Depuis le début du XIXème siècle, des changements climatiques et environnementaux affectent l'Atlantique Nord et s'enregistrent dans les carottes étudiées. La période froide nommée Petit Age Glaciaire (PAG) est amorcée entre 1300 et 1400 et se termine pendant la deuxième moitié du XIXème siècle, avec un réchauffement progressif de l'hémisphère nord aux alentours des années 1850 (e.g., Denton et Broecker, 2008 ; Sejrup et al., 2010 ; Trouet et al., 2012). Au Svalbard, la mesure de la température de l'air et des précipitations existe depuis la fin du XIXème siècle. Un changement de température est noté au début des années 1920. De plus, les études de Vinje (1999, 2001) et de Divine et Dick (2006) indiquent que la glace de mer couvrait largement la mer de Barents avant 1920 et que sa limite maximale était donc positionnée plus au sud qu'actuellement, entre 70 et 75°N (Fig.IV.9).

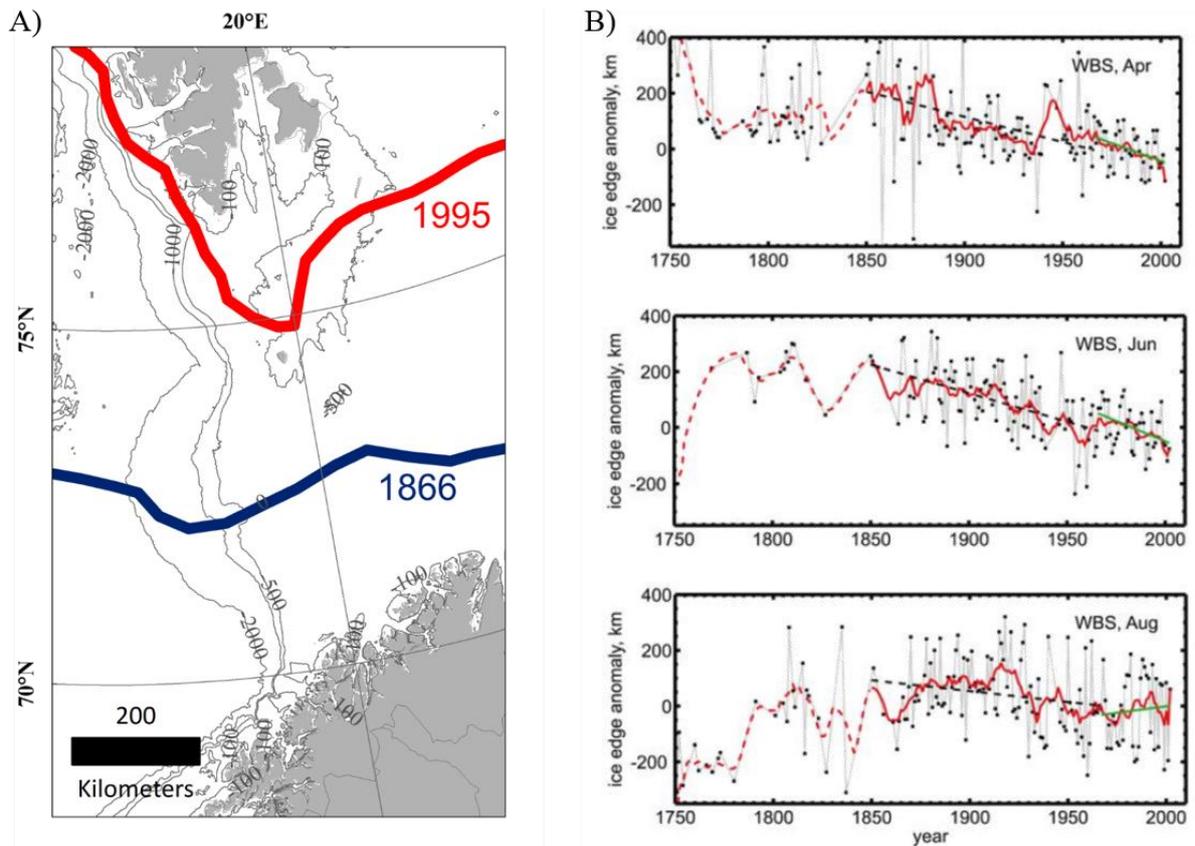


Figure IV.9 : A) Localisations extrêmes au sud (ligne rouge, 1995) et au nord (ligne bleue, 1866) des bordures de glace au mois d'Avril relevées sur la période historique 1864-1998, modifié d'après Vinje, 2001. B) D'après Divine et Dick, 2006, moyennes d'étendues de glace de mer pour les mois d'Avril, Juin et Août à l'ouest de la mer de Barents pour la période 1750-2002 (points noirs). Les tendances linéaires pour les données historiques (1850-1966, lignes pointillées noires) et les données contemporaines (depuis 1967, lignes vertes) sont superposées à chaque figure. Les lignes rouges (continues et pointillées) présentent une moyenne lissée sur 11 ans.

Nos données relatives aux sédiments d'âges inférieur à ~1920 traduisent les effets du climat froid sévissant dans la région durant cette période, soit une productivité primaire faible (faible teneur en Ca) au niveau de la pente continentale et d'importants apports terrigènes par la fonte de la glace de mer saisonnière. Les tests de foraminifères benthiques fossiles contenus dans l'échantillon compris entre 5 et 10 cm de chaque carotte sont représentatifs des faunes vivantes à la fin de la période froide du PAG. En bas de pente, à environ 1900 mètres de profondeur (St. 1), l'assemblage de foraminifères benthiques fossiles est stable sur toute la colonne sédimentaire analysée et semblable à l'assemblage vivant (Fig. IV.7) avec une dominance de *C. wuellerstorfi* indicateur des conditions stables, oligotrophiques de l'environnement profond baigné par les eaux froides de la mer de Barents BBW. L'assemblage de foraminifères benthiques fossiles représentatif de la période du PAG dans la carotte de la

station 6 située sur la pente est également similaire à l'assemblage vivant constitué presque exclusivement de foraminifères benthiques agglutinés. Ces espèces sont caractéristiques du milieu instable de la pente pauvre en matière organique.

Au niveau du plateau continental (St. 2), une baisse du Ca et du Br est enregistrée au cours du XIX^{ème} siècle. Ce signal traduirait une diminution de la productivité primaire et donc du flux de matière organique marine à la fin du PAG. Les blooms phytoplanctoniques de printemps sont importants dans la zone marginale de glace (MIZ) suite au retrait saisonnier de la banquise. La migration vers le nord de la limite maximale de la banquise et de la MIZ depuis les années 1850 pourrait expliquer cette possible réduction de l'intensité de la productivité primaire. Cependant, le Ca peut également être d'origine lithique et transporté par les glaces suite à l'érosion de l'île aux ours (Bjørnøya) constituée d'un socle en partie carbonaté et de formations carbonatées du Dévonien et du Permien (Mørk et al., 1990). Le retrait progressif de la banquise et le réchauffement du climat pourrait restreindre le transport de particules provenant de l'île aux ours, réduisant ainsi la teneur en Ca dans le sédiment marin proche. Par ailleurs, les éléments terrigènes mesurés Si, K, Fe et Ti sont relativement élevés témoignant de l'influence des apports liés à la fonte saisonnière de la banquise sur le plateau continental de la mer de Barents. L'assemblage des foraminifères benthiques fossiles correspondant à la fin du PAG apporte plusieurs informations sur les conditions environnementales à cette époque. Les espèces recensées sont similaires aux espèces observées dans les assemblages vivants au niveau des stations du plateau continental, typiques de la masse d'eau atlantique, la masse d'eau arctique froide sévissant plus au nord de la zone étudiée. La présence de *Cibicidoides lobatulus* suggère une activité du courant NCaC assez élevée. Deux espèces liées au flux de matière organique et à la quantité de nourriture disponible, *C. neoteretis* (20 %) et *M. barleeanus* (21 %), sont également bien représentées. Elles témoignent d'un apport de matière organique abondant lors des phases de blooms phytoplanctoniques alimentant l'écosystème benthique du plateau continental.

Au début du XX^{ème} siècle, la période froide du PAG se termine et le climat se réchauffe petit à petit. Cependant, ce réchauffement climatique n'est pas linéaire mais présente une variabilité décennale naturelle liée à l'oscillation nord atlantique (NAO). Cette variabilité décennale explique l'occurrence d'anomalies hydrologiques en Atlantique Nord au siècle dernier telles les Great Salinity Anomalies (GSAs) qui se caractérisent par un apport conséquent d'eau polaire dessalée depuis l'océan Arctique entraînant une réduction de la circulation thermohaline (Belkin et al., 1998 ; Hakkinen, 1999). Dans notre étude, la variation des éléments

chimiques mesurés dans les carottes situées au niveau de la pente continentale témoignent de la transition entre la période froide du PAG et l'époque actuelle. La hausse du Ca et du Br depuis les années 1930 marquerait une augmentation de la productivité primaire tandis que la baisse des éléments terrigènes témoignerait du recul de l'étendue de la glace de mer au nord de la mer de Barents. Les assemblages de foraminifères benthiques fossiles observés dans la carotte de la station 6 tracent cette augmentation de la productivité primaire. La proportion de l'espèce *C. neoteretis* augmente progressivement depuis le début du XX^{ème} siècle, passant de 14 % de l'assemblage total à plus de 65 % dans l'assemblage représentatif des années 2000. Cette espèce opportuniste est caractéristique des eaux atlantiques et classiquement associée à des apports pulsés de matière organique suite à des épisodes de bloom phytoplanctonique. Associée à *M. barleeanus*, ces deux espèces sensibles au flux de matière organique sont indicatrices d'une augmentation de la productivité primaire au niveau de la pente continentale ouest de la mer de Barents, peut-être liée à l'apport de nutriments par la masse d'eau atlantique dont l'influx s'intensifie au cours du dernier siècle. Les éléments chimiques mesurés dans les carottes situées sur la pente continentale présentent une petite inversion par rapport aux tendances générales autour des années 1970. En effet, la productivité primaire semble légèrement ralentie et l'apport d'éléments terrigènes augmenté. Cette observation pourrait être liée à l'évènement GSA qui a impacté la région de la mer de Norvège et de la mer de Barents à la fin des années 1970 (Belkin et al., 1998). Pendant cette période de refroidissement, l'influx d'eau atlantique chaude est réduit contribuant ainsi à l'expansion de la banquise plus au sud en mer de Barents (Zhang et Vallis, 2006). Cependant, cet évènement relativement intense est assez limité dans le temps et ne se visualise pas dans l'évolution des assemblages de foraminifères benthiques fossiles, le pas d'échantillonnage cumulant plusieurs décennies au sein d'un échantillon. Les études sur le sujet de la GSA indiquent une répétition de cet évènement dans les années 1980 et 1990. Pourtant, leur signal ne se manifeste plus dans les éléments mesurés dans les carottes de notre étude. La GSA des années 1970 était la plus intense enregistrée. De plus, la mer de Barents n'est impactée qu'à la fin de l'évènement du fait du sens de circulation des courants transportant cette masse d'eau anormalement froide et peu salée en Atlantique Nord ce qui affaiblit son influence.

La productivité primaire semble de nouveau bien établie et stable depuis les années 1980 au niveau de la pente continentale et l'influence de la banquise est nettement réduite. Au XX^{ème} siècle au niveau du plateau continental, les teneurs en Ca et Br sont relativement faibles tandis que les éléments chimiques relatifs aux apports terrigènes par la banquise restent assez

Chapitre IV

élevés. La productivité primaire serait limitée et l'influence de la glace de mer persisterait à l'ouest du plateau continental malgré la tendance globale au réchauffement climatique et aux apports d'eau atlantique accentués. Cependant, la présence de *C. neoteretis* et *M. barleeanus* dans les assemblages de foraminifères benthiques (environ 20 %) traduit une productivité primaire tout de même active avec des apports épisodiques de matière organique.

A la fin du XXème siècle, la limite d'étendue de la banquise en hiver a drastiquement reculé, ne couvrant plus que la partie nord de la mer de Barents. L'augmentation du Ca et Br reflète cet environnement marin ouvert où l'apport d'eau atlantique riche en nutriments alimente la productivité primaire. L'influence de la banquise est également fortement réduite. Plusieurs études parlent d'atlantification de la mer de Barents depuis les années 1980 (e.g., Årthun et al., 2012 ; Barton et al., 2018). Ce phénomène se manifeste par une augmentation des températures atmosphériques et océaniques ainsi que du transport de chaleur via la masse d'eau atlantique depuis 40 ans (Smedsrud et al., 2010). Dans la région de la mer de Barents, les études sur l'évolution récente de l'environnement basées sur l'utilisation du proxy foraminifères benthiques indiquent toutes un réchauffement couplé à une atlantification de la région depuis le dernier siècle avec une décroissance marquée des espèces associées aux eaux froides de l'Arctique ou à la présence de banquise au profit d'espèces typées Atlantique, dépendantes des apports de matière organique issus de la productivité primaire de surface (Saher et al., 2012 ; Dijkstra et al., 2015, 2017).

IV.6 Conclusion

Les foraminifères benthiques vivants sur la marge continentale ouest de la mer de Barents sont typiques des faunes recensées en Atlantique Nord et en Arctique. L'oxygénation du sédiment ne semble pas être un facteur limitant pour le développement des faunes. La distribution des foraminifères benthiques semble plutôt contrôlée par les propriétés des masses d'eau et essentiellement par la quantité et la qualité de la matière organique. L'environnement profond oligotrophe baigné par la masse d'eau de fond de la mer de Barents BBW est dominé par les espèces endofaunes superficielles *C. wuellerstorfi* et *O. tenerus* au-delà de 1800 et 2500 mètres de profondeur, respectivement. Les foraminifères benthiques agglutinés sont dominants au niveau de la pente où les conditions hydrodynamiques sont instables et la disponibilité en nourriture est limitée. Sur le plateau continental influencé par la masse d'eau atlantique, la distribution des foraminifères benthiques est largement conditionnée par le flux de matière organique alimentant le domaine benthique. A la fin de l'été, la productivité primaire est faible

Chapitre IV

au niveau de la dépression de Bjørnøyrenna, le bloom phytoplanctonique intervenant plus tôt dans la saison. Cette configuration est favorable à la prolifération de l'espèce endofaune profonde *M. barleeanus* tolérant un état de dégradation avancé de la matière organique. Au nord, près du Svalbard, aux abords du front polaire, la productivité primaire est plus importante. L'apport de matière organique fraîche favorise le développement de l'espèce opportuniste *C. neoteretis* et de l'endofaune profonde *N. labradorica*, cette dernière étant également caractéristique de la proximité du front polaire.

Les connaissances écologiques approfondies par l'étude des faunes modernes permettent d'interpréter les assemblages de foraminifères benthiques fossiles en termes de variations environnementales. Depuis le XIX^{ème} siècle, le climat en Atlantique Nord a évolué passant d'une période froide, le PAG, à un réchauffement depuis le début du XX^{ème} siècle, accentué par l'activité anthropique à partir des années 1980. La réponse des foraminifères benthiques à ces changements a été étudiée au niveau de la marge ouest de la mer de Barents, au débouché de la dépression Bjørnøyrenna. Malgré les variations climatiques, l'environnement profond de bas de pente est resté stable, sous l'influence constante des eaux de fonds froides de la mer de Barents BBW. Au niveau de la pente, l'augmentation progressive de l'abondance de l'espèce *C. neoteretis* témoigne de l'augmentation de l'influx d'eau atlantique vers le nord, conséquence du réchauffement climatique amenant à une atlantification de la région. Nos données micropaléontologiques indiquent que la masse d'eau atlantique pénétrait sur le plateau continental à l'ouest de la mer de Barents durant le PAG. Les variations de la productivité primaire sur le plateau continental liées au recul de la MIZ durant la transition PAG-époque moderne se répercutent sur les assemblages de foraminifères benthiques avec la baisse de proportion des espèces *C. neoteretis* et *M. barleeanus*.

Chapitre V : Synthèse

Les objectifs de cette thèse étaient d'améliorer les connaissances sur l'écologie des foraminifères benthiques en domaine arctique, d'une part pour mieux comprendre la réponse de ces micro-organismes benthiques dans des zones aux conditions environnementales contrastées et où les changements climatiques en cours et à venir sont importants et d'autre part, dans le but d'affiner leur utilisation comme proxys paléoclimatiques et paléoenvironnementaux pour de futures études. Les trois régions arctiques investiguées sont contrastées en termes de masses d'eau, de couvert de glace de mer, de proximité avec les continents ou de productivité primaire. La mer de Chukchi se situe à l'intérieur de l'océan Arctique, au nord du détroit de Béring, principale voie de transit des eaux pacifiques. La baie de Baffin, plus confinée, présente la particularité d'héberger la polynie la plus productive de l'océan Arctique et débouche au nord sur le détroit de Nares fortement influencé par les glaciers Groenlandais. La mer de Barents, enfin, est considérée comme faisant partie de l'environnement arctique mais est largement influencée par l'océan Atlantique Nord d'autant plus dans sa partie ouest où notre étude s'est concentrée. Pour des raisons logistiques, seules les périodes de fin d'été et début d'automne ont pu être étudiées. Ainsi, les campagnes se sont déroulées sur deux années, en 2014 (Baffin et Barents) et 2015 (Baffin et Chukchi) conférant une vision quasi synchrone de ces environnements. Les populations de foraminifères benthiques vivants récoltées dans ces trois régions présentent des similitudes et des différences du point de vue de leur densité et de leur diversité en relation avec le contexte environnemental propre à chacun de ces domaines géographiques. La distribution des foraminifères benthiques est soumise à divers facteurs qui, individuellement ou conjointement, agissent sur leur répartition. Notre travail suggère que (1) la productivité primaire et l'apport de matière organique à l'environnement benthique, (2) la nature des masses d'eau, (3) la dissolution des carbonates à l'interface eau-sédiment et (4) la dynamique de la glace de mer sont les composantes principales de l'écosystème arctique expliquant la distribution des foraminifères benthiques vivants dans les trois régions étudiées.

V.1 Productivité primaire

En Arctique, la productivité primaire est effective pendant les saisons printanières et estivales, lorsque la luminosité solaire augmente et la glace de mer se retire progressivement. Les blooms phytoplanctoniques s'établissent notamment au niveau des zones marginales de glace (MIZ), des fronts hydrographiques ou fronts polaires et des polynies (e.g. Reigstad et al., 2002 ; Tremblay et al., 2002 ; Mundy et al., 2009 ; Perrette et al., 2011 ; Arrigo et al., 2012). La production primaire constitue la source principale d'apport de matière organique au domaine

benthique dans les trois régions étudiées. Les valeurs du rapport isotopique $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ et le rapport C/N mesurées dans nos échantillons témoignent de l'origine marine de la matière organique. Un ensemble de jeux de données incluant des mesures par imagerie satellite de la concentration en chlorophylle *a* (Chl. *a*) dans les eaux de surface, des mesures par fluorimétrie de la distribution verticale (colonne d'eau) de Chl. *a*, et des mesures de teneur en carbone organique (TOC) dans le sédiment, a permis d'identifier, pour chaque région, les zones les plus productives et dont les sédiments sont particulièrement enrichis en matière organique. La productivité primaire se révèle relativement intense en été au sein de la polynie des eaux du nord (NOW) au nord de la baie de Baffin, dans le détroit de Nares, et dans la mer de Barents près des côtes norvégiennes et du Svalbard. En mer de Chukchi, la productivité primaire est importante en mai et juin au niveau du plateau continental, dans la MIZ mais aussi sous la glace de mer. Ainsi, la période d'échantillonnage des foraminifères benthiques vivants au nord de la mer de Chukchi (fin août-début septembre 2015), est représentative de conditions post-blooms phytoplanctoniques.

Les foraminifères benthiques sont fortement dépendants des apports de nourriture (e.g., Jorissen et al., 2015 ; Wollenburg et Mackensen, 1998a ; Wollenburg et Mackensen, 1998b ; Wollenburg et Kuhnt, 2000). Nos résultats montrent effectivement que les densités de faunes les plus fortes ont été relevées dans la polynie NOW, le détroit de Nares et la mer de Barents, où la productivité primaire est particulièrement importante. Le flux de matière organique qui en résulte favorise le développement d'espèces benthiques opportunistes, abondantes suite aux blooms phytoplanctoniques. *Cassidulina neoteretis*, une espèce typique de la masse d'eau atlantique (Mackensen et Hald, 1988 ; Carmack 1990 ; Jennings et Helgadottir, 1994 ; Steinsund et Hald, 1994 ; Lubinski et al., 2001 ; Rytter et al., 2002 ; Jennings et al., 2004), est souvent associée à des apports épisodiques de matière organique fraîche (Gooday et Lambshead, 1989). Dans notre étude, cette espèce est présente dans le premier centimètre des sédiments des stations proches du front polaire sur le plateau continental au nord de la mer de Barents et des stations situées sur la pente continentale influencée par la masse d'eau atlantique au nord de la mer de Chukchi, mais ici dans des proportions plus faibles. La présence, d'après nos résultats, de *Nonionella labradorica* dans les sédiments de la polynie NOW, du détroit de Nares, près du front polaire en mer de Barents ou encore sur le plateau continental de la mer de Chukchi, est conforme aux données de la littérature qui associent cette espèce à la production épisodique de phytodétritus frais dans les zones de haute productivité saisonnière (Hald et Steinsund, 1992 ; Rytter et al., 2002 ; Polyak et al., 2002). Nos données indiquent de plus que

N. labradorica s'adapte à des milieux faiblement oxygénés voire même anoxiques et colonise une part plus importante du sédiment que l'espèce *C. neoteretis*. Lorsque la matière organique est plus dégradée, d'autres espèces plus adaptées succèdent aux espèces opportunistes. *Melonis barleeanus*, endofaune intermédiaire, apparaît typique de milieux ayant bénéficiés d'un apport de matière organique important. Cette espèce a été identifiée en abondance dans nos échantillons de la baie de Baffin et sur le plateau continental de la mer de Barents, où les blooms phytoplanctoniques conséquents interviennent plus tôt dans la saison par rapport à la période d'échantillonnage. Les populations de foraminifères benthiques prélevées dans les milieux oligotrophes profonds et stables dans le cadre de notre étude présentent une diversité et une densité généralement plus faibles qu'au niveau des plateaux continentaux. Nos résultats confirment certaines préférences écologiques d'espèces de milieux profonds souvent utilisées dans le cadre de reconstitution paléoenvironnementales aux hautes latitudes boréales : *Cibicides wuellerstorfi* est largement dominante en Atlantique Nord (Mackensen et al., 1985) ; *Oridorsalis tenerus* est une espèce majeure des grands fonds arctiques que l'on retrouve aussi bien en Atlantique Nord que dans les bassins profonds de l'océan Arctique, où elle est associée à *I. tumidula* (Ishman et Foley, 1996 ; Husum et al., 2015). Les foraminifères benthiques agglutinés sont une composante importante des assemblages faunistiques en Arctique et sont largement présents dans nos échantillons, notamment en baie de Baffin et sur les plateaux continentaux des mers de Chukchi et Barents. Cependant, aucune espèce ne semble répondre de manière claire aux apports de matière organique par le biais de la production primaire. D'après plusieurs études, les foraminifères benthiques agglutinés ont de faibles exigences trophiques en termes de quantité et de qualité de la matière organique disponible et s'adapte très bien à tous types de milieux (Schmiedl et al., 1997 ; Kurbjeweit et al., 2000 ; Koho, 2008 ; Phipps et al., 2012).

V.2 Masses d'eau

Plusieurs masses d'eau aux caractéristiques bien définies circulent dans l'océan Arctique et les mers et bassins périphériques. Ces masses d'eau, via le transport de chaleur et de nutriments, conditionnent la dynamique de la banquise et la productivité primaire. Les études pionnières portant sur la distribution des foraminifères benthiques modernes en Arctique attribuaient un rôle majeur aux propriétés physico-chimiques des masses d'eau et à la bathymétrie (Streeter, 1973 ; Lagoe, 1977 ; Lohmann, 1978 ; Belanger et Streeter, 1980). Dans notre étude, les foraminifères benthiques vivants, bien que majoritairement contrôlés par la

quantité et la qualité de la matière organique issue de la production primaire, semblent présenter une distribution en lien avec les différentes masses d'eau.

Ainsi l'espèce *C. neoteretis* prolifère dans nos échantillons au niveau de la pente continentale de la mer de Chukchi et du plateau continental de la mer de Barents, régions fortement influencées par les eaux atlantiques respectivement intermédiaires ou de surface.

La masse d'eau plus froide et riche en nutriments d'origine Pacifique transportée depuis le détroit de Béring envahit les plateaux continentaux des mers arctiques dont la mer de Chukchi. Cette masse d'eau s'infiltré dans l'archipel arctique canadien et dans le détroit de Nares. Nos résultats indiquent que l'espèce *N. labradorica*, qui, comme *C. neoteretis*, répond aux apports de matière organique fraîche, a la particularité d'être associée à cette masse d'eau arctique d'origine pacifique puisque présente dans nos échantillons du plateau continental de la mer de Chukchi et dans du détroit de Nares, couloir d'écoulement de ces eaux froides depuis l'océan Arctique. Les espèces *N. labradorica* et *C. neoteretis* typiquement dépendantes des blooms phytoplanctoniques, se retrouvent associées dans nos échantillons prélevés à la verticale du front polaire hydrographique du nord de la mer de Barents, front formé par la confrontation des masses d'eau atlantique et arctique. L'espèce *Elphidium excavatum* subsp. *clavatum* présente dans notre étude sur le plateau continental de la mer de Chukchi et l'espèce agglutinée *Adercotryma glomerata* abondante dans le détroit de Nares et à l'ouest de la baie de Baffin semblent également associées à cette masse d'eau froide arctique.

Les masses d'eau profondes et froides de l'Atlantique Nord et de l'océan Arctique présentent des caractéristiques différentes notamment en termes de salinité. Nos résultats suggèrent une préférence de l'espèce *C. wuellerstorfi* pour la masse d'eau de fond de l'Atlantique Nord, plus salée que la masse d'eau de fond arctique. L'espèce *O. tenerus* s'adapte, d'après notre étude, à tous les environnements profonds. *I. tumidula* n'a été recensé dans notre travail qu'au niveau des bassins profonds arctiques, associée à *O. tenerus*, et ne se retrouve pas en majorité dans les environnements profonds de l'Atlantique Nord.

V.3 Dissolution des carbonates

Les foraminifères benthiques agglutinés sont largement présents dans les environnements arctiques notamment sur les plateaux continentaux (e.g., Scott et Vilks, 1991 ; Wollenburg et Kuhnt, 2000). Ainsi, plusieurs espèces agglutinées colonisent, d'après nos résultats, les trois régions étudiées et plus particulièrement le plateau continental de la mer de

Chukchi et l'essentiel de la baie de Baffin. Cette caractéristique des assemblages de foraminifères benthiques apparaît liée à la dissolution des carbonates engendrée par une forte teneur en CO₂ dissous dans les eaux interstitielles, à l'interface eau-sédiment (e.g., de Vernal et al., 1992 ; Steinsund et Hald, 1994). La fonte de la glace de mer favorise les échanges avec l'atmosphère ainsi que le développement de la productivité primaire. De plus, la solubilité du CO₂ est plus effective dans les eaux froides des hautes latitudes. Les eaux froides, denses et bien oxygénées qui circulent sur les fonds océaniques favorisent la dégradation de la matière organique, source d'une production supplémentaire de CO₂. Ces processus contribuent à l'acidification des eaux interstitielles les rendant corrosives et engendrant la dissolution partielle des carbonates dans les milieux soumis à un couvert de glace saisonnier. Dans ces conditions, l'environnement benthique devient défavorable au bon développement des espèces constituées d'un test carbonaté ou aragonitique. Nos résultats indiquent cependant que, malgré des conditions géochimiques à priori limitantes, certaines espèces calcaires, typiquement des endofaunes intermédiaires évoluant entre 1 et 3 cm de profondeur dans le sédiment, peuvent survivre et représenter une part importante des assemblages de foraminifères benthiques. Ainsi, des espèces telles que *Melonis barleeanus* observées vivant mais avec un test partiellement dissous dans la Baie de Baffin semble montrer une résistance à ces conditions corrosives grâce à l'incorporation de micro particules détritiques lors de la fabrication de leur test (Borrelli et al., 2018) conférant ainsi à cette espèce un intérêt particulier pour les reconstructions paléocéanographiques en domaine arctique.

V.4 Glace de mer

En Arctique, la glace de mer est une composante environnementale importante, fortement impactée par les variations climatiques. Les reconstructions paléoenvironnementales et paléoclimatiques en Arctique s'intéressent particulièrement à retracer les variations de la banquise. Schröder-Adams (1990) et Seidenkrantz (2013) ont étudié le potentiel des foraminifères benthiques comme proxies de glace de mer. Ces études montrent que les foraminifères benthiques apportent des informations sur les variations de glace de mer mais ne semble pas être un indicateur direct du couvert de banquise. De plus, aucune espèce ne peut être identifiée comme directement dépendante à la présence de glace de mer. La dynamique de la glace de mer influence la productivité primaire.

Nous avons montré que, pendant la période de retrait de la glace de mer en Arctique les blooms phytoplanctoniques se développaient dans les MIZ. Cette production primaire est

également importante au niveau des polynies. Les foraminifères benthiques répondent à ces apports de nourriture par une augmentation de densité de faunes et le développement d'espèces particulières. Dans les zones où la glace de mer est permanente et plus épaisse, plusieurs auteurs font état d'une densité faunistique beaucoup plus faible (e.g., Wollenburg et Mackensen, 1998a, 1998b ; Husum et al., 2015). De plus, la dominance des foraminifères benthiques agglutinés observée dans nos échantillons est expliquée par le caractère corrosif des masses d'eau, lié à l'absence de banquise. Ces foraminifères benthiques agglutinés dominent essentiellement sur les plateaux continentaux des mers Arctiques tandis que les zones arborant un couvert de glace permanent abritent des faunes calcaires, beaucoup moins impactée par les phénomènes de dissolution des carbonates.

L'association des assemblages de foraminifères benthiques avec d'autres proxies tels que les biomarqueurs (e.g., Belt and Müller, 2013) pourraient se révéler particulièrement efficace pour reconstruire les variations passées de glace de mer en Arctique.

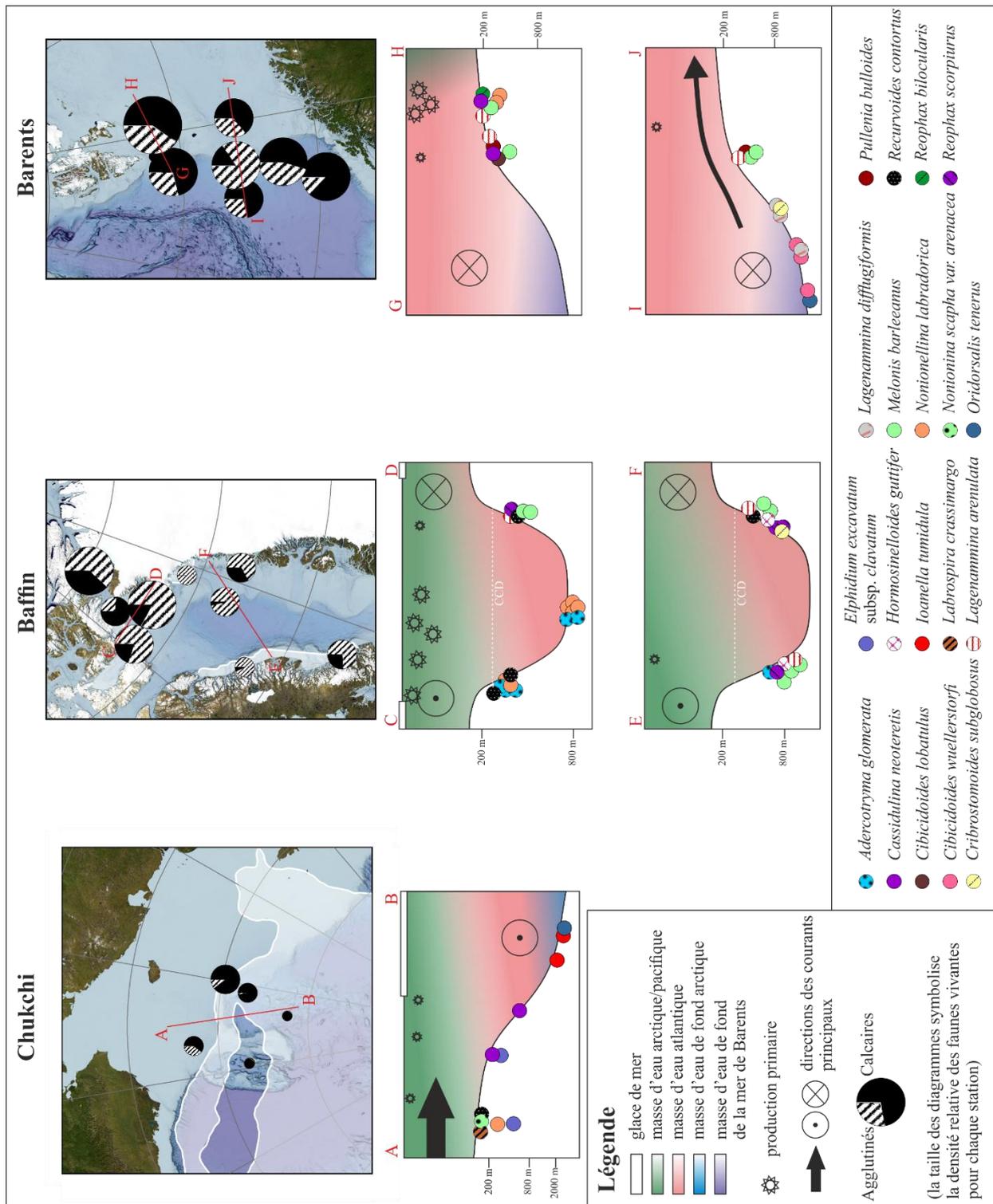


Figure V.1 : Figure synthétique des principaux résultats de l'étude. Les trois cartes présentent pour chaque station, la localisation, la proportion d'espèces de foraminifères benthiques vivants calcaires et agglutinées et la densité relative des faunes. La glace de mer moyenne en août 2015 en mer de Chukchi et en Juillet 2014 en de Baffin sont indiquées par les surfaces transparentes. Des coupes schématiques pour chaque zone s'étude montre la distribution verticale et géographique des foraminifères benthiques vivants dans les conditions environnementales estivales. Les schémas présentent la répartition des masses d'eau, la direction des courants principaux et informent sur la présence de banquise et l'intensité de la productivité primaire.

Perspectives

L'étude de l'écologie des foraminifères benthiques dans trois régions contrastées de l'Arctique, la mer de Chukchi, la baie de Baffin et la mer de Barents, a permis de rendre compte des disparités et des similitudes des assemblages de foraminifères benthiques vivants pendant la saison estivale. Ce travail de thèse a également contribué à mettre en évidence les facteurs d'influence de la distribution des foraminifères benthiques en Arctique. A l'issue de ce travail, de nouvelles investigations sont nécessaires afin de compléter les connaissances sur l'écologie des foraminifères benthiques en domaine arctique et leur utilisation en tant que proxies paléoclimatiques et paléoenvironnementaux.

➤ Estimer l'effet du patchiness (disparité faunistique ponctuelle dans le sédiment à faible échelle spatiale) sur les données faunistiques par la mise en œuvre d'une stratégie d'échantillonnage dédiée et l'étude de carottes répliques. Des carottes répliques ont été prélevés lors de ma mission MOCOSSED2014 en Mer de Barents. Par manque de temps, celles-ci n'ont pu être analysées mais devraient constituer une prochaine étape pour évaluer l'effet du patchiness dans cette zone. Egalement, à l'exception du premier centimètre dans les stations de la Mer de Chukchi, la fraction 63-125 μm n'a pas pu être analysée, pour les mêmes contraintes de temps. Même si les données de cette fraction dans la mer de Chukchi faisaient état de faunes très pauvres tant en densité qu'en diversité, il est très probable que cette fraction, qui regroupe des espèces typiques des zones arctiques et des eaux froides soit nettement plus fournie en baie de Baffin, détroit de Nares et mer de Barents.

➤ Confronter les données faunistiques à une gamme étendue de descripteurs de la matière organique (mesures dans le sédiment de la chlorophylle *a*, des phaeopigments et des acides aminés totaux et disponibles) pour déterminer sa qualité nutritive et son état de dégradation. En effet des études récentes ont montrées l'importance de la qualité de la matière organique sur la distribution des foraminifères benthiques (e.g., Goineau et al., 2011, Dessandier et al., 2015). Il serait également particulièrement intéressant de comparer des données sur le biomarqueurs lipidiques issus des diatomées notamment en zone marginale de glace et de polynies (e.g., Belt and Müller, 2013).

➤ Comparer les faunes vivantes (biocénoses) et mortes récentes (thanatocénoses) dans le but d'évaluer les variations saisonnières de densité et de diversité des espèces de foraminifères benthiques, ainsi que leur capacité de fossilisation notamment en ce qui concerne les espèces

Perspectives

agglutinées très présentes en Arctique. De plus il serait intéressant de réaliser des analyses MEB de l'espèce *Melonis barleeanus* pour tester si la présence de micro grains sédimentaires dans la matrice calcaire de son test (Borrelli et al., 2018) pourrait être lié au pH, ou la corrosivité de l'eau de fond. En effet on pourrait imaginer que l'incorporation de tels micro-grains sédimentaires comme un moyen de limiter la dissolution.

- Etendre cette étude aux autres régions arctiques et continuer d'alimenter les données dans les régions étudiées dans le cadre de cette thèse, notamment la mer de Chukchi où les informations sur les foraminifères benthiques sont très limitées.
- Développer les investigations à l'échelle annuelle et mettre en place une observation saisonnière des faunes vivantes dans un environnement soumis à d'importantes variations saisonnières en termes de productivité primaire, couvert de banquise, vitesse des courants, température etc., sur le modèle, par exemple de l'initiative norvégienne de monitoring des populations de foraminifères benthiques dans un fjord du Svalbard (Kongsfjord) - MOSJ (Environmental Monitoring of Svalbard and Jan Mayen), <http://www.mosj.no/en/>.
- Comparer sur la même période deux sites d'étude présentant un couvert de glace saisonnier et un couvert de glace permanent afin de mieux contraindre l'utilisation de certaines espèces de foraminifères benthiques comme proxies de glace de mer.
- Développer les études comparatives des foraminifères benthiques vivants actuels avec des bases de données plus anciennes concernant la même zone d'étude afin de rendre compte des évolutions environnementales, dans la lignée de l'étude de Saher et al. (2012) en mer de Barents.

Ce travail de thèse et cette liste de perspectives non-exhaustive soulignent l'importance des études sur les foraminifères benthiques en domaine arctique, région où les effets du changement climatique actuel sont particulièrement amplifiés.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

A

- Aagaard, K. (1989). A synthesis of the Arctic Ocean circulation. *Le Conseil*.
- Aagaard, K., Carmack, E. C. (1989). The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C10), 14485-14498.
- Aagaard, K., Swift, J. H., Carmack, E. C. (1985). Thermohaline circulation in the Arctic Mediterranean seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C3), 4833-4846.
- Agatova, A. I., Arzhanova, N. V., Torgunova, N. I. (1999). Organic matter of the Bering Sea. *Dynamics of the Bering Sea*. PICES, University of Alaska Fairbanks, Alaska, 261-283.
- Aksu, A. E. (1983). Holocene and Pleistocene dissolution cycles in deep-sea cores of Baffin Bay and Davis Strait: Palaeoceanographic implications. *Marine Geology*, 53(4), 331-348.
- Aksu, A. E., Piper, D. J. (1979). Baffin Bay in the past 100,000 yr. *Geology*, 7(5), 245-248.
- Altabet, M. A., Francois, R. (1994). Sedimentary nitrogen isotopic ratio as a recorder for surface ocean nitrate utilization. *Global biogeochemical cycles*, 8(1), 103-116.
- AMAP, A. (1998). Assessment report: Arctic pollution issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway, 12, 859.
- Arrigo, K. R., Van Dijken, G. L. (2015). Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Progress in Oceanography*, 136, 60-70.
- Arrigo, K. R., Perovich, D. K., Pickart, R. S., Brown, Z. W., van Dijken, G. L., Lowry, K. E., et al. (2014). Phytoplankton blooms beneath the sea ice in the Chukchi Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 105, 1-16.
- Arrigo, K. R., Perovich, D. K., Pickart, R. S., Brown, Z. W., Van Dijken, G. L., Lowry, K. E., et al. (2012). Massive phytoplankton blooms under Arctic sea ice. *Science*, 1215065.
- Årthun, M., Eldevik, T., Smedsrud, L. H., Skagseth, Ø., Ingvaldsen, R. B. (2012). Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat. *Journal of Climate*, 25(13), 4736-4743.

B

- Bahr, A., Jiménez-Espejo, F. J., Kolasinac, N., Grunert, P., Hernández-Molina, F. J., Röhl, U., et al. (2014). Deciphering bottom current velocity and paleoclimate signals from contourite deposits in the Gulf of Cádiz during the last 140 kyr: An inorganic geochemical approach. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(8), 3145-3160.
- Bailey, W. B. (1957). Oceanographic features of the Canadian Archipelago. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 14(5), 731-769.
- Baker, S. R., Friedman, G. (1973). Sedimentation in an Arctic marine environment: Baffin Bay between Greenland and the Canadian Arctic Archipelago, in *Earth science symposium on offshore eastern Canada: Geological Survey of Canada Paper 71-23*, 471-498.
- Barber, D. G., Hanesiak, J. M., Chan, W., Piwowar, J. (2001). Sea- ice and meteorological conditions in Northern Baffin Bay and the North Water polynya between 1979 and 1996. *Atmosphere-Ocean*, 39(3), 343-359.

Références bibliographiques

- Barton, B. I., Lenn, Y. D., Lique, C. (2018). Observed Atlantification of the Barents Sea Causes the Polar Front to Limit the Expansion of Winter Sea Ice. *Journal of Physical Oceanography*, 48(8), 1849-1866.
- Bates, N. R. (2006). Air- sea CO₂ fluxes and the continental shelf pump of carbon in the Chukchi Sea adjacent to the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C10).
- Bates, N. R., Mathis, J. T. (2009). The Arctic Ocean marine carbon cycle: evaluation of air-sea CO₂ exchanges, ocean acidification impacts and potential feedbacks. *Biogeosciences*, 6(11), 2433-2459.
- Bates, N. R., Best, M. H., Hansell, D. A. (2005). Spatio-temporal distribution of dissolved inorganic carbon and net community production in the Chukchi and Beaufort Seas. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(24-26), 3303-3323.
- Bates, N. R., Garley, R., Frey, K. E., Shake, K. L., Mathis, J. T. (2014). Sea-ice melt CO₂-carbonate chemistry in the western Arctic Ocean: meltwater contributions to air-sea CO₂ gas exchange, mixed-layer properties and rates of net community production under sea ice. *Biogeosciences*, 11(23), 6769-6789.
- Bates, N. R., Mathis, J. T., Cooper, L. W. (2009). Ocean acidification and biologically induced seasonality of carbonate mineral saturation states in the western Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C11).
- Bates, N. R., Moran, S. B., Hansell, D. A., Mathis, J. T. (2006). An increasing CO₂ sink in the Arctic Ocean due to sea- ice loss. *Geophysical Research Letters*, 33(23).
- Belanger, P. E., Streeter, S. S. (1980). Distribution and ecology of benthic foraminifera in the Norwegian-Greenland Sea. *Marine Micropaleontology*, 5, 401-428.
- Bélanger, S., Babin, M., Tremblay, J. É. (2013). Increasing cloudiness in Arctic damps the increase in phytoplankton primary production due to sea ice receding. *Biogeosciences*, 10(6), 4087.
- Belkin, I. M., Levitus, S., Antonov, J., Malmberg, S. A. (1998). "Great salinity anomalies" in the North Atlantic. *Progress in Oceanography*, 41(1), 1-68.
- Belt, S. T., Müller, J. (2013). The Arctic sea ice biomarker IP25: a review of current understanding, recommendations for future research and applications in palaeo sea ice reconstructions. *Quaternary Science Reviews*, 79, 9-25.
- Bergeron, M., Tremblay, J. É. (2014). Shifts in biological productivity inferred from nutrient drawdown in the southern Beaufort Sea (2003–2011) and northern Baffin Bay (1997–2011), Canadian Arctic. *Geophysical Research Letters*, 41(11), 3979-3987.
- Bergsten, H. (1994). Recent benthic foraminifera of a transect from the North Pole to the Yermak Plateau, eastern central Arctic Ocean. *Marine Geology*, 119(3-4), 251-267.
- Bernhard, J. M. (2003). Potential symbionts in bathyal foraminifera. *Science*, 299(5608), 861-861.
- Bernhard, J. M., Ostermann, D. R., Williams, D. S., Blanks, J. K. (2006). Comparison of two methods to identify live benthic foraminifera: A test between Rose Bengal and CellTracker Green with implications for stable isotope paleoreconstructions. *Paleoceanography*, 21(4).

Références bibliographiques

- Blais, M., Ardyna, M., Gosselin, M., Dumont, D., Bélanger, S., Tremblay, J. É., et al. (2017). Contrasting interannual changes in phytoplankton productivity and community structure in the coastal Canadian Arctic Ocean. *Limnology and Oceanography*, 62(6), 2480-2497.
- Blindheim, J. (1989). Cascading of Barents Sea bottom water into the Norwegian Sea. *Rapp. PV Reun. Cons. Int. Explor. Mer*, 188, 49-58.
- Bönisch, G., Schlosser, P. (1995). Deep water formation and exchange rates in the Greenland/Norwegian Seas and the Eurasian Basin of the Arctic Ocean derived from tracer balances. *Progress in Oceanography*, 35(1), 29-52.
- Borrelli, C., Panieri, G., Dahl, T. M., Neufeld, K. (2018). Novel biomineralization strategy in calcareous foraminifera. *Scientific reports*, 8(1), 10201.
- Bubenshchikova, N., Nürnberg, D., Lembke-Jene, L., Pavlova, G. (2008). Living benthic foraminifera of the Okhotsk Sea: Faunal composition, standing stocks and microhabitats. *Marine Micropaleontology*, 69(3-4), 314-333.
- Burgers, T. M., Miller, L. A., Thomas, H., Else, B. G. T., Gosselin, M., Papakyriakou, T. (2017). Surface Water pCO₂ Variations and Sea- Air CO₂ Fluxes During Summer in the Eastern Canadian Arctic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(12), 9663-9678.
- Bussmann, I., Kattner, G. (2000). Distribution of dissolved organic carbon in the central Arctic Ocean: the influence of physical and biological properties. *Journal of marine systems*, 27(1-3), 209-219.
- Buzas, M. A., Gibson, T. G. (1969). Species diversity: benthonic foraminifera in western North Atlantic. *Science*, 163(3862), 72-75.

C

- Carmack EC (1990) Large-scale physical oceanography of Polar Oceans. In: Smith WO (ed) *Polar Oceanography Part A*. Academic Press, San Diego, pp 171–212
- Caulle, C., Koho, K. A., Mojtahid, M., Reichart, G. J., Jorissen, F. J. (2014). Live (Rose Bengal stained) foraminiferal faunas from the northern Arabian Sea: faunal succession within and below the OMZ. *Biogeosciences*, 11(4), 1155-1175.
- Cauwet, G., Sempere, R., Saliot, A. (1990). Carbone organique dissous dans l'eau de mer: confirmation de la sous-estimation antérieure. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 311(9), 1061-1066.
- Cedhagen, T. (1991). Retention of chloroplasts and bathymetric distribution in the sublittoral foraminiferan *Nonionellina labradorica*. *Ophelia*, 33(1), 17-30.
- Chen, L., Gao, Z. (2007). Spatial variability in the partial pressures of CO₂ in the northern Bering and Chukchi seas. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(23-26), 2619-2629.
- Chierici, M., Fransson, A. (2009). Calcium carbonate saturation in the surface water of the Arctic Ocean: undersaturation in freshwater influenced shelves. *Biogeosciences*, 6(11), 2421-2431.
- Coachman, L. K., Aagaard, K. (1974). Physical oceanography of Arctic and subarctic seas. In *Marine geology and oceanography of the Arctic seas* (pp. 1-72). Springer, Berlin, Heidelberg.

Références bibliographiques

- Coachman, L. K., Coachman, L. K., Aagaard, K., Tripp, R. B. (1975). Bering Strait: the regional physical oceanography. University of Washington Press.
- Comiso, J. C. (2002). A rapidly declining perennial sea ice cover in the Arctic. *Geophysical Research Letters*, 29(20), 17-1.
- Comiso, J. C. (2012). Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover. *Journal of Climate*, 25(4), 1176-1193.
- Comiso, J. C., Parkinson, C. L., Gersten, R., Stock, L. (2008). Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophysical research letters*, 35(1).
- Corliss, B. H. (1985). Microhabitats of benthic foraminifera within deep-sea sediments. *Nature*, 314(6010), 435.
- Corliss, B. H. (1991). Morphology and microhabitat preferences of benthic foraminifera from the northwest Atlantic Ocean. *Marine micropaleontology*, 17(3-4), 195-236.
- Coupel, P., Ruiz-Pino, D., Sicre, M. A., Chen, J. F., Lee, S. H., Schiffrine, N., et al. (2015). The impact of freshening on phytoplankton production in the Pacific Arctic Ocean. *Progress in Oceanography*, 131, 113-125.
- Cuny, J., Rhines, P. B., Kwok, R. (2005). Davis Strait volume, freshwater and heat fluxes. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 52(3), 519-542.

D

-
- Darby, D. A., Ortiz, J., Polyak, L., Lund, S., Jakobsson, M., Woodgate, R. A. (2009). The role of currents and sea ice in both slowly deposited central Arctic and rapidly deposited Chukchi–Alaskan margin sediments. *Global and Planetary Change*, 68(1-2), 58-72.
- De Vernal, A., Bilodeau, G., Hillaire-Marcel, C., Kassou, N. (1992). Quantitative assessment of carbonate dissolution in marine sediments from foraminifer linings vs. shell ratios: Davis Strait, northwest North Atlantic. *Geology*, 20(6), 527-530.
- De Vernal, A., Hillaire- Marcel, C., Darby, D. A. (2005). Variability of sea ice cover in the Chukchi Sea (western Arctic Ocean) during the Holocene. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 20(4).
- Denton, G. H., Broecker, W. S. (2008). Wobbly ocean conveyor circulation during the Holocene?. *Quaternary Science Reviews*, 27(21-22), 1939-1950.
- Dessandier, P. A., Bonnin, J., Kim, J. H., Racine, C. (2018). Comparison of living and dead benthic foraminifera on the Portuguese margin: Understanding the taphonomical processes. *Marine Micropaleontology*, 140, 1-16.
- Dessandier, P. A., Bonnin, J., Kim, J. H., Bichon, S., Deflandre, B., Grémare, A., Sinninghe Damsté, J. S. (2016). Impact of organic matter source and quality on living benthic foraminiferal distribution on a river- dominated continental margin: A study of the Portuguese margin. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(6), 1689-1714.
- Dessandier, P. A., Bonnin, J., Kim, J. H., Bichon, S., Grémare, A., Deflandre, B., et al. (2015). Lateral and vertical distributions of living benthic foraminifera off the Douro River (western Iberian margin): Impact of the organic matter quality. *Marine Micropaleontology*, 120, 31-45.

Références bibliographiques

- Dijkstra, N., Junttila, J., Aagaard-Sørensen, S. (2017). Environmental baselines and reconstruction of Atlantic Water inflow in Bjørnøyrænna, SW Barents Sea, since 1800 CE. *Marine environmental research*, 132, 117-131.
- Dijkstra, N., Junttila, J., Husum, K., Carroll, J., Hald, M. (2015). Natural variability of benthic foraminiferal assemblages and metal concentrations during the last 150 years in the Ingøydjupet trough, SW Barents Sea. *Marine Micropaleontology*, 121, 16-31.
- Divine, D. V., Dick, C. (2006). Historical variability of sea ice edge position in the Nordic Seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C1).

E

- Ehleringer, J. R. (1979). Photosynthesis and photorespiration: biochemistry, physiology, and ecological implications. *HortScience*, 14, 217-222.

F

- Farrell, J. W., Pedersen, T. F., Calvert, S. E., Nielsen, B. (1995). Glacial-interglacial changes in nutrient utilization in the equatorial Pacific Ocean. *Nature*, 377(6549), 514.
- Fatela, F., Taborda, R. (2002). Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages. *Marine Micropaleontology*, 45(2), 169-174.
- Fetterer F, Knowles K, Meier W, Savoie M, Windnagel AK (2016) updated daily. Sea Ice Index, Version 2. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado USA. National Snow and Ice Data Center, Boulder
- Fontanier, C., Jorissen, F. J., Lansard, B., Mouret, A., Buscail, R., Schmidt, S., et al. (2008). Live foraminifera from the open slope between Grand Rhône and Petit Rhône canyons (Gulf of Lions, NW Mediterranean). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 55(11), 1532-1553.
- Fontanier, C., Jorissen, F. J., Licari, L., Alexandre, A., Anschutz, P., Carbonel, P. (2002). Live benthic foraminiferal faunas from the Bay of Biscay: faunal density, composition, and microhabitats. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 49(4), 751-785.
- Fortier, L., Fortier, M., Fukuchi, M., Barber, D., Gratton, Y., Legendre, L., et al. (2001). The International North Water Polynya Study (NOW): A progress report (scientific note).
- Francis, R. C., Hare, S. R., Hollowed, A. B., Wooster, W. S. (1998). Effects of interdecadal climate variability on the oceanic ecosystems of the NE Pacific. *Fisheries Oceanography*, 7(1), 1-21.
- François, R., Altabet, M. A., Burckle, L. H. (1992). Glacial to interglacial changes in surface nitrate utilization in the Indian sector of the Southern Ocean as recorded by sediment $\delta^{15}\text{N}$. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 7(5), 589-606.
- Fransson, A., Chierici, M., Nojiri, Y. (2009). New insights into the spatial variability of the surface water carbon dioxide in varying sea ice conditions in the Arctic Ocean. *Continental Shelf Research*, 29(10), 1317-1328.

G

- Giraudeau, J., Hulot, V., Hanquiez, V., Devaux, L., Howa, H., Garlan, T. (2016). A survey of the summer coccolithophore community in the western Barents Sea. *Journal of Marine Systems*, 158, 93-105.
- Goineau, A., Fontanier, C., Jorissen, F. J., Lansard, B., Buscail, R., Mouret, A., et al. (2011). Live (stained) benthic foraminifera from the Rhône prodelta (Gulf of Lion, NW Mediterranean): Environmental controls on a river-dominated shelf. *Journal of Sea Research*, 65(1), 58-75.
- Goineau, A., Fontanier, C., Jorissen, F., Buscail, R., Kerhervé, P., Cathalot, C., et al. (2012). Temporal variability of live (stained) benthic foraminiferal faunas in a river-dominated shelf—Faunal response to rapid changes of the river influence (Rhône prodelta, NW Mediterranean). *Biogeosciences*, 9(4), 1367-1388.
- Gooday, A. J. (2003). Benthic foraminifera (Protista) as tools in deep-water palaeoceanography: environmental influences on faunal characteristics.
- Gooday, A. J., Lamshead, P. J. D. (1989). Influence of seasonally deposited phytodetritus on benthic foraminiferal populations in the bathyal northeast Atlantic: the species response. *Marine Ecology Progress Series*, 53-67.
- Gosselin, M., Levasseur, M., Wheeler, P. A., Horner, R. A., Booth, B. C. (1997). New measurements of phytoplankton and ice algal production in the Arctic Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 44(8), 1623-1644.
- Gradinger, R. (1999). Vertical fine structure of the biomass and composition of algal communities in Arctic pack ice. *Marine Biology*, 133(4), 745-754.
- Grebmeier, J. M., Barry, J. P. (1991). The influence of oceanographic processes on pelagic-benthic coupling in polar regions: a benthic perspective. *Journal of Marine Systems*, 2(3-4), 495-518.
- Grebmeier, J. M., Overland, J. E., Moore, S. E., Farley, E. V., Carmack, E. C., Cooper, L. W., et al. (2006). A major ecosystem shift in the northern Bering Sea. *Science*, 311(5766), 1461-1464.
- Green, K. E. (1960). Ecology of some Arctic foraminifera. *Micropaleontology*, 6(1), 57-78.
- Gupta, B. K. S. (1999). Systematics of moder Foraminifera. In *Modern foraminifera* (pp. 7-36). Springer, Dordrecht.

H

- Häkkinen, S. (1999). A simulation of thermohaline effects of a great salinity anomaly. *Journal of Climate*, 12(6), 1781-1795.
- Hald, M., Korsun, S. (1997). Distribution of modern benthic foraminifera from fjords of Svalbard, European Arctic. *The Journal of Foraminiferal Research*, 27(2), 101-122.
- Hald, M., Steinsund, P. I. (1992). Distribution of surface sediment benthic foraminifera in the southwestern Barents Sea. *The Journal of Foraminiferal Research*, 22(4), 347-362.
- Hald, M., Steinsund, P. I. (1996). Benthic foraminifera and carbonate dissolution in the surface sediments of the Barents and Kara Seas. *Berichte zur Polarforschung*, 212, 285-307.

Références bibliographiques

- Hamel, D., de Vernal, A., Gosselin, M., Hillaire-Marcel, C. (2002). Organic-walled microfossils and geochemical tracers: sedimentary indicators of productivity changes in the North Water and northern Baffin Bay during the last centuries. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(22-23), 5277-5295.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis *Palaeontol. Electronica* 4: 1–9.
- Hare, S. R., Mantua, N. J. (2000). Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Progress in oceanography*, 47(2-4), 103-145.
- Hill, V., Cota, G. (2005). Spatial patterns of primary production on the shelf, slope and basin of the Western Arctic in 2002. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(24-26), 3344-3354.
- Hobson, K. A., Welch, H. E. (1992). Determination of trophic relationships within a high Arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 9-18.
- Hobson, K. A., Ambrose Jr, W. G., Renaud, P. E. (1995). Sources of primary production, benthic-pelagic coupling, and trophic relationships within the Northeast Water Polynya: insights from $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 128, 1-10.
- Hunt Jr, G. L., Blanchard, A. L., Boveng, P., Dalpadado, P., Drinkwater, K. F., Eisner, L., et al. (2013). The Barents and Chukchi Seas: comparison of two Arctic shelf ecosystems. *Journal of Marine Systems*, 109, 43-68.
- Hunt, A. S., Corliss, B. H. (1993). Distribution and microhabitats of living (stained) benthic foraminifera from the Canadian Arctic Archipelago. *Marine Micropaleontology*, 20(3-4), 321-345.
- Husum, K., Hald, M., Stein, R., Weißschnur, M. (2015). Recent benthic foraminifera in the Arctic Ocean and Kara Sea continental margin. *arktos*, 1(1), 5.

I

- Ingram, R. G., Bâcle, J., Barber, D. G., Gratton, Y., Melling, H. (2002). An overview of physical processes in the North Water. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(22-23), 4893-4906.
- Ishman, S. E., Foley, K. M. (1996). Modern benthic foraminifer distribution in the Amerasian Basin, Arctic Ocean. *Micropaleontology*, 42(2), 206-216.
- Ivanova, E. V., Ovsepyan, E. A., Risebrobakken, B., Vetrov, A. A. (2008). Downcore distribution of living calcareous foraminifera and stable isotopes in the western Barents Sea. *The Journal of Foraminiferal Research*, 38(4), 337-356.

J

- Jakobsson, M. (2002). Hypsometry and volume of the Arctic Ocean and its constituent seas. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(5), 1-18.
- Jakobsson, M., Mayer, L., Coakley, B., Dowdeswell, J. A., Forbes, S., Fridman, B., et al. (2012). The international bathymetric chart of the Arctic Ocean (IBCAO) version 3.0. *Geophysical Research Letters*, 39(12).

Références bibliographiques

- Jasper, J. P., Hayes, J. M. (1990). A carbon isotope record of CO₂ levels during the late Quaternary. *Nature*, 347(6292), 462.
- Jennings, A. E., Helgadottir, G. (1994). Foraminiferal assemblages from the fjords and shelf of eastern Greenland. *The Journal of Foraminiferal Research*, 24(2), 123-144.
- Jennings, A. E., Weiner, N. J., Helgadottir, G., Andrews, J. T. (2004). Modern foraminiferal faunas of the southwestern to northern Iceland shelf: oceanographic and environmental controls. *The Journal of Foraminiferal Research*, 34(3), 180-207.
- Jennings, A., Andrews, J., Wilson, L. (2011). Holocene environmental evolution of the SE Greenland Shelf North and South of the Denmark Strait: Irminger and East Greenland current interactions. *Quaternary Science Reviews*, 30(7-8), 980-998.
- Jensen, H. M., Pedersen, L., Burmeister, A., Hansen, B. W. (1999). Pelagic primary production during summer along 65 to 72 N off West Greenland. *Polar Biology*, 21(5), 269-278.
- Jernas, P., Klitgaard-Kristensen, D., Husum, K., Koç, N., Tverberg, V., Loubere, P., et al. (2018). Annual changes in Arctic fjord environment and modern benthic foraminiferal fauna: Evidence from Kongsfjorden, Svalbard. *Global and Planetary Change*, 163, 119-140.
- Johannessen, O. M., Bengtsson, L., Miles, M. W., Kuzmina, S. I., Semenov, V. A., Alekseev, G. V., et al. (2004). Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 56(4), 328-341.
- Jones, E. P., Anderson, L. G. (1986). On the origin of the chemical properties of the Arctic Ocean halocline. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C9), 10759-10767.
- Jones, E. P., Levy, E. M. (1981). Oceanic CO₂ increase in Baffin Bay. *Journal of marine research*.
- Jorissen, F. J., de Stigter, H. C., Widmark, J. G. (1995). A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. *Marine micropaleontology*, 26(1-4), 3-15.
- Jorissen, F. J., Fontanier, C., Thomas, E. (2007). Chapter seven paleoceanographical proxies based on deep-sea benthic foraminiferal assemblage characteristics. *Developments in Marine Geology*, 1, 263-325.

K

-
- Kagan, B. A., Sofina, E. V. (2014). Surface and internal semidiurnal tides and tidally induced diapycnal diffusion in the Barents Sea: a numerical study. *Continental Shelf Research*, 91, 158-170.
- Kiyko, O. A., Pogrebov, V. B. (1997). Long-term benthic population changes (1920–1930s-Present) in the Barents and Kara Seas. *Marine pollution bulletin*, 35(7-12), 322-332.
- Klein, B., LeBlanc, B., Mei, Z. P., Beret, R., Michaud, J., Mundy, C. J., et al. (2002). Phytoplankton biomass, production and potential export in the North Water. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(22-23), 4983-5002.
- Kliem, N., Greenberg, D. A. (2003). Diagnostic simulations of the summer circulation in the Canadian Arctic Archipelago. *Atmosphere-ocean*, 41(4), 273-289.
- Knies, J., Martinez, P. (2009). Organic matter sedimentation in the western Barents Sea region: Terrestrial and marine contribution based on isotopic composition and organic nitrogen content. *Norwegian Journal of Geology/Norsk Geologisk Forening*, 89.

Références bibliographiques

- Knudsen, K. L., Stabell, B., Seidenkrantz, M. S., Eiriksson, J., Blake Jr, W. (2008). Deglacial and Holocene conditions in northernmost Baffin Bay: sediments, foraminifera, diatoms and stable isotopes. *Boreas*, 37(3), 346-376.
- Koho, K. A., García, R., De Stigter, H. C., Epping, E., Koning, E., Kouwenhoven, T. J., Van der Zwaan, G. J. (2008). Sedimentary labile organic carbon and pore water redox control on species distribution of benthic foraminifera: A case study from Lisbon–Setúbal Canyon (southern Portugal). *Progress in Oceanography*, 79(1), 55-82.
- Koho, K. A., Kouwenhoven, T. J., De Stigter, H. C., Van Der Zwaan, G. J. (2007). Benthic foraminifera in the Nazaré Canyon, Portuguese continental margin: Sedimentary environments and disturbance. *Marine Micropaleontology*, 66(1), 27-51.
- Korsun, S., Hald, M. (2000). Seasonal dynamics of benthic foraminifera in a glacially fed fjord of Svalbard, European Arctic. *The Journal of Foraminiferal Research*, 30(4), 251-271.
- Kravitz, J. H. (1976). Textural and mineralogical characteristics of the surficial sediments of Kane Basin. *Journal of Sedimentary Research*, 46(3), 710-725.
- Kurbjeweit, F., Schmiidl, G., Schiebel, R., Hemleben, C., Pfannkuche, O., Wallmann, K., Schäfer, P. (2000). Distribution, biomass and diversity of benthic foraminifera in relation to sediment geochemistry in the Arabian Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(14), 2913-2955.
- Kwok, R., Toudal Pedersen, L., Gudmandsen, P., Pang, S. S. (2010). Large sea ice outflow into the Nares Strait in 2007. *Geophysical Research Letters*, 37(3).

L

- Laberg, J. S., Vorren, T. O. (1995). Late Weichselian submarine debris flow deposits on the Bear Island Trough mouth fan. *Marine Geology*, 127(1-4), 45-72.
- Lagoe MB (1977) Recent benthic foraminifera from the central Arctic Ocean. *J Foraminifer Res* 7(2):106–129
- Lagoe, M. B. (1979). Recent benthonic foraminiferal biofacies in the Arctic Ocean. *Micropaleontology*, 214-224.
- Lazar, K. B., Polyak, L. (2016). Pleistocene benthic foraminifers in the Arctic Ocean: Implications for sea-ice and circulation history. *Marine Micropaleontology*, 126, 19-30.
- Lee, J. J., Morales, J., Symons, A., Hallock, P. (1995). Diatom symbionts in larger foraminifera from Caribbean hosts. *Marine Micropaleontology*, 26(1-4), 99-105.
- Lewis, E. L., Ponton, D., Legendre, L., Leblanc, B. (1996). Springtime sensible heat, nutrients and phytoplankton in the Northwater Polynya, Canadian Arctic. *Continental Shelf Research*, 16(14), 1775-1792.
- Licari, L. N., Schumacher, S., Wenzhofer, F., Zabel, M., Mackensen, A. (2003). Communities and microhabitats of living benthic foraminifera from the tropical east Atlantic: impact of different productivity regimes. *The Journal of Foraminiferal Research*, 33(1), 10-31.
- Lind, S., Ingvaldsen, R. B. (2012). Variability and impacts of Atlantic Water entering the Barents Sea from the north. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 62, 70-88.

Références bibliographiques

- Linke, P., Lutze, G. F. (1993). Microhabitat preferences of benthic foraminifera—a static concept or a dynamic adaptation to optimize food acquisition? *Marine micropaleontology*, 20(3-4), 215-234.
- Lloyd, J. M. (2006). Modern distribution of benthic foraminifera from Disko Bugt, West Greenland. *Journal of Foraminiferal Research*, 36(4), 315-331.
- Loeblich Jr, A. R., Tappan, H. (1988). Foraminiferal genera and their classification. 970 p., 847 pls.
- Loeng, H. (1991). Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea. *Polar research*, 10(1), 5-18.
- Loeng, H., Drinkwater, K. (2007). An overview of the ecosystems of the Barents and Norwegian Seas and their response to climate variability. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(23-26), 2478-2500.
- Loeng, H., Brander, K., Carmack, E., Denisenko, S., Drinkwater, K., Hansen, B., et al. (2005). Marine systems. *Arctic climate impact assessment*, 453-538.
- Lohmann, G. P. (1978). Abyssal benthonic foraminifera as hydrographic indicators in the western South Atlantic Ocean. *The Journal of Foraminiferal Research*, 8(1), 6-34.
- Longet, D., Pawlowski, J. (2007). Higher-level phylogeny of Foraminifera inferred from the RNA polymerase II (RPB1) gene. *European journal of protistology*, 43(3), 171-177.
- Loubere, P., Jacobsen, B., Kristensen, D. K., Husum, K., Jernas, P., Richaud, M. (2011). The structure of benthic environments and the paleochemical record of foraminifera. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 58(5), 535-545.
- Lubinski, D. J., Polyak, L., Forman, S. L. (2001). Freshwater and Atlantic water inflows to the deep northern Barents and Kara seas since ca 13 14C ka.: foraminifera and stable isotopes. *Quaternary Science Reviews*, 20(18), 1851-1879.

M

- Macdonald, R. W., Sakshaug, E., Stein, R. (2004). The Arctic Ocean: Modern status and recent climate change. In: Stein, R. and Macdonald, RW (Eds.), *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Springer-Verlag, Berlin (pp. 6-21).
- Mackensen, A., Hald, M. (1988). *Cassidulina teretis* Tappan and *C. laevigata* d'Orbigny; their modern and late Quaternary distribution in northern seas. *The Journal of Foraminiferal Research*, 18(1), 16-24.
- Mackensen, A., Sejrup, H. P., Jansen, E. (1985). The distribution of living benthic foraminifera on the continental slope and rise off southwest Norway. *Marine Micropaleontology*, 9(4), 275-306.
- Marchese, C., Albouy, C., Tremblay, J. É., Dumont, D., D'Ortenzio, F., Vissault, S., Bélanger, S. (2017). Changes in phytoplankton bloom phenology over the North Water (NOW) polynya: A response to changing environmental conditions. *Polar Biology*, 40(9), 1721-1737.
- Marlowe, J., Vilks, G. (1963). *Marine Geology, Eastern Part of Prince Gustav Adolf Sea, District of Franklin-Polar Continental Shelf Project*. Geological Survey of Canada,

Références bibliographiques

- Martin, J., Tremblay, J. É., Price, N. M. (2012). Nutritive and photosynthetic ecology of subsurface chlorophyll maxima in Canadian Arctic waters. *Biogeosciences*, 9(12), 5353-5371.
- Maslanik, J., Stroeve, J., Fowler, C., Emery, W. (2011). Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011. *Geophysical Research Letters*, 38(13).
- McRoy CP (1993) ISHTAR, the project: an overview of Inner Shelf Transfer and Recycling in the Bering and Chukchi seas. *Cont Shelf Res* 13(5–6):473–479
- Mei, Z. P., Legendre, L., Gratton, Y., Tremblay, J. E., LeBlanc, B., Mundy, C. J., et al. (2002). Physical control of spring–summer phytoplankton dynamics in the North Water, April–July 1998. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(22-23), 4959-4982.
- Melling, H. (2000). Exchanges of freshwater through the shallow straits of the North American Arctic. In *The freshwater budget of the Arctic Ocean* (pp. 479-502). Springer, Dordrecht.
- Melling, H., Gratton, Y., Ingram, G. (2001). Ocean circulation within the North Water polynya of Baffin Bay. *Atmosphere-Ocean*, 39(3), 301-325.
- Melling, H., Lake, R. A., Topham, D. R., Fissel, D. B. (1984). Oceanic thermal structure in the western Canadian Arctic. *Continental Shelf Research*, 3(3), 233-258.
- Meyers, P. A. (1994). Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical geology*, 114(3-4), 289-302.
- Midttun, L. (1985). Formation of dense bottom water in the Barents Sea. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 32(10), 1233-1241.
- Møller, H. S., Jensen, K. G., Kuijpers, A., Aagaard-Sørensen, S., Seidenkrantz, M. S., Prins, M., et al. (2006). Late-Holocene environment and climatic changes in Ameralik Fjord, southwest Greenland: evidence from the sedimentary record. *The Holocene*, 16(5), 685-695.
- Monitoring, A. (1998). AMAP assessment report: Arctic pollution issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP),.
- Moore, C. M., Mills, M. M., Arrigo, K. R., Berman-Frank, I., Bopp, L., Boyd, P. W., et al. (2013). Processes and patterns of oceanic nutrient limitation. *Nature geoscience*, 6(9), 701.
- Morata, N., Renaud, P. E. (2008). Sedimentary pigments in the western Barents Sea: A reflection of pelagic–benthic coupling?. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(20-21), 2381-2389.
- Mørk, A., Vigran, J. O., Hochuli, P. A. (1990). Geology and palynology of the Triassic succession of Bjørnøya. *Polar Research*, 8(2), 141-163.
- Morozov, E. G., Pisarev, S. V., Neiman, V. G., & Erofeeva, S. Y. (2003, October). Internal tidal waves in the Barents Sea. In *DOKLADY EARTH SCIENCES C/C OF DOKLADY- AKADEMIIA NAUK* (Vol. 392, pp. 1124-1126). INTERPERIODICA PUBLISHING.
- Mudie, P. J., Rochon, A., Prins, M. A., Soenarjo, D., Troelstra, S. R., Levac, E., et al. (2006). Late Pleistocene-Holocene marine geology of Nares Strait region: palaeoceanography from foraminifera and dinoflagellate cysts, sedimentology and stable isotopes. *Polarforschung*, 74(1-3), 169-183.

Références bibliographiques

- Münchow, A., Falkner, K. K., Melling, H. (2007). Spatial continuity of measured seawater and tracer fluxes through Nares Strait, a dynamically wide channel bordering the Canadian Archipelago. *Journal of Marine Research*, 65(6), 759-788.
- Münchow, A., Melling, H., Falkner, K. K. (2006). An observational estimate of volume and freshwater flux leaving the Arctic Ocean through Nares Strait. *Journal of Physical Oceanography*, 36(11), 2025-2041.
- Mundy, C., Gosselin, M., Nozais, C., Simard, M. (2009). Characterization of bottom ice algal and detrital spectral absorption properties in first-year sea ice of an Arctic polynya. In AGU Fall Meeting Abstracts.
- Murata, A., Takizawa, T. (2003). Summertime CO₂ sinks in shelf and slope waters of the western Arctic Ocean. *Continental Shelf Research*, 23(8), 753-776.
- Murray, J. W. (2006). *Ecology and applications of benthic foraminifera*. Cambridge University Press.
- Murray, J. W., Bowser, S. S. (2000). Mortality, protoplasm decay rate, and reliability of staining techniques to recognize 'living' foraminifera: a review. *Journal of Foraminiferal Research*, 30(1), 66-70.

N

- Naidu, A. S., Cooper, L. W., Finney, B. P., Macdonald, R. W., Alexander, C., Semiletov, I. P. (2000). Organic carbon isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$) of Arctic Amerasian continental shelf sediments. *International Journal of Earth Sciences*, 89(3), 522-532.
- Naidu, A. S., Scalan, R. S., Feder, H. M., Goering, J. J., Hameedi, M. J., Parker, P. L., et al. (1993). Stable organic carbon isotopes in sediments of the north Bering-south Chukchi seas, Alaskan-Soviet Arctic Shelf. *Continental Shelf Research*, 13(5-6), 669-691.
- Nyholm, K. G. (1961). Morphogenesis and biology of the foraminifer *Cibicides lobatulus*. *Zoologiska bidrag fran Uppsala*, 33, 157-196.

O

- Odate, T., Hirawake, T., Kudoh, S., Klein, B., LeBlanc, B., Fukuchi, M. (2002). Temporal and spatial patterns in the surface-water biomass of phytoplankton in the North Water. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(22-23), 4947-4958.
- Osterman, L. E., Nelson, A. R. (1989). Latest Quaternary and Holocene paleoceanography of the eastern Baffin Island continental shelf, Canada: benthic foraminiferal evidence. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26(11), 2236-2248.
- Osterman, L. E., Poore, R. Z., Foley, K. M. (1999). *Distribution of benthic foraminifera (> 125 μm) in the surface sediments of the Arctic Ocean*. US Government Printing Office.

P

- Parkinson, C. L., Cavalieri, D. J., Gloersen, P., Zwally, H. J., Comiso, J. C. (1999). Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978–1996. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C9), 20837-20856.

Références bibliographiques

- Parsons, A. R., Bourke, R. H., Muench, R. D., Chiu, C. S., Lynch, J. F., Miller, J. H., et al. (1996). The Barents Sea polar front in summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C6), 14201-14221.
- Pawlowski, J. (2000). Introduction to the molecular systematics of foraminifera. *Micropaleontology*, 46, 1-12.
- Pawlowski, J., Bolivar, I., Fahrni, J., Zaninetti, L. (1994). Taxonomic identification of foraminifera using ribosomal DNA sequences. *Micropaleontology*, 373-377.
- Pedrosa, M. T., Camerlenghi, A., De Mol, B., Urgeles, R., Rebesco, M., Lucchi, R. G. (2011). Seabed morphology and shallow sedimentary structure of the Storfjorden and Kveithola trough-mouth fans (North West Barents Sea). *Marine Geology*, 286(1), 65-81.
- Perrette, M., Yool, A., Quartly, G. D., Popova, E. E. (2011). Near-ubiquity of ice-edge blooms in the Arctic. *Biogeosciences*, 8(2), 515-524.
- Phipps, M., Jorissen, F., Pusceddu, A., Bianchelli, S., De Stigter, H. (2012). Live benthic foraminiferal faunas along a bathymetrical transect (282–4987 m) on the Portuguese margin (NE Atlantic). *The Journal of Foraminiferal Research*, 42(1), 66-81.
- Phleger, F. B., 1952, Foraminifera distribution in some sediment samples from the Canadian and Greenland Arctic: Contributions from the Cushman Foundation for Foraminiferal Research, v. 3, p. 79-89.
- Piña-Ochoa, E., Høglund, S., Geslin, E., Cedhagen, T., Revsbech, N. P., Nielsen, L. P., et al. (2010). Widespread occurrence of nitrate storage and denitrification among Foraminifera and Gromiida. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(3), 1148-1153.
- Pipko, I. I., Semiletov, I. P., Tishchenko, P. Y., Pugach, S. P., Christensen, J. P. (2002). Carbonate chemistry dynamics in Bering Strait and the Chukchi Sea. *Progress in Oceanography*, 55(1-2), 77-94.
- Platt, T., Harrison, W. G., Irwin, B., Horne, E. P., Gallegos, C. L. (1982). Photosynthesis and photoadaptation of marine phytoplankton in the Arctic. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 29(10), 1159-1170.
- Polyak, L., Mikhailov, V. (1996). Post-glacial environments of the southeastern Barents Sea: foraminiferal evidence. *Geological Society, London, Special Publications*, 111(1), 323-337.
- Polyak, L., Best, K. M., Crawford, K. A., Council, E. A., St-Onge, G. (2013). Quaternary history of sea ice in the western Arctic Ocean based on foraminifera. *Quaternary Science Reviews*, 79, 145-156.
- Polyak, L., Darby, D. A., Bischof, J. F., Jakobsson, M. (2007). Stratigraphic constraints on late Pleistocene glacial erosion and deglaciation of the Chukchi margin, Arctic Ocean. *Quaternary Research*, 67(2), 234-245.
- Polyak, L., Korsun, S., Febo, L. A., Stanovoy, V., Khusid, T., Hald, M., et al. (2002). Benthic foraminiferal assemblages from the southern Kara Sea, a river-influenced Arctic marine environment. *Journal of Foraminiferal Research*, 32(3), 252-273.
- Pomerleau, C., Winkler, G., Sastri, A. R., Nelson, R. J., Vagle, S., Lesage, V., Ferguson, S. H. (2011). Spatial patterns in zooplankton communities across the eastern Canadian sub-Arctic and Arctic waters: insights from stable carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) isotope ratios. *Journal of Plankton Research*, 33(12), 1779-1792.

Q

Qu, B., Gabric, A. J., & Matrai, P. A. (2006). The satellite-derived distribution of chlorophyll-a and its relation to ice cover, radiation and sea surface temperature in the Barents Sea. *Polar Biology*, 29(3), 196-210.

R

Rabe, B., Johnson, H. L., Münchow, A., Melling, H. (2012). Geostrophic ocean currents and freshwater fluxes across the Canadian polar shelf via Nares Strait. *Journal of Marine Research*, 70(4), 603-640.

Rasmussen, T. L., Thomsen, E. (2017). Ecology of deep-sea benthic foraminifera in the North Atlantic during the last glaciation: Food or temperature control. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 472, 15-32.

Rathburn, A. E., Corliss, B. H. (1994). The ecology of living (stained) deep-sea benthic foraminifera from the Sulu Sea. *Paleoceanography*, 9(1), 87-150.

Rau, G. H., Sweeney, R. E., Kaplan, I. R. (1982). Plankton ^{13}C : ^{12}C ratio changes with latitude: differences between northern and southern oceans. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 29(8), 1035-1039.

Rau, G. H., Takahashi, T., Des Marais, D. J. (1989). Latitudinal variations in plankton $\delta^{13}\text{C}$: implications for CO_2 and productivity in past oceans. *Nature*, 341(6242), 516.

Rau, G. H., Takahashi, T., Des Marais, D. J., Repeta, D. J., Martin, J. H. (1992). The relationship between $\delta^{13}\text{C}$ of organic matter and $[\text{CO}_2(\text{aq})]$ in ocean surface water: data from a JGOFS site in the northeast Atlantic Ocean and a model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3), 1413-1419.

Rebesco, M., Laberg, J. S., Pedrosa, M. T., Camerlenghi, A., Lucchi, R. G., Zgur, F., Wardell, N. (2014). Onset and growth of trough-mouth fans on the north-western Barents Sea margin—implications for the evolution of the Barents Sea/Svalbard ice sheet. *Quaternary Science Reviews*, 92, 227-234.

Redfield, A. C. (1963). The influence of organisms on the composition of seawater. *The sea*, 2, 26-77.

Reigstad, M., Riser, C. W., Wassmann, P., Ratkova, T. (2008). Vertical export of particulate organic carbon: attenuation, composition and loss rates in the northern Barents Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(20-21), 2308-2319.

Reigstad, M., Wassmann, P., Riser, C. W., Øygarden, S., Rey, F. (2002). Variations in hydrography, nutrients and chlorophyll a in the marginal ice-zone and the central Barents Sea. *Journal of Marine Systems*, 38(1-2), 9-29.

Risgaard-Petersen, N., Langezaal, A. M., Ingvarsen, S., Schmid, M. C., Jetten, M. S., den Camp, H. J. O., et al. (2006). Evidence for complete denitrification in a benthic foraminifer. *Nature*, 443(7107), 93.

Roach, A. T., Aagaard, K., Pease, C. H., Salo, S. A., Weingartner, T., Pavlov, V., Kulakov, M. (1995). Direct measurements of transport and water properties through the Bering Strait. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C9), 18443-18457.

Références bibliographiques

- Rudels, B., Friedrich, H. J. (2000). The transformations of Atlantic water in the Arctic Ocean and their significance for the freshwater budget. In *The freshwater budget of the Arctic Ocean* (pp. 503-532). Springer, Dordrecht.
- Rudels, B., Anderson, L., Eriksson, P., Fahrbach, E., Jakobsson, M., Jones, E. P., et al. (2012). Observations in the ocean. In *Arctic Climate Change* (pp. 117-198). Springer, Dordrecht.
- Rytter, A. E., Sheldon, C., Cronin, T. M., Francus, P., Stoner, J., Andrews, J. (2011). The Holocene history of Nares Strait: Transition from glacial bay to Arctic-Atlantic throughflow. *Oceanography*, 24(3), 26-41.
- Rytter, F., Knudsen, K. L., Seidenkrantz, M. S., Eiríksson, J. (2002). Modern distribution of benthic foraminifera on the North Icelandic shelf and slope. *The Journal of Foraminiferal Research*, 32(3), 217-244.

S

- Sackett, W. M. (1964). The depositional history and isotopic organic carbon composition of marine sediments. *Marine Geology*, 2(3), 173-185.
- Sætre, R., (2007). *The Norwegian Coastal Current—Oceanography and Climate*. (Ed.) Tapir Academic Press, Trondheim, Norway, 159pp.
- Saher, M., Kristensen, D. K., Hald, M., Korsun, S., Jørgensen, L. L. (2009). Benthic foraminifera assemblages in the Central Barents Sea: an evaluation of the effect of combining live and total fauna studies in tracking environmental change. *Norwegian Journal of Geology*, 89, 149-161.
- Saher, M., Kristensen, D. K., Hald, M., Pavlova, O., Jørgensen, L. L. (2012). Changes in distribution of calcareous benthic foraminifera in the central Barents Sea between the periods 1965–1992 and 2005–2006. *Global and Planetary Change*, 98, 81-96.
- Sakshaug, E. (2004). Primary and secondary production in the Arctic Seas. In *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean* (pp. 57-81). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Sakshaug, E., Slagstad, D. (1992). Sea ice and wind: effects on primary productivity in the Barents Sea. *Atmosphere-Ocean*, 30(4), 579-591.
- Samelson, R. M., Barbour, P. (2006). Mesoscale dynamics and orographic channeling of low-level flow through Nares Strait.
- Schmiedl, G., Mackensen, A., Müller, P. J. (1997). Recent benthic foraminifera from the eastern South Atlantic Ocean: dependence on food supply and water masses. *Marine Micropaleontology*, 32(3), 249-287.
- Schönfeld, J. (2001). Benthic foraminifera and pore-water oxygen profiles: a re-assessment of species boundary conditions at the western Iberian margin. *The Journal of Foraminiferal Research*, 31(2), 86-107.
- Schönfeld, J., Alve, E., Geslin, E., Jorissen, F., Korsun, S., Spezzaferri, S. (2012). The FOBIMO (FORaminiferal BIO-MONitoring) initiative—Towards a standardised protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies. *Marine Micropaleontology*, 94, 1-13.

Références bibliographiques

- Schröder-Adams, C. J. (1990). High latitude agglutinated foraminifera: Prydz bay (Antarctica) vs. Lancaster sound (Canadian Arctic). In *Paleoecology, Biostratigraphy, Paleoceanography and Taxonomy of Agglutinated Foraminifera* (pp. 315-343). Springer, Dordrecht.
- Schröder-Adams, C. J., Cole, F. E., Medioli, F. S., Mudie, P. J., Scott, D. B., Dobbin, L. (1990). Recent Arctic shelf foraminifera; seasonally ice covered vs. perennially ice covered areas. *The Journal of Foraminiferal Research*, 20(1), 8-36.
- Schröder-Adams, C. J., Van Rooyen, D. (2011). Response of recent benthic foraminiferal assemblages to contrasting environments in Baffin Bay and the Northern Labrador Sea, Northwest Atlantic. *Arctic*, 317-341.
- Schweizer, M., Pawlowski, J., Duijnste, I. A. P., Kouwenhoven, T. J., Van der Zwaan, G. J. (2005). Molecular phylogeny of the foraminiferal genus *Uvigerina* based on ribosomal DNA sequences. *Marine Micropaleontology*, 57(3-4), 51-67.
- Schweizer, M., Pawlowski, J., Kouwenhoven, T. J., Guiard, J., Van der Zwaan, B. (2008). Molecular phylogeny of *Rotaliida* (Foraminifera) based on complete small subunit rDNA sequences. *Marine Micropaleontology*, 66(3-4), 233-246.
- Scott, D. B., Vilks, G. (1991). Benthic foraminifera in the surface sediments of the deep-sea Arctic Ocean. *The Journal of Foraminiferal Research*, 21(1), 20-38.
- Scott, D. B., Schell, T., Rochon, A., Blasco, S. (2008). Modern benthic foraminifera in the surface sediments of the Beaufort Shelf, Slope and Mackenzie Trough, Beaufort Sea, Canada: Taxonomy and summary of surficial distributions. *The Journal of Foraminiferal Research*, 38(3), 228-250.
- Seidenkrantz, M. S., Aagaard-Sørensen, S., Sulsbrück, H., Kuijpers, A., Jensen, K. G., Kunzendorf, H. (2007). Hydrography and climate of the last 4400 years in a SW Greenland fjord: implications for Labrador Sea palaeoceanography. *The Holocene*, 17(3), 387-401.
- Seidenkrantz, M. S. (2013). Benthic foraminifera as palaeo sea-ice indicators in the subarctic realm—examples from the Labrador Sea–Baffin Bay region. *Quaternary Science Reviews*, 79, 135-144.
- Sejrup, H. P., Birks, H. J. B., Kristensen, D. K., Madsen, H. (2004). Benthonic foraminiferal distributions and quantitative transfer functions for the northwest European continental margin. *Marine Micropaleontology*, 53(1-2), 197-226.
- Sejrup, H. P., Lehman, S. J., Haflidason, H., Noone, D., Muscheler, R., Berstad, I. M., Andrews, J. T. (2010). Response of Norwegian Sea temperature to solar forcing since 1000 AD. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C12).
- Semiletov, I. P. (1999). Aquatic sources and sinks of CO₂ and CH₄ in the polar regions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(2), 286-306.
- Serreze, M. C., Crawford, A. D., Stroeve, J. C., Barrett, A. P., Woodgate, R. A. (2016). Variability, trends, and predictability of seasonal sea ice retreat and advance in the Chukchi Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(10), 7308-7325.
- Serreze, M. C., Holland, M. M., Stroeve, J. (2007). Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. *science*, 315(5818), 1533-1536.
- Shannon CE, Weaver W (1949) *The Mathematical Theory of Information*. University of Illinois Press, Urbana

Références bibliographiques

- Shimada, K., Kamoshida, T., Itoh, M., Nishino, S., Carmack, E., McLaughlin, F., et al. (2006). Pacific Ocean inflow: Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 33(8).
- Signorini, S. R., McClain, C. R. (2009). Environmental factors controlling the Barents Sea spring- summer phytoplankton blooms. *Geophysical Research Letters*, 36(10).
- Ślubowska, M. A., Koç, N., Rasmussen, T. L., Klitgaard-Kristensen, D. (2005). Changes in the flow of Atlantic water into the Arctic Ocean since the last deglaciation: evidence from the northern Svalbard continental margin, 80 N. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 20(4).
- Smedsrud, L. H., Ingvaldsen, R., Nilsen, J. E. Ø., Skagseth, Ø. (2010). Heat in the Barents Sea: Transport, storage, and surface fluxes.
- Solignac, S., Seidenkrantz, M. S., Jessen, C., Kuijpers, A., Gunvald, A. K., Olsen, J. (2011). Late-Holocene sea-surface conditions offshore Newfoundland based on dinoflagellate cysts. *The Holocene*, 21(4), 539-552.
- Spielhagen, R. F., Werner, K., Sørensen, S. A., Zamelczyk, K., Kandiano, E., Budeus, G., et al. (2011). Enhanced modern heat transfer to the Arctic by warm Atlantic water. *Science*, 331(6016), 450-453.
- Springer, A. M., McRoy, C. P., Turco, K. R. (1989). The paradox of pelagic food webs in the northern Bering Sea—II. Zooplankton communities. *Continental Shelf Research*, 9(4), 359-386.
- Stabeno, P. J., Overland, J. E. (2001). Bering Sea shifts toward an earlier spring transition. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82(29), 317-321.
- Stein R, Grobe H, Wahsner M (1994) Organic carbon, carbonate, and clay mineral distributions in eastern central Arctic Ocean surface sediments. *Mar Geol* 119(3–4):269–285
- Steinsund, P. I., Hald, M. (1994). Recent calcium carbonate dissolution in the Barents Sea: paleoceanographic applications. *Marine Geology*, 117(1-4), 303-316.
- Streeter, S. S. (1973). Bottom Water and Benthonic Foraminifera in the North Atlantic—Glacial-Interglacial Contrasts 1. *Quaternary Research*, 3(1), 131-141.
- Stroeve, J. C., Serreze, M. C., Holland, M. M., Kay, J. E., Malanik, J., Barrett, A. P. (2012). The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. *Climatic Change*, 110(3-4), 1005-1027.
- Swift, J. H., Jones, E. P., Aagaard, K., Carmack, E. C., Hingston, M., Macdonald, R. W., et al. (1997). Waters of the Makarov and Canada basins. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 44(8), 1503-1529.

T

- Tang, C. C., Ross, C. K., Yao, T., Petrie, B., DeTracey, B. M., Dunlap, E. (2004). The circulation, water masses and sea-ice of Baffin Bay. *Progress in Oceanography*, 63(4), 183-228.
- Taylor, J., Dowdeswell, J. A., Kenyon, N. H., Cofaigh, C. Ó. (2002). Late Quaternary architecture of trough-mouth fans: debris flows and suspended sediments on the Norwegian margin. *Geological Society, London, Special Publications*, 203(1), 55-71.

Références bibliographiques

- Teeri, J. A., Stowe, L. G. (1976). Climatic patterns and the distribution of C4 grasses in North America. *Oecologia*, 23(1), 1-12.
- Thomsen, L., Graf, G., Martens, V., Steen, E. (1994). An instrument for sampling water from the benthic boundary layer. *Continental Shelf Research*, 14(7-8), 871-882.
- Tremblay, J. É., Anderson, L. G., Matrai, P., Coupel, P., Bélanger, S., Michel, C., Reigstad, M. (2015). Global and regional drivers of nutrient supply, primary production and CO2 drawdown in the changing Arctic Ocean. *Progress in Oceanography*, 139, 171-196.
- Tremblay, J. É., Gratton, Y., Carmack, E. C., Payne, C. D., Price, N. M. (2002). Impact of the large-scale Arctic circulation and the North Water Polynya on nutrient inventories in Baffin Bay. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C8), 26-1.
- Tremblay, J. É., Hattori, H., Michel, C., Ringuette, M., Mei, Z. P., Lovejoy, C., et al. (2006). Trophic structure and pathways of biogenic carbon flow in the eastern North Water Polynya. *Progress in Oceanography*, 71(2-4), 402-425.
- Tremblay, J. É., Simpson, K., Martin, J., Miller, L., Gratton, Y., Barber, D., Price, N. M. (2008). Vertical stability and the annual dynamics of nutrients and chlorophyll fluorescence in the coastal, southeast Beaufort Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C7).
- Trenberth, K. E., Hurrell, J. W. (1994). Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics*, 9(6), 303-319.
- Trouet, V., Scourse, J. D., Raible, C. C. (2012). North Atlantic storminess and Atlantic Meridional Overturning Circulation during the last Millennium: Reconciling contradictory proxy records of NAO variability. *Global and Planetary Change*, 84, 48-55.

V

- Van der Zwaan, G. J., Duijnste, I. A. P., Den Dulk, M., Ernst, S. R., Jannink, N. T., Kouwenhoven, T. J. (1999). Benthic foraminifers: proxies or problems?: a review of paleocological concepts. *Earth-Science Reviews*, 46(1-4), 213-236.
- Van Weering, T., Stoker, M., Rebesco, M. (2008). High-latitude contourites. *Developments in Sedimentology*, 60, 457-489.
- Vilks, G. (1964). Foraminiferal Study of East Bay, Mackenzie King Island, District of Franklin:(Polar Continental Shelf Project) (Vol. 64, No. 53). R. Duhamel.
- Vilks, G. (1969). Recent foraminifera in the Canadian Arctic. *Micropaleontology*, 35-60.
- Vinje, T. (2001). Anomalies and trends of sea-ice extent and atmospheric circulation in the Nordic Seas during the period 1864–1998. *Journal of Climate*, 14(3), 255-267.
- Vinje, T., Colony, R. (1999, July). Barents Sea ice edge variation over the past 400 years. In *Extended Abstracts, Workshop on Sea-Ice Charts of the Arctic* (Vol. 949, pp. 4-6). Seattle, Washington, USA: World Meteorological Organization.
- Vorren, T. O., Laberg, J. S. (1997). Trough mouth fans—Palaeoclimate and ice-sheet monitors. *Quaternary Science Reviews*, 16(8), 865-881.

W

- Walton, W. R. (1952). Techniques for recognition of living foraminifera. *Cushman Found. Foram. Res. Contr.*, 3(2), 56-60.

Références bibliographiques

- Wang, J., Cota, G. F., Comiso, J. C. (2005). Phytoplankton in the Beaufort and Chukchi Seas: distribution, dynamics, and environmental forcing. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(24-26), 3355-3368.
- Wassmann, P. (1984). Sedimentation and benthic mineralization of organic detritus in a Norwegian fjord. *Marine Biology*, 83(1), 83-94.
- Wassmann, P. (2011). Arctic marine ecosystems in an era of rapid climate change. *Progress in Oceanography*, 90, 1-17.
- Wassmann, P., Reigstad, M. (2011). Future Arctic Ocean seasonal ice zones and implications for pelagic-benthic coupling. *Oceanography*, 24(3), 220-231.
- Wassmann, P., Bauerfeind, E., Fortier, M., Fukuchi, M., Hargrave, B., Moran, B., et al. (2004). Particulate organic carbon flux to the Arctic Ocean sea floor. In *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean* (pp. 101-138). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Weingartner, T. J., Cavalieri, D. J., Aagaard, K., Sasaki, Y. (1998). Circulation, dense water formation, and outflow on the northeast Chukchi shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C4), 7647-7661.
- Weingartner, T. J., Danielson, S., Sasaki, Y., Pavlov, V., Kulakov, M. (1999). The Siberian Coastal Current: A wind- and buoyancy- forced Arctic coastal current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C12), 29697-29713.
- Wheeler, P. A., Watkins, J. M., Hansing, R. L. (1997). Nutrients, organic carbon and organic nitrogen in the upper water column of the Arctic Ocean: implications for the sources of dissolved organic carbon. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 44(8), 1571-1592.
- Wollenburg, J. E., Kuhnt, W. (2000). The response of benthic foraminifers to carbon flux and primary production in the Arctic Ocean. *Marine Micropaleontology*, 40(3), 189-231.
- Wollenburg, J. E., Mackensen, A. (1998a). Living benthic foraminifers from the central Arctic Ocean: faunal composition, standing stock and diversity. *Marine Micropaleontology*, 34(3), 153-185.
- Wollenburg, J. E., Mackensen, A. (1998b). On the vertical distribution of living (Rose Bengal stained) benthic foraminifers in the Arctic Ocean. *The Journal of Foraminiferal Research*, 28(4), 268-285.
- Wollenburg, J. E., Mackensen, A. (2009). The ecology and distribution of benthic foraminifera at the Håkon Mosby mud volcano (SW Barents Sea slope). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(8), 1336-1370.
- Woodgate, R. A., Aagaard, K. (2005). Revising the Bering Strait freshwater flux into the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 32(2).
- Woodgate, R. A., Aagaard, K., Weingartner, T. J. (2005). Monthly temperature, salinity, and transport variability of the Bering Strait through flow. *Geophysical Research Letters*, 32(4).
- Woodgate, R. A., Aagaard, K., Weingartner, T. J. (2006). Interannual changes in the Bering Strait fluxes of volume, heat and freshwater between 1991 and 2004. *Geophysical Research Letters*, 33(15).
- Woodgate, R. A., Weingartner, T. J., Lindsay, R. (2012). Observed increases in Bering Strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic Ocean water column. *Geophysical Research Letters*, 39(24).

Références bibliographiques

Woodgate, R. A., Weingartner, T., Lindsay, R. (2010). The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea- ice retreat. *Geophysical Research Letters*, 37(1).

Y

Yun, M. S., Whitledge, T. E., Kong, M., Lee, S. H. (2014). Low primary production in the Chukchi Sea shelf, 2009. *Continental Shelf Research*, 76, 1-11.

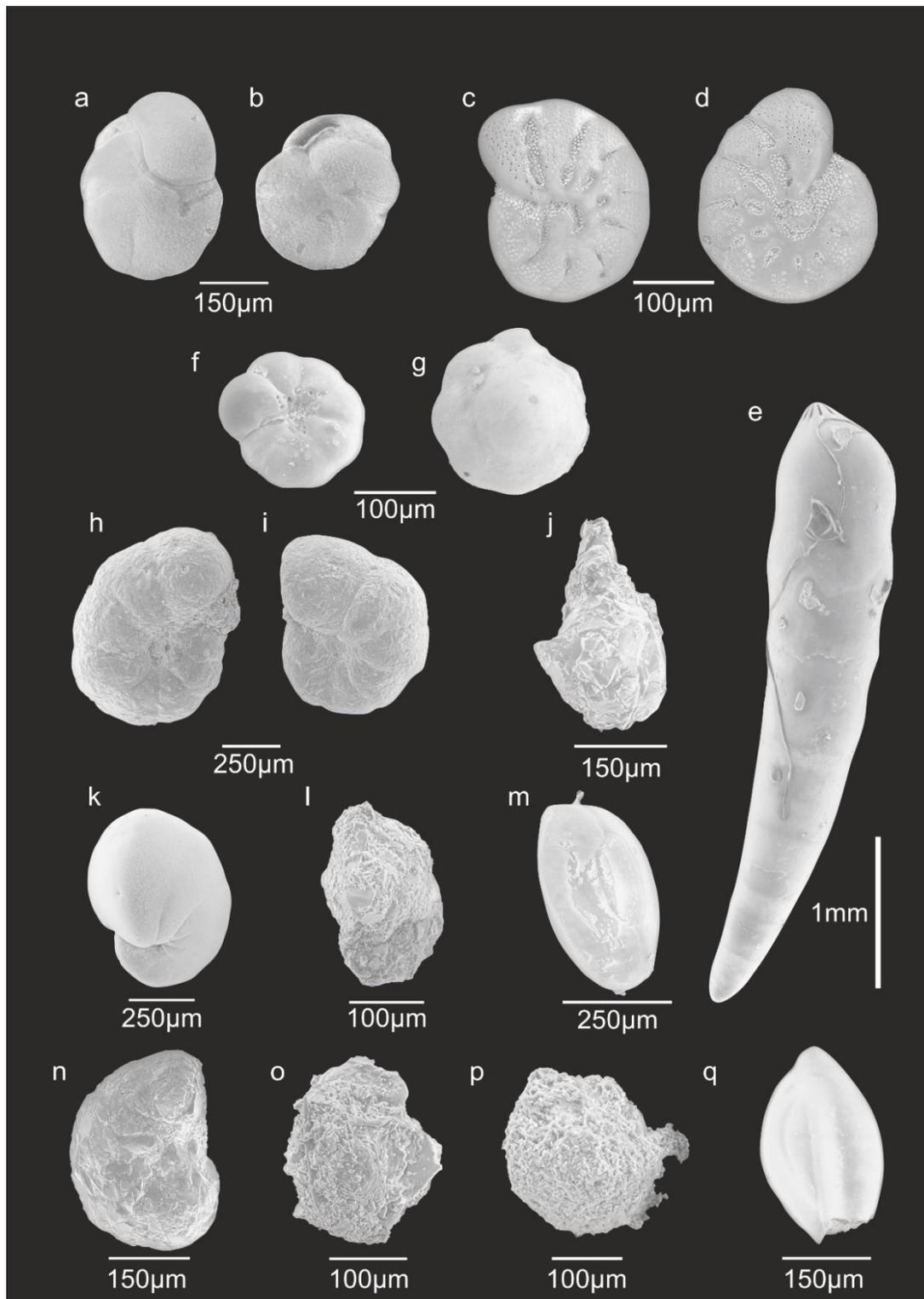
Yun, M. S., Whitledge, T. E., Stockwell, D., Son, S. H., Lee, J. H., Park, J. W., et al. (2016). Primary production in the Chukchi Sea with potential effects of freshwater content. *Biogeosciences*, 13(3), 737-749.

Z

Zhang, R., Vallis, G. K. (2006). Impact of great salinity anomalies on the low-frequency variability of the North Atlantic climate. *Journal of Climate*, 19(3), 470-482.

Annexes

Planches de photographies MEB présentant les espèces majeures observées dans les trois régions d'étude : mer de Chukchi, baie de Baffin et mer de Barents

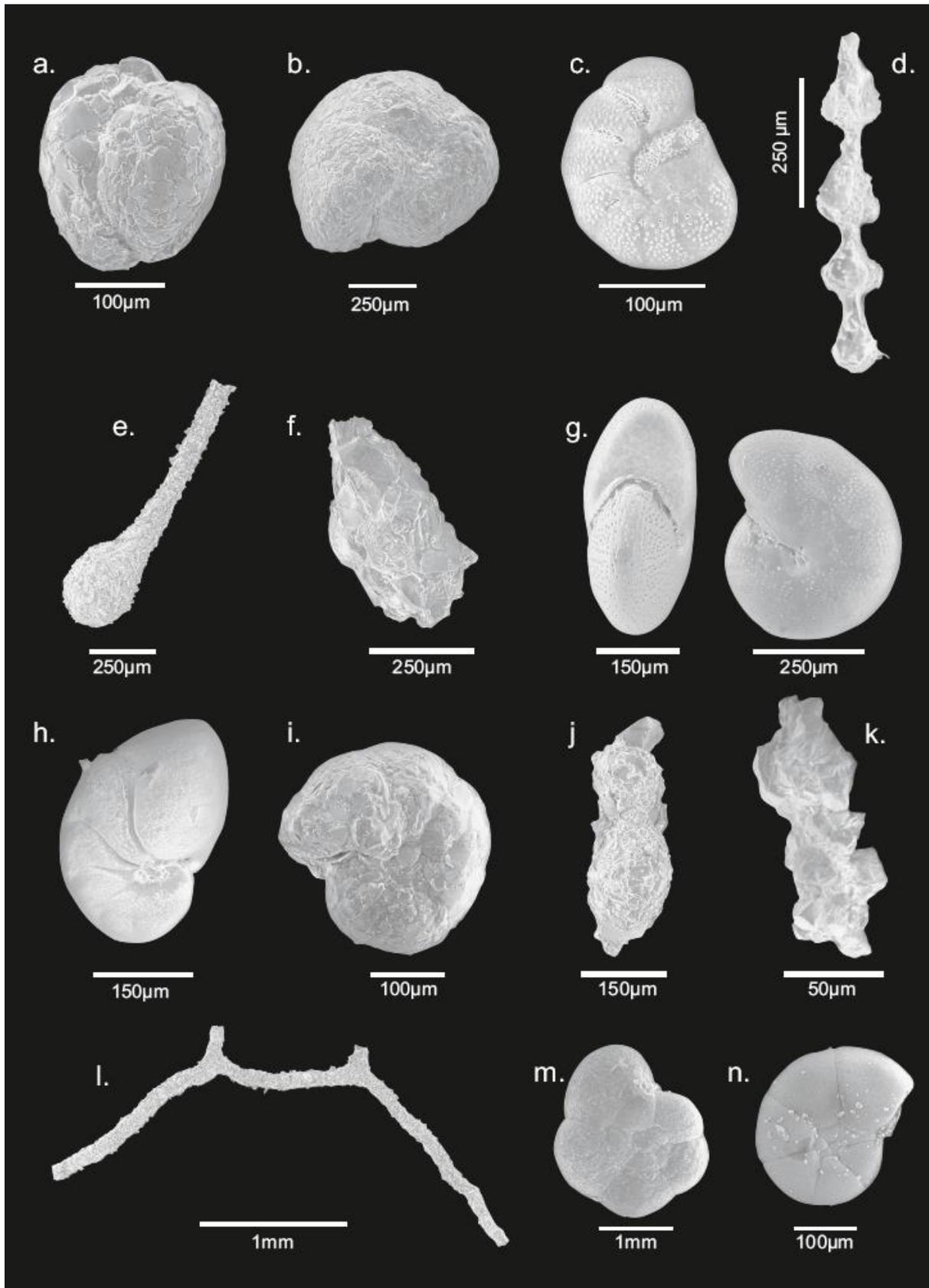


Annexe 1 : Planche de photographies MEB illustrant les espèces majeures observées en mer de Chukchi.

Annexes

Annexe 1 :

- a-b. *Cassidulina neoteretis* Seidenkrantz, 1995
- c-d. *Elphidium excavatum subsp. clavatum* Cushman, 1930
- e. *Laevidentalina elegans* (d'Orbigny, 1846)
- f-g. *Ioanella tumidula* (Brady, 1884)
- h-i. *Labrospira crassimargo* (Norman, 1892)
- j. *Lagenammia arenulata* (Skinner, 1961)
- k. *Nonionellina labradorica* (Dawson, 1860)
- l. *Nonionina scapha var. arenacea* Heron-Allen and Earland, 1922
- m. *Triloculina oblonga* (Montagu, 1803)
- n. *Recurvoides contortus* Earland, 1934
- o-p. *Saccammia* sp. Sars, 1869
- q. *Quinqueloculina arctica* Cushman, 1933

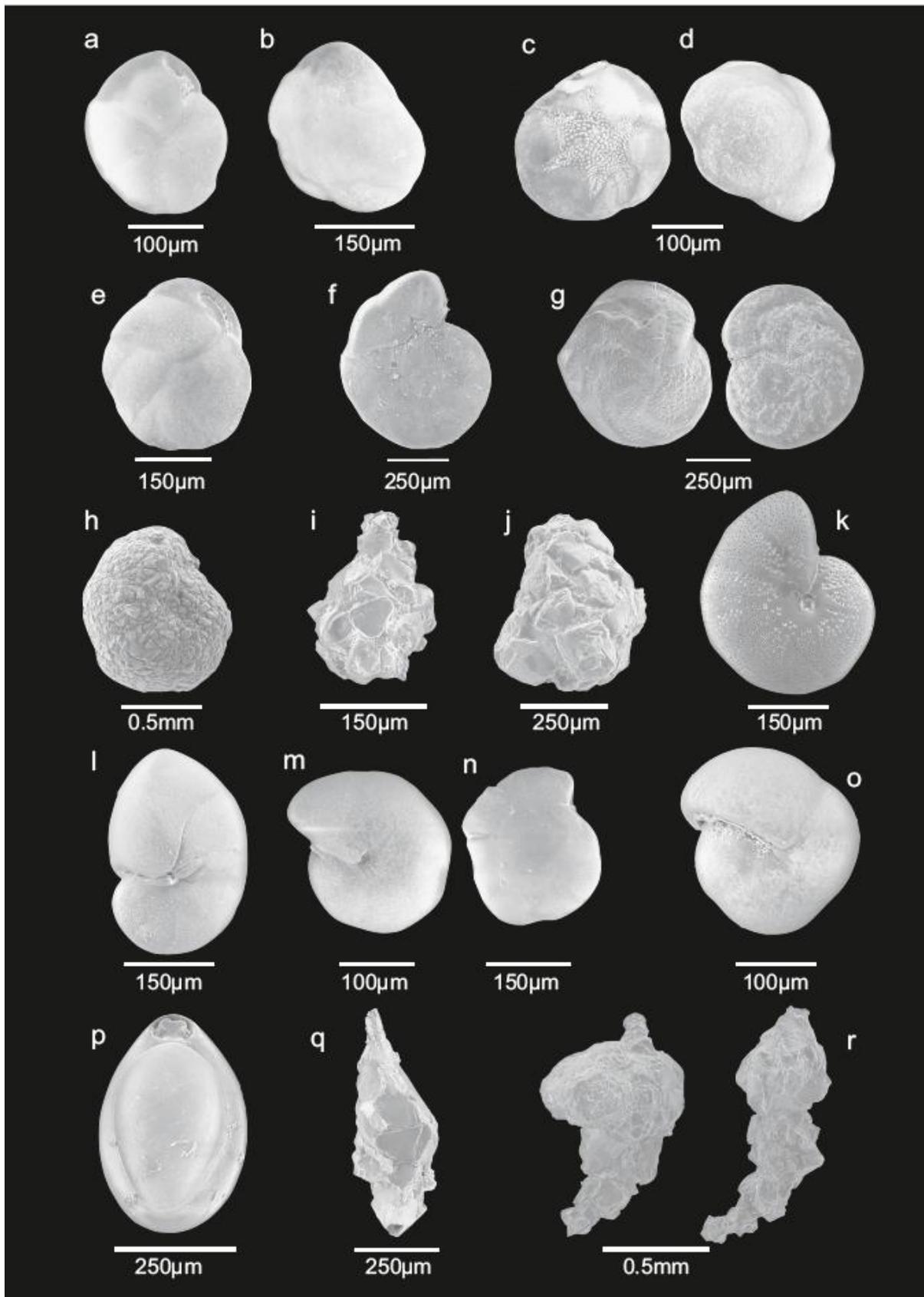


Annexe 2 : Planche de photographies MEB illustrant les espèces majeures observées dans la baie de Baffin et le détroit de Nares.

Annexes

Annexe 2 :

- a. *Adercotryma glomerata* (Brady, 1878)
- b. *Cribrostomoides subglobosus* (Cushman, 1910)
- c. *Haynesina orbiculare* (Brady, 1881)
- d. *Hormosinelloides guttifer* (Brady, 1881)
- e. *Hyperammina elongata* Brady, 1878
- f. *Lagenammina arenulata* (Skinner, 1961)
- g. *Melonis barleeanus* (Williamson, 1858)
- h. *Nonionellina labradorica* (Dawson, 1860)
- i. *Recurvoides contortus* Earland, 1934
- j. *Reophax bilocularis* Flint, 1899
- k. *Reophax scorpiurus* Montfort, 1808
- l. *Saccorhiza ramosa* (Brady, 1879)
- m. *Trochammina inflata* (Montagu, 1808)
- n. *Veleroninoides wiesneri* (Parr, 1950)



Annexe 3 : Planche de photographies MEB illustrant les espèces majeures observées en mer de Barents.

Annexes

Annexe 3 :

- a-b. *Bucella Frigida* (Cushman, 1922)
- c-d. *Bucella Tenerrima* (Bandy, 1950)
- e. *Cassidulina neoteretis* Seidenkrantz, 1995
- f. *Cibicidoides lobatulus* (Walker & Jacob, 1798)
- g. *Cibicidoides Wuellerstorfi* (Schwager, 1866)
- h. *Cribrostomoides subglobosus* (Cushman, 1910)
- i-j. *Lagenammina arenulata* (Skinner, 1961)
- k. *Melonis barleeanus* (Williamson, 1858)
- l. *Nonionellina labradorica* (dawson, 1860)
- m-n. *Oridorsalis tenerus* (Brady, 1884)
- o. *Pullenia bulloides* (d'Orbigny, 1846)
- p. *Pyrgo williamsoni* (Silvestri, 1923)
- q. *Reophax micaceus* (Cushman, 1918)
- r. *Reophax scorpiurus* Montfort, 1808

Tableaux de comptages de l'étude

Chukchi

St. 01A > 125 µm	<i>Ammobaculites agglutinans</i>	<i>Ammotium cassis</i>	<i>Astrorhiza granulosa</i>	<i>Buccella frigida</i>	<i>Cribrorhynchium excavatum</i>	<i>Cribrostomoides subglobosa</i>	<i>Islandiella norcrossi</i>	<i>Labrospira crassimargo</i>	<i>Nonionella labradorica</i>	<i>Nonionina scapha var. arenacea</i>	<i>Recurvooides contorta</i>	<i>Reophax scorpionus</i>	<i>Saccamina sp.</i>	<i>Silver saccaminia</i>	<i>Textularia agglutinans</i>	<i>Trochammina nana</i>	Indéterminé agglutiné	Indéterminé calcaire	Total	Volumes réels mesurés (mL)
0_0,5	1	1	1		2	1		7		8	6	1	6	4	1	3	1		43,00	46,00
0,5_1					1						1								2,00	44,00
1_1,5								2	3		1								6,00	52,00
1,5_2									8		1								9,00	44,00
2_3					1		1	1	2										5,00	77,00
3_4				1	8				1										10,00	80,00
4_5				1	42				1										44,00	76,00
Σ_vivants	1	1	1	2	54	1	1	10	15	8	9	1	6	4	1	3	1	0	119	419,00

Annexe 4 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (> 125 µm) de la station 01A.

St. 02 > 125 µm	<i>Joanella tumidula</i>	<i>Quinqueloculina arctica</i>	<i>Triloculina oblonga</i>	Total	Volumes réels mesurés (mL)
0_0,5				0,00	46,00
0,5_1	3	1		4,00	47,00
1_1,5			1	1,00	41,00
1,5_2	1			1,00	43,00
2_3				0,00	73,00
3_4				0,00	81,00
4_5				0,00	67,00
Σ_vivants	4	1	1	6	398,00

St. 2 63-125 µm	<i>Oridorsalis tenerus</i>	Total	Volumes réels mesurés (mL)
0_0,5		0,00	46,00
0,5_1	1	1,00	47,00
Σ_vivants	1	1	93,00

Annexe 5 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (> 125 µm et 63-125 µm) de la station 02.

Annexes

St. 03 > 125 µm	<i>Cassidulina reniforme</i>	<i>Cassidulina teretis</i>	<i>Lagenamma arenulata</i>	<i>Portatrochamma karica</i>	<i>Reophax scoriurus</i>	<i>Triloculina oblonga</i>	<i>Triloculina trihedra</i>	Total	Volumes réels mesurés (mL)
0_0,5	1	59					1	61,00	23,00
0,5_1	2	24				1		27,00	50,00
1_1,5			1					1,00	50,00
1,5_2								0,00	55,00
2_3					1			1,00	86,00
3_4				1				1,00	93,00
4_5								0,00	73,00
Σ_vivants	3	83	1	1	1	1	1	91,00	430,00

St. 03 63-125 µm	<i>Parafissurina tectulostoma</i>	<i>Psammophaga sp.</i>	<i>Saccamina sp.</i>	Total	Volumes réels mesurés (mL)
0_0,5	1	0	0	1,00	23,00
0,5_1	0	2	6	8,00	50,00
Σ_vivants	1	2	6	9,00	73,00

Annexe 6 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm et 63-125 µm) de la station 03.

St. 04 > 125 µm	<i>Dentalina pauperata</i>	<i>Ioanella tumidula</i>	<i>Oridorsalis tenerus</i>	<i>Triloculina oblonga</i>	Total	Volumes réels mesurés (mL)
0_0,5	1		7		8,00	41,00
0,5_1		2	2		4,00	54,00
1_1,5	1			1	2,00	48,00
1,5_2					0,00	42,00
2_3					0,00	79,00
3_4					0,00	75,00
4_5					0,00	87,00
Σ_vivants	2	2	9	1	14	426,00

St. 04 63-125 µm	<i>Oridorsalis tenerus</i>	Total	Volumes réels mesurés (mL)
0_0,5	2	2,00	41,00
0,5_1	0	0,00	54,00
Σ_vivants	2	2	95,00

Annexe 7 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm et 63-125 µm) de la station 04.

Annexes

St. 05 > 125 µm	<i>Bulimina subteres</i>	<i>Cassidulina reniforme</i>	<i>Cassidulina teretis</i>	<i>Criboelphidium excavatum</i>	<i>Criboelphidium incertum</i>	<i>Lagenamma arenulata</i>	<i>Portatrochamma karica</i>	<i>Trochamma inflata</i>	Total	Volumes réels mesurés (mL)
0_0,5	1	1	129	28	1	7	3		170,00	22,00
0,5_1		1	9	30		3	2		45,00	33,00
1_1,5		2	1	2	1	1	1		8,00	21,00
1,5_2						6			6,00	23,00
2_3								1	1,00	44,00
3_4				2				1	3,00	55,00
4_5									0,00	36,00
Σ_vivants	1	4	139	62	2	17	6	2	233,00	234,00

St. 05 63-125 µm	<i>Parafissurina tectulostoma</i>	Total	Volumes réels mesurés (mL)
0_0,5	1	1,00	22,00
0,5_1	0	0,00	33,00
Σ_vivants	1	1,00	55,00

Annexe 8 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm et 63-125 µm) de la station 05.

Baffin

AMD14 Station Kane 2B	0_1	1_2	2_3	3_4	4_5	Σ vivants
<i>Adercotryma glomeratum</i>	240	83	81	51	33	488
<i>Allogromiida sp.</i>	2					2
<i>Ammoglobigerina globigeriniformis</i>	3		1			4
<i>Arenoturrispirillina catinus</i>	1					1
<i>Astrononion stellatum</i>			1			1
<i>Bathysiphon crassatina</i>	13					13
<i>Bolivina sp.</i>		1				1
<i>Buccella frigida</i>	3	5	3	1	1	13
<i>Cassidulina reniforme</i>	8					8
<i>Cassidulina teretis</i>	25	8				33
<i>Cornuspira involvens</i>	1					1
<i>Cribolephidium excavatum</i>	5					5
<i>Cribratomoides subglobosus</i>	3					3
<i>Globobulimina pyrula</i>		1		1		2
<i>Haynesina orbicularis</i>	66	5			1	72
<i>Hyalinonetrion gracillimum</i>	2					2
<i>Hyperammia elongata</i>	7					7
<i>Islandiella norcrossi</i>	13	3	2		1	19
<i>Labrospira crassimargo</i>		5				5
<i>Laevidentalina haueri</i>	4					4
<i>Lagenammia arenulata</i>	74	16	20	11	3	124
<i>Melonis barleeanus</i>	41	2	20	1	2	66
<i>Miliammia fusca</i>	7	1				8
<i>Nonionella labradorica</i>	19	59	71	12	2	163
<i>Portatrochammina karica</i>	7	2	4	1		14
<i>Pyrgo williamsoni</i>	8					8
<i>Quinqueloculina sp.</i>	5					5
<i>Recurvoides contortus</i>	3				1	4
<i>Reophax bilocularis</i>	5				1	6
<i>Reophax scorpiurus</i>	2		1	2		5
<i>Reussoolina laevis</i>	2					2
<i>Saccammia sp.</i>	1					1
<i>Silver saccamminid</i>	3					3
<i>Stainforthia concava</i>	1	1				2
<i>Thurammia sp.</i>	1					1
<i>Triloculina trihedra</i>	1					1
<i>Uvigerina sp.</i>	6	3	2	1	4	16
Indéterminé		3			1	4
Total	582	198	206	81	50	1117
Volume théorique (mL)	63,6	63,6	63,6	63,6	63,6	318,1

Annexe 9 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station Kane2B.

AMD14 Station 101	0_1	1_2	2_3	3_4	4_5	Σ vivants
<i>Adercotryma glomeratum</i>	64		59	14	9	150
<i>Ammotium cassis</i>	3				1	4
<i>Arenoturrispirillina catinus</i>	1				3	4
<i>Buccella frigida</i>	8		4	1	1	15
<i>Cassidulina reniforme</i>	2					2
<i>Cibicides lobatulus</i>					1	1
<i>Globobulimina pyrula</i>				1		1
<i>Islandiella helenae</i>	4		3		4	12
<i>Labrospira crassimargo</i>	2					2
<i>Lagenammia arenulata</i>				1		2
<i>Lagenammia difflugiformis</i>	5					5
<i>Lagenammia tabulata</i>			1			1
<i>Lagenammia spp.</i>			3			3
<i>Melonis barleeanus</i>			1			1
<i>Miliammia fusca</i>	4		3		2	9
<i>Nonionella labradorica</i>	9		25	7	2	44
<i>Recurvoides contortus</i>	44		15	14	24	101
<i>Reophax bilocularis</i>				1	1	3
<i>Reophax fusiformis</i>	6		15		2	23
<i>Spiroplectammina biformis</i>	1		1			2
Indéterminé	1					1
Total	154		130	39	50	386
Volume théorique (mL)	63,6		63,6	63,6	63,6	318,1

Annexe 10 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 101.

Annexes

AMD14 Station 115	0_1	1_2	2_3	3_4	4_5	Σ vivants
<i>Adercotryma glomeratum</i>	9	5	3	9	2	28
<i>Ammoglobigerina globigeriniformis</i>	7	2				9
<i>Arenoturrspirillina catinus</i>	1					1
<i>Astrononion stellatum</i>			2			2
<i>Bathysiphon crassatina</i>	2					2
<i>Buccella frigida</i>	5		2	1		8
<i>Criboelphidium excavatum</i>			1			1
<i>Glandulina ovula</i>	1					1
<i>Haynesina orbicularis</i>			3			3
<i>Hormosinelloides guttifer</i>	4					4
<i>Hyperammina elongata</i>		1	1			2
<i>Islandiella norcrossi</i>	5					5
<i>Labrospira crassimargo</i>	3	2	2	5	2	14
<i>Laevidentalina haueri</i>			1		1	2
<i>Lagenammina arenulata</i>	209	31	20	27	16	303
<i>Lagenammina difflugiformis</i>	17	12	5	3	3	40
<i>Lagenammina sp.</i>		2				2
<i>Melonis barleeanus</i>	16	14	84	6		120
<i>Nonionellina labradorica</i>			5	1	1	7
<i>Portatrochammina karica</i>	17	8	3	2		30
<i>Pullenia bulloides</i>	1		1			2
<i>Recurvoides contortus</i>	52	4		3		59
<i>Reophax bilocularis</i>	9	1		1		11
<i>Reophax fusiformis</i>	24					24
<i>Reophax scorpiurus</i>	93	9	32	15	5	154
<i>Reussoolina laevis</i>			1			1
<i>Rhizammina algaeformis</i>	1	1				2
<i>Saccammina sp.</i>	3					3
<i>Silver saccamminid</i>	20	5				25
<i>Thurammina sp.</i>	1			1		2
<i>Trochammina inflata</i>	19	16	17			52
<i>Uvigerina sp.</i>	2				2	4
<i>Veloroninoides wiesneri</i>			17		1	18
Indéterminés	4	1				5
Total	525	114	200	74	33	946
Volume théorique (mL)	63,6	63,6	63,6	63,6	63,6	318,1

Annexe 11 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 115.

AMD14 Station 200	0_1	1_2	2_3	3_4	4_5	Σ vivants
<i>Adercotryma glomeratum</i>			1	1	1	3
<i>Cribratomoides subglobosus</i>	27		3	2		34
<i>Hormosinelloides guttifer</i>	19		5	2		28
<i>Hyperammina elongata</i>	1					1
<i>Lagenammina arenulata</i>				2		2
<i>Lagenammina difflugiformis</i>			1	2		3
<i>Melonis barleeanus</i>	1		2		1	4
<i>Quinqueloculina sp.</i>	3					3
<i>Recurvoides contortus</i>			6	1	1	8
<i>Recurvoïdes turbinatus</i>	2			1		3
<i>Reophax scorpiurus</i>	64		10	13	7	97
<i>Saccammina sp.</i>	5					5
<i>Silver saccammina</i>	3					3
<i>Thurammina sp.</i>					1	1
<i>Veloroninoides wiesneri</i>	3		1	2	1	10
Indéterminé			1			1
Total	128		30	26	12	206
Volume théorique (mL)	63,6		63,6	63,6	63,6	318,1

Annexe 12 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 200.

Annexes

AMD14 Station 204	0_1	1_2	2_3	3_4	4_5	Σ_vivants
<i>Criboelphidium excavatum</i>				1		1
<i>Cribr stomoides subglobosus</i>	24	2				26
<i>Hormosinelloides guttifer</i>		1				1
<i>Hyperammina elongata</i>		1				1
<i>Lagenammina arenulata</i>	14	30	8	2	1	55
<i>Lagenammina difflugiformis</i>		4	1		2	7
<i>Melonis barleeanus</i>	4	21	12	2	2	41
<i>Nonionellina labradorica</i>			4	1		5
<i>Portatrochammina karica</i>	1	2				3
<i>Reophax scorpiurus</i>		1				1
<i>Silver saccamminid</i>	1					1
<i>Trochammina inflata</i>	2					2
Total	46	62	26	5	5	144
Volume théorique (mL)	63,6	63,6	63,6	63,6	63,6	318,1

Annexe 13 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 204.

AMD Station 210	0_1	1_2	2_3	3_4	4_5	Σ_vivants
<i>Cribr stomoides subglobosus</i>					2	2
<i>Crithionina hispida</i>	9	2	1			12
<i>Hormosinelloides guttifer</i>	4				3	7
<i>Hyperammina elongata</i>					1	1
<i>Lagenammina arenulata</i>	1		2			3
<i>Lagenammina difflugiformis</i>		1			1	2
<i>Recurvoides contortus</i>	15	1			1	17
<i>Reophax bilocularis</i>	11				1	12
<i>Reophax fusiformis</i>	1					1
<i>Reophax scorpiurus</i>	2			1	4	2
<i>Rhizammina algaeformis</i>	2					2
<i>Saccammina sp.</i>	2	1				3
<i>Saccorhiza ramosa</i>	8	1	1			10
<i>Silver saccammina</i>	2	5				7
<i>Thurammina sp.</i>	1	1				2
<i>Veleroninoides wiesneri</i>		1	1	2	2	6
Total	58	13	6	15	4	96
Volume théorique (mL)	63,6	63,6	63,6	63,6	63,6	318,1

Annexe 14 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 210.

Annexes

AMD15 Station BC1	0_0,5	0,5_1	1_1,5	1,5_2	2_2,5	2,5_3	3_3,5	3,5_4	4_4,5	4,5_5	Σ_vivants
<i>Adercotryma glomeratum</i>	22		20		2	5	7	2	6	10	74
<i>Ammotium cassis</i>	6										6
<i>Arenoturrspirillina catinus</i>							1				1
<i>Bathysiphon crassatina</i>	9										9
<i>Buccella frigida</i>	2					1				4	7
<i>Cassidulina teretis</i>			2								2
<i>Cibicidoides lobatulus</i>			1								1
<i>Criboelphidium excavatum</i>	5	1	3			1				2	12
<i>Islandiella helenae</i>	6		1	1						1	9
<i>Islandiella norcrossi</i>	7						2		1	2	12
<i>Laganammina difflugiformis</i>	4						1				5
<i>Miliammina fusca</i>			2								2
<i>Nonionellina labradorica</i>	114	47	60	11	24	13	8	3	1	4	285
<i>Nonionoides turgida</i>	3		2								5
<i>Pyrgo williamsoni</i>	2										2
<i>Recurvoides contortus</i>	3		3							1	7
<i>Reophax fusiformis</i>	1	1	2				1				5
<i>Saccamina sp.</i>	7										7
<i>Silver saccamina</i>	1				1						2
<i>Triloculina oblonga</i>	1										1
<i>Triloculina trihedra</i>		1								1	2
<i>Uvigerina sp.</i>			1								1
<i>Verneuilinulla advena</i>			1								1
Indéterminé	1										1
Total	194	50	98	12	27	20	20	5	8	25	459
Volume théorique (mL)	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	883,6

Annexe 15 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station BC1.

AMD15 Station BC3	0_0,5	0,5_1	1_1,5	1,5_2	2_2,5	2,5_3	3_3,5	3,5_4	4_4,5	4,5_5	Σ_vivants
<i>Ammoglobigerina globigeriniformis</i>	3	1									4
<i>Bathysiphon crassatina</i>	13	5	6	2							26
<i>Cibicidoides lobatulus</i>	1										1
<i>Cribratomoides subglobosus</i>	4	2	2								8
<i>Crithionina hispida</i>	4	2	1	2							9
<i>Hormosinelloides guttifer</i>	29	12	7	1	2						51
<i>Hyperammina elongata</i>	4	1	2		3	1					11
<i>Laganammina arenulata</i>	9	5	5	12	3	2					36
<i>Laganammina difflugiformis</i>	5	3	6	7	1	3					25
<i>Melonis barleeanus</i>			2	4	9	1		1			17
<i>Portatrochammina karica</i>		1									1
<i>Recurvoides contortus</i>					1						1
<i>Reophax bilocularis</i>	2	5		1	2			1			11
<i>Reophax fusiformis</i>	6	1	1	3							11
<i>Reophax scorpiurus</i>	4	5	1								10
<i>Saccamina sp.</i>	1	2		3							6
<i>Silver saccamina</i>	2		2	1					1		6
<i>Thurammina sp.</i>	2	3	2		1						8
<i>Trochammina nana</i>	2										2
<i>Veleroninoides wiesneri</i>				3	13	3		2			21
Indéterminé											0
Total	91	48	37	39	35	10	0	4	1	0	265
Volume théorique (mL)	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	883,6

Annexe 16 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station BC3.

Annexes

AMD15 Station BC3	0_0,5	0,5_1	1_1,5	1,5_2	2_2,5	2,5_3	3_3,5	3,5_4	4_4,5	4,5_5	Σ_vivants
<i>Adercotryma glomerata</i>	43	3	4	16	14	4	5	40	12		141
<i>Ammoglobigerina globigeriniformis</i>	8	1		1	2						12
<i>Astrononion stellatum</i>	1										1
<i>Bathysiphon crassatina</i>	2			1							3
<i>Cibicoides lobatulus</i>	4										4
<i>Crithionina hispida</i>	3	2									5
<i>Glandulina ovula</i>	1										1
<i>Hyperammina elongata</i>	2	6									8
<i>Islandiella norcrossi</i>	7			1							8
<i>Labrospira crassimargo</i>	5	1						1			7
<i>Lagenammina arenulata</i>	47	13	3	2	1	1	2	6	1	1	77
<i>Lenticulina sp.</i>	1										1
<i>Nonionella stella</i>		2	1	4							7
<i>Nonionellina labradorica</i>	1	3	2								6
<i>Melonis barleeanus</i>	33	21	28	8	2		1	2	2		97
<i>Miliolina fusca</i>		1									1
<i>Portatrochammina karica</i>			1								1
<i>Pseudonodosinella nodulosa</i>	5	3									8
<i>Pyrgo sp.</i>	1										1
<i>Quinqueloculina sp.</i>	1										1
<i>Recurvoïdes contortus</i>	1										1
<i>Recurvoïdes turbinatus</i>	2							2			4
<i>Reophax bilocularis</i>	8	1	2					1			12
<i>Reophax fusiformis</i>	2	2									4
<i>Reophax scorpiurus</i>	32	3	3	2	1	1	1	9		2	54
<i>Reussolina laevis</i>	1										1
<i>Robertinoïdes charlottensis</i>		1									1
<i>Saccamina sp.</i>	1										1
<i>Silver saccamina</i>	11	5									16
<i>Stainforthia concava</i>	1										1
<i>Trochammina inflata</i>	1										1
<i>Verneuilinella concava</i>	1							1			2
<i>Indéterminé agglutinés</i>	2	1		1						1	5
Total	228	69	44	36	20	6	9	62	15	4	493
Volume théorique (mL)	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	883,6

Annexe 17 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station BC4.

Barents

Station 1	0_0,5	0,5_1	1_1,5	1,5_2	2_3	3_4	4_5	Σ_vivants
<i>Ammoglobigerina globigeriniformis</i>	1							1
<i>Bathysiphon filiformis</i>				2				2
<i>Bathysiphon sp.</i>			1					1
<i>Buccella frigida</i>	65		1					66
<i>Cassidulina teretis</i>	3							3
<i>Cibicides wuellerstorfi</i>	341	2	1	1	5	1	1	352
<i>Cribrostomoides subglobosa</i>	9							9
<i>Crithionina hispida</i>		7						7
<i>Cornuspira involvens</i>	1							1
<i>Eraditus foliaceus</i>	2							2
<i>Hormosinella guttifer</i>	18	1						19
<i>Ioanella tumidula</i>	32							32
<i>Laevidentalina communis</i>		1						1
<i>Lagena staphyllearea</i>	1							1
<i>Lagenamma arenulata</i>	14							14
<i>Lagenamma difflugiformis</i>	62	7				8	2	79
<i>Lagenamma sp.</i>	11	11		1				23
<i>Nonionoides sp.</i>	1							1
<i>Oridorsalis tenerus</i>	10	1						11
<i>Parafissurina lateralis</i>	1		1					2
<i>Parelloides sp.</i>	1	1			9			11
<i>Pyrgo murrhina</i>	9							9
<i>Pyrgo williamsoni</i>	2	1			2		1	6
<i>Quinqueloculina arctica</i>	2							2
<i>Rhizammina algaeformis</i>	3	1	3					7
<i>Reophax agglutinatus</i>	1	1						2
<i>Reophax delicatus</i>	1							1
<i>Reophax nodulosus</i>	3							3
<i>Reophax scorpiurus</i>	8							8
<i>Rosalina globularis</i>	2							2
<i>Saccamminid white</i>	4							4
<i>Saccorhiza ramosa</i>					1			1
<i>Silver saccamminid</i>	1	2			1			4
<i>Thurammina albicans</i>	7							7
<i>Triloculina frigida</i>	8							8
<i>Vaginulina linearis</i>			1					1
Indéterminé	1	2					1	4
Total	625,00	38,00	8,00	4,00	18,00	9,00	5,00	707
Volumes réels mesurés (mL)	58,00	53,00	42,00	32,00	77,00	75,00	63,00	400,00

Annexe 18 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 1.

Annexes

Station 2	0_0,5	0,5_1	1_1,5	1,5_2	2_3	3_4	4_5	Σ_vivants
<i>Adercotryma glomerata</i>					1			1
<i>Ammoglobigerina globigeriniformis</i>		1						1
<i>Astrorhyza granulosa</i>			1					1
<i>Bathysiphon filiformis</i>			2					2
<i>Buccella tenerrima</i>	3	4			2	3	1	13
<i>Cassidulina teretis</i>	31	5	2					38
<i>Cassidulina reniforme</i>		1						1
<i>Cornuspira involvens</i>	3					1		4
<i>Crithionina hispida</i>	1							1
<i>Fissurina marginata</i>	2	1						3
<i>Hormosinella guttifer</i>	6	3						9
<i>Lagenammina arenulata</i>	24	9	23	16	12	21	2	107
<i>Lenticulina sp.</i>			1					1
<i>Lobatula lobatula</i>	18		2		1			21
<i>Melonis barleeanus</i>	2	6	31	46	137	25		247
<i>Nonionoïdes sp.</i>	3		1		5	3		12
<i>Portatrochammina karica</i>	12		4		1	1		18
<i>Pullenia bulloides</i>	21	11	13	3	2	7	1	58
<i>Pyrgo sp.</i>	8		2	3				13
<i>Pyrgo williamsoni</i>	14	2	17	7	2			42
<i>Quinqueloculina seminula</i>	10	1						11
<i>Rhizammina algaeformis</i>		2	1					3
<i>Rhabdammina linearis</i>	4	1	6	1				12
<i>Rhabdammina sp.</i>					1			1
<i>Recurvoïdes turbinata</i>	1							1
<i>Reophax micaceus</i>	45	12	9		6	1		73
<i>Reophax nodulosus</i>			1					1
<i>Reophax scorpiurus</i>	7				2	3	1	13
<i>Saccorhiza ramosa</i>	2							2
<i>Saccamminid white</i>	10	5	1					16
<i>Silver saccamminid</i>	1							1
<i>Trifarina angulosa</i>	11	3	2		1	1	1	19
<i>Triloculina oblonga</i>	16	1						17
<i>Triloculina trihedra</i>	6			1				7
<i>Veleroninoides wiesneri</i>			1		13	1		15
Indéterminé			1	1	3	2		7
Total	261	68	121	78	189	69	6	792
Volumes mesurés (mL)	36	30	43	33	57	61	63	323

Annexe 19 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 2.

Annexes

Station 3	0_0,5	0,5_1	1_1,5	1,5_2	2_3	3_4	4_5	Σ_vivants
<i>Buccella frigida</i>	15	6	1					22
<i>Cassidulina reniforme</i>	1							1
<i>Cibicides wuellerstorfi</i>	516	77	15	3	4			615
<i>Crithionina hispida</i>	7	14	11	1				33
<i>Cornuspira involvens</i>	3							3
<i>Eraditus foliaceus</i>	6							6
<i>Fissurina marginata</i>	7	1	1					9
<i>Fissurina subformosa</i>			1					1
<i>Hormosinella guttifer</i>	13	1						14
<i>Ioanella tumidula</i>	40	10	6	1				57
<i>Lagenammina arenulata</i>		4		1				5
<i>Lagenammina difflugiformis</i>	6							6
<i>Oridorsalis tenerus</i>	323	33	7	6	3	1		373
<i>Parelloides sp.</i>		1	2	2	10	1		16
<i>Pyrgo depressa</i>	1							1
<i>Pyrgo murrhina</i>	11	1						12
<i>Quinqueloculina arctica</i>	1							1
<i>Quinqueloculina sp</i>	2							2
<i>Rhizammina algaeformis</i>	2	3	4	3	3		1	16
<i>Reophax nodulosus</i>	6							6
<i>Saccamminid sp.</i>	2							2
<i>Saccamminid white</i>		20						20
<i>Silver saccamminid</i>	2	3	27	24	1			57
<i>Trifarina angulosa</i>		1						1
<i>Triloculina oblonga</i>	1	2						3
<i>Triloculina trihedra</i>	9							9
Indéterminé	3	3	2					8
Total	977,00	180,00	77,00	41,00	21,00	2,00	1,00	1299
Volumes réels mesurés (mL)	35,5	40,5	35	34	62	62	68	337,00

Annexe 20 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 3.

Annexes

Station 4	0_0,5	0,5_1	1_1,5	1,5_2	2_3	3_4	4_5	Σ vivants
<i>Adercotryma glomerata</i>	42	6	2	2		1		53
<i>Ammonodiscus sp.</i>	1	1				1		3
<i>Bathysiphon crassatina</i>	1		1					2
<i>Buccella frigida</i>	20	6	3	5			1	35
<i>Cibicides parrelloides</i>				1			1	2
<i>Cibicides wuellerstorfi</i>	791	69	26	29	23	6	6	950
<i>Cribrostomoides subglobosa</i>	52	45	43	7	10	11	20	188
<i>Eraditus foliaceus</i>	3							3
<i>Fissurina sp</i>			1	1				2
<i>Fissurina subformosa</i>	1							1
<i>Hormosinella guttifer</i>	43	5	3		1	2		54
<i>Ioanella tumidula</i>	72	8	4	4	3	2	1	94
<i>Laevidentalina communis</i>							2	2
<i>Lagena staphyllearea</i>	5							5
<i>Lagenamma arenulata</i>		3				1	1	5
<i>Lagenamma difflugiformis</i>	217	48	91	61	39	18	3	477
<i>Lagenamma sp.</i>	4	2	1					7
<i>Miliolinella valvularis</i>		2						2
<i>Oridorsalis tenerus</i>	3							3
<i>Parelloides sp.</i>			1					1
<i>Pullenia bulloides</i>	2							2
<i>Pyrgo depressa</i>	19	11	11	6	9	3		59
<i>Pyrgo murrhina</i>		9	4	2	3			18
<i>Quinqueloculina seminula</i>		1						1
<i>Quinqueloculina sp</i>			1					1
<i>Rhizammina algaeformis</i>	5	3	1					9
<i>Reophax agglutinans</i>	23							23
<i>Reophax fusiformis</i>	2	1	3		2		2	10
<i>Reophax micaceus</i>				5		2		7
<i>Reophax nodulosus</i>	9							9
<i>Reophax scorpiurus</i>	21	5	1			2		29
<i>Reophax sp.</i>	4							4
<i>Robertinoides</i>	2							2
<i>Saccammina white</i>	51	11	3	1		1		67
<i>Saccammina spherica</i>		1	1			1		3
<i>Saccorhiza ramosa</i>	3							3
<i>Silver saccamminid</i>	2	4	3	1				10
<i>Thurammina albicans</i>	6				5	3	1	15
<i>Triloculina frigida</i>	17	5		2	1			25
<i>Triloculina oblonga</i>		2						2
<i>Veleroninoides wiesneri</i>						5		5
Indéterminé	1			1				2
Total	1422,00	248,00	204,00	128,00	96,00	59,00	38,00	2195
Volumes réels mesurés (mL)	52	32	41	35	69,5	62	79	370,50

Annexe 21 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 4.

Annexes

Station 6	0_0,5	0,5_1	1_1,5	1,5_2	2_3	3_4	4_5	Σ_vivants
<i>Ammodiscus catinus</i>	1	1			1			3
<i>Ammoglobigerina globigeriniformis</i>	40	28	5	23	2			98
<i>Buccella frigida</i>	4	8						12
<i>Buccella tenerrima</i>		2						2
<i>Cassidulina neoteretis</i>	56	25	2	2	1			86
<i>Cassidulina reniforme</i>	9	2			1			12
<i>Cibicides wuellerstorfi</i>	47	2	1	3				53
<i>Cribrostomoides subglobosum</i>	113	17		2		1		133
<i>Crithionina hispida</i>	1							1
<i>Cuneata arctica</i>	1							1
<i>Fissurina sp.</i>	2	2						4
<i>Hormosinella guttifer</i>	68	27	3	1	7			106
<i>Ioanella tumidula</i>	4	3		1	1			9
<i>Lagenammia arenulata</i>	122	84	13	24	19			262
<i>Lagenammia difflugiformis</i>	697	99	28	23	21	8	6	882
<i>Lagenammia sp.</i>	7							7
<i>Melonis barleeanus</i>		2	2	12	38	16	1	71
<i>Oridorsalis tenerus</i>	2	2						4
<i>Pullenia bulloides</i>	2	5	1	2	1			11
<i>Pyrgo williamsoni</i>				1	1			2
<i>Quinqueloculina sp.</i>	3	1						4
<i>Quinqueloculina seminula</i>	2							2
<i>Recurvoides contortus</i>	1	2		1	1	1		6
<i>Reophax fusiformis</i>	9	14			1			24
<i>Reophax micaceus</i>	49			1				50
<i>Reophax nodulosus</i>	2							2
<i>Reophax scorpiurus</i>	49	23	4	9	6			91
<i>Saccamminid white</i>	19	2	1					22
<i>Saccorhiza ramosa</i>		2	2	1				5
<i>Silver saccamminid</i>	2	7	4					13
<i>Stainforthia concava</i>	1							1
<i>Thurammina albicans</i>		2	5	7	3			17
<i>Triloculina oblonga</i>	17							17
<i>Triloculina trihedra</i>	1	1	1					3
<i>Trochammina sp.</i>		1						1
<i>Veleroninoides wiesneri</i>	1	3	5	4	1	3		17
<i>indetermines</i>	10	4	2	1	2			19
Total	1342	371	79	118	107	29	7	2053
Volumes réels mesurés (mL)	49	33,5	33,5	31	51	80	79	357

Annexe 22 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 6.

Annexes

Station 9	0_0,5	0,5_1	1_1,5	1,5_2	2_3	3_4	4_5	Σ_vivants
<i>Adercotryma glomerata</i>						6		6
<i>Ammoglobigerina globigeriniformis</i>	4	1	3	1	1	4		14
<i>Arenoturrspirillina catinus</i>	3	1						4
<i>Astrononion hamadaense</i>	3			1				4
<i>Astrononion stellatum</i>			1			1		2
<i>Buccella frigida</i>	5					11	2	18
<i>Buccella tenerrima</i>	2	3	2		4	2		13
<i>Cassidulina neoteretis</i>	46	15	3	1		3	1	69
<i>Cassidulina reniforme</i>	4						1	5
<i>Cibicoides lobatulus</i>	84	20	8	17		3		132
<i>Crithionina hispida</i>	1		1					2
<i>Fissurina sp.</i>	1						1	2
<i>Glomospira gordialis</i>		1						1
<i>Hormosinelloides guttifer</i>	6		1					7
<i>Hyperammina elongata</i>		1						1
<i>Karrerella novangliae</i>	1	4	2					7
<i>Lagenammina arenulata</i>	25	14	3	4	12	27	5	90
<i>Lagenammina difflugiformis</i>	3				1			4
<i>Lenticulina convergens</i>	2							2
<i>Melonis barleeanus</i>	7	15	26	30	52	68	2	200
<i>Nonionella labradorica</i>					1			1
<i>Nonionoides turgidus</i>	1		1	1	10	16		29
<i>Portatrochammina karica</i>	4	2	2	1	1	2		12
<i>Pullenia bulloides</i>	35	29	11	4	4	19	3	105
<i>Pullenia quinqueloba</i>		1	2	1	6			10
<i>Pyrgo sp.</i>		6						6
<i>Quinqueloculina sp.</i>	6	2						8
<i>Recurvoides contortus</i>						1		1
<i>Reophax bilocularis</i>	3			1		1		5
<i>Reophax fusiformis</i>	18				1			19
<i>Reophax nodulosus</i>			1					1
<i>Reophax scorpiurus</i>	15	2				6		23
<i>Rhabdammina abyssorum</i>	18	17	3	3	1	1		43
<i>Rhizammina algaeformis</i>	6	1			1			8
<i>Robertinoides charlottensis</i>	1							1
<i>Saccorhiza ramosa</i>	2							2
<i>Silver saccamminid</i>	1		1					2
<i>Trifarina angulosa</i>	13					4		17
<i>Triloculina oblonga</i>	1							1
<i>Triloculina trigonula</i>	6			1				7
<i>white saccamminid (long)</i>					6			6
<i>Indéterminé</i>	5		1	2				8
Total	332	135	72	68	101	175	15	898
Volume mesuré (mL)	42	36	30,5	35,5	64	51	68	327

Annexe 23 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 9.

Annexes

Station 11	0_0,5	0,5_1	1_1,5	1,5_2	2_3	3_4	4_5	Σ_vivants
<i>Adercotryma glomerata</i>	8	2	4	5	4	1	1	25
<i>Ammoglobigerina globigeriniformis</i>	9	3	3					15
<i>Arenoturrispirillina catinus</i>	7	3	2					12
<i>Astrononion hamadaense</i>	20	14	7	3	4	9	5	62
<i>Buccella frigida</i>	24	10		24	23		53	134
<i>Buccella tenerrima</i>	14	2	4	1		52		73
<i>Bulimina sp.</i>		2	1	5	19	1	1	29
<i>Cassidulina neoteretis</i>	129	48	11	1	2	2		193
<i>Cassidulina reniforme</i>	14	5	2				1	22
<i>Cibicidoides lobatulus</i>	31							31
<i>Cornuspira involvens</i>		1			1			2
<i>Criboelphidium excavatum</i>	4	7		4	3		8	26
<i>Crithionina hispida</i>	2							2
<i>Favulina hexagona</i>	3							3
<i>Fissurina sp.</i>	2							2
<i>Hormosinelloides guttifer</i>	6							6
<i>Islandiella inflata</i>	4		1		2			7
<i>Islandiella norcrossi</i>	6	4						10
<i>Labrospira crassimargo</i>	10	1						11
<i>Lagenammia arenulata</i>	208	75	19	13	11	24	17	367
<i>Melonis barleeanus</i>	9	19	101	39	22	25	14	229
<i>Miliammina fusca</i>	1	2	3	1				7
<i>Nonionella digitata</i>			12	8	9	1	1	31
<i>Nonionella labradorica</i>	3	1	27	61	240	153	19	504
<i>Nonionoides turgidus</i>				1		1		2
<i>Portatrochammina karica</i>	12	6	2					20
<i>Pullenia bulloides</i>	7	12	5			1		25
<i>Pyrgo williamsoni</i>	12	4	1					17
<i>Quinqueloculina sp.</i>	1							1
<i>Reophax bilocularis</i>	103	11	7			8	7	136
<i>Reophax fusiformis</i>	20	8	6	1				35
<i>Reophax scorpiurus</i>	160	63	29	16	10	10	5	293
<i>Rhizammina algaeformis</i>			1					1
<i>Robertinoides charlottensis</i>	7		1	1				9
<i>Saccorhiza ramosa</i>	4	10	5	3				22
<i>Silver saccamminid</i>	3	6						9
<i>Thurammina albicans</i>	5		1					6
<i>Trifarina angulosa</i>	14	2		2				18
<i>Triloculina trigonula</i>	3		1		1			5
<i>white saccamminid (long)</i>	1		2	1				4
Indéterminé	5		3	1	3	5	2	19
Total	871	321	261	191	354	293	134	2425
Volume mesuré (mL)	36	31,5	38	36	59	62	70	332,5

Annexe 24 : Comptages totaux de foraminifères benthiques vivants (125 µm) de la station 11.

Annexes

Station 1	0_0,5	0,5_1	1_1,5	1,5_2	2_3	3_4	4_5	5_10
<i>Ammoglobigerina globigeriniformis</i>				6				
<i>Astrorhiza granulosa</i>	10	13	6	5	10	9	4	6
<i>Buccella frigida</i>	69	89	55	91	50	46	52	54
<i>Cassidulina neoteretis</i>	2		2	3		1	1	1
<i>Cassidulina reniforme</i>	5	3	4	7		2	4	3
<i>Cibicides wuellerstorfi</i>	314	244	138	180	215	181	172	271
<i>Criboelphidium excavatum</i>								1
<i>Crirostomoides subglobosum</i>	134	68	52	73	86	37	52	54
<i>Eratidus foliaceus</i>					1			
<i>Fissurina sp.</i>	2	3	8	7	7	2	6	5
<i>Glandulina sp.</i>					2		1	1
<i>Globobulimina sp.</i>						2		
<i>Hormosinelloides guttifer</i>	15	16	6	10	4	4	5	3
<i>Ioanella tumidula</i>	1	7	2	1	1		1	4
<i>Lagena striata</i>						1		
<i>Lagenammina difflugiformis</i>			2					
<i>Nonionella sp.</i>		1	1	2				1
<i>Oridorsalis umbonatus</i>	88	90	87	83	42	48	58	91
<i>Parrelloides sp.</i>	2	7	1			1	2	1
<i>Portatrochammina karica</i>		1						
<i>Pyrgo murrhina</i>	9	3	4	1	5	4	2	3
<i>Reophax agglutinatus</i>	7			2	2	1		
<i>Reophax scorpiurus sp.1</i>	2				4			
<i>Reophax spiculifer</i>		2						
<i>Reophax nodulosus</i>	5	3		3		2		
<i>Rhabdammina algaeformis</i>						1		
<i>Thurammina sp.</i>	4	2	4	2	1	1		
<i>Trifarina angulosa</i>		1						
<i>Triloculina trihedra</i>	1	11	11	9	4	6	6	2
Indéterminé	1	1	1	5	1			
Total	671	565	384	490	435	349	366	501

Annexe 25 : Comptages totaux de foraminifères benthiques morts (125 µm) de la station 1.

Annexes

Station 2	0_0,5	0,5_1	1_1,5	1,5_2	2_3	3_4	4_5	5_10
<i>Adercotryma glomerata</i>								1
<i>Ammoglobigerina globigeriniformis</i>								10
<i>Astrononion stellatum</i>		3				5	3	
<i>Astrorhyza granulosa</i>	23	27	26	5	6		1	
<i>Buccella terrenima</i>	8	23	18	16	8	28	12	14
<i>Bulimina marginata</i>					1			
<i>Cassidulina neoteretis</i>	14	30	23	15	14	17	16	51
<i>Cassidulina reniforme</i>	2	5	7	3	5	4	5	6
<i>Cibicides lobatulus</i>	15	7	15	12	10	12	12	50
<i>Cornuspira involvens</i>	1	2	1				1	
<i>Criboelphidium excavatum</i>	1							
<i>Favulina hexagona</i>			1		1			
<i>Fissurina sp.</i>	1	3	1	1	3	1	4	3
<i>Glandulina sp.</i>				1				
<i>Globobulimina sp.</i>				1				
<i>Hormosinelloides guttifer</i>	1	6	6	4	9	5	1	
<i>Islandiella norcrossi</i>	13							
<i>Lagena spp.</i>		1			1		5	
<i>Lagena striata</i>				2		1		1
<i>Lagenamma arenulata</i>	95	98	136	117	143	146	131	18
<i>Lenticulina sp.</i>					1			
<i>Melonis barleeanus</i>	24	36	53	60	41	29	38	52
<i>Nodosaria pyrula</i>							1	
<i>Nonionoides grateloupii</i>	4	2			2			
<i>Nonionella labradorica</i>						2	1	1
<i>Nonionella turgida</i>				1	1			
<i>Pullenia bulloides</i>	15	7	14	12	5	16	10	15
<i>Pyrgo williamsoni</i>	6	3	2			1		
<i>Pyrgo sp.</i>	4							
<i>Quinqueloculina sp.</i>	1							
<i>Reophax micaceus</i>	25	22		5	7	15	8	
<i>Reophax pilulifer</i>								
<i>Reophax scorpiurus sp.1</i>	12		10	3	9	3		6
<i>Reophax spiculifer</i>		1						
<i>Rhabdammina linearis</i>	15	10	10	8	6	5	2	
<i>Saccorhiza ramosa</i>	8	13	17	11	17	8	5	
<i>Thurammina sp.</i>				3				
<i>Trifarina angulosa</i>	10	6	8	13	8	5	6	13
<i>Triloculina trihedra</i>	4	5	1	1	3		6	7
<i>Trochammina sp.</i>								1
<i>Uvigerina peregrina</i>							1	1
Indéterminé	3	2	1	5	1	3	1	3
Total	305	312	350	299	302	306	270	253

Annexe 26 : Comptages totaux de foraminifères benthiques morts (125 µm) de la station 2.

Annexes

Station 6	0_0,5	0,5_1	1_1,5	1,5_2	2_3	3_4	4_5	5_10
<i>Astrononion stellatum</i>		5	3	3			1	
<i>Buccella frigida</i>	3	10	10	7	3	9	10	
<i>Buccella tenerrima</i>			1					
<i>Bulimina marginata</i>		1						
<i>Cassidulina neoteretis</i>	170	209	166	78	85	80	50	
<i>Cassidulina reniforme</i>	19	38	26	7	8	23	9	
<i>Cibicides lobatulus</i>	16	20	17	1	9	10	5	
<i>Cibicides wuellerstorfi</i>		13	4	12	9	3		
<i>Criboelphidium excavatum</i>						2		
<i>Cribrostomoides subglobosum</i>	7	18	15	13	24	45	41	103
<i>Fissurina sp.</i>	2	1	2	2	1	1		
<i>Favulina hexagona</i>		1						
<i>Hormosinelloides guttifer</i>		20	24	13	7	5	5	
<i>Islandiella norcrossi</i>		1						
<i>Karreriella bradyi</i>				1				
<i>Lagena sp.</i>			1					
<i>Lagena striata</i>							1	
<i>Lagenamma arenulata</i>	11	88	90	48	71	105	135	64
<i>Lagenamma difflugiformis</i>		2	2	3	4		4	
<i>Melonis barleeanus</i>	13	38	29	30	27	29	36	3
<i>Nonionella labradorica</i>	2			1				
<i>Nonionella turgida</i>		2	1					
<i>Oridorsalis umbonatus</i>	8	10	5	7	11	5	11	
<i>Pullenia bulloides</i>	5	16	9	4	9	8	6	1
<i>Reophax agglutinatus</i>					10	10	5	
<i>Reophax scorpiurus sp.1</i>	2	26	28	69	44	23	21	
<i>Rhabdammina linearis</i>		4	2	3	4	2	1	1
<i>Saccamina sp.</i>	1						1	3
<i>Spirillina striatogranulosa</i>							2	
<i>Stainforthia fusiformis</i>		1						
<i>Textularia agglutinans</i>		1						
<i>Trifarina angulosa</i>		4	4	3		7	5	
<i>Triloculina trihedra</i>			1		1			
<i>Trochammina sp.</i>	1	2						
<i>Veloroninoides wiesneri</i>						1		
Indéterminé	1	1	1	3		1		2
Total	261	532	441	308	327	369	349	177

Annexe 27 : Comptages totaux de foraminifères benthiques morts (125 µm) de la station 6.

Posters présentés pendant la thèse



Distribution of living benthic foraminifera in Baffin Bay and Nares Strait

Calypso RACINE^a, Jérôme BONNIN^a, Jacques GIRAUDEAU^a, Guillaume MASSE^b

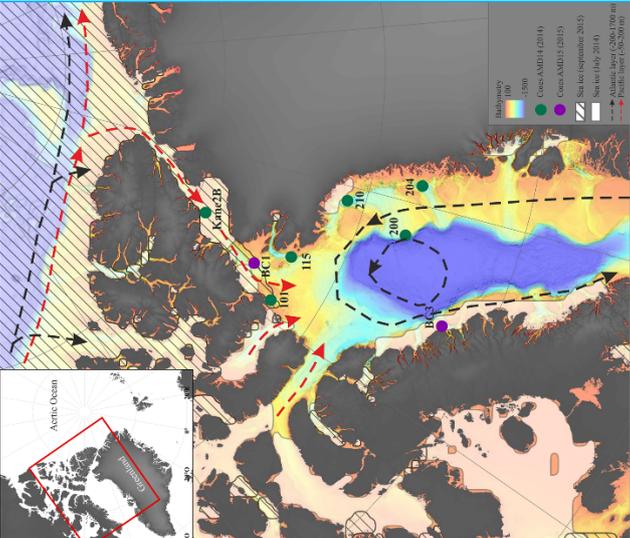
^aEPOC UMR 5805 University Bordeaux, Avenue Geoffroy St-Hilaire, 33615 Pessac CEDEX
^bTakuvik Joint International Laboratory, University Laval, Pavillon Alexandre Vachon, 1045, avenue de la Médecine, local 2078, Québec, Canada



Context

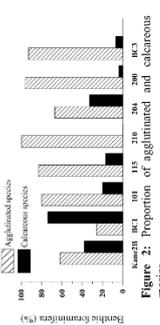
Benthic foraminifera are often used as bio-indicators of past environmental conditions as they classically reflect surface productivity. Little is known concerning their distribution and ecology in the Arctic ocean. Their response to recent climate warming in a context of rapidly changing sea-ice cover and therefore primary productivity is not well understood. The present investigation illustrates patterns of diversity and density of living benthic foraminifera in surface sediments of northern Baffin Bay and Nares Strait (samples collected as part of the summer 2014 and 2015 ARCTICNET/ GREENEDGE campaigns).

Study area



Results

Proportion of agglutinated foraminifera and carbonate dissolution evidence



Calcareous species are more abundant in the Nares Strait and northernmost Baffin Bay

Agglutinated species dominant at deepest stations where calcareous tests present marks of alteration

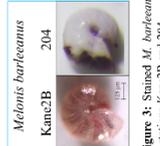


Figure 3: Stained *M. barleeanus*, at stations Kanc2B and 204.

Density and diversity of living benthic foraminifera

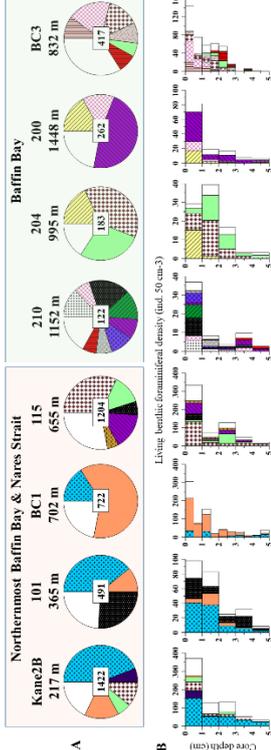


Figure 4: A) Total Standing Stock (numbers in center of pie charts, number of individual by 100 cm²) and dominant species >125 µm over the top 5 cm of the sediment column. B) Vertical distribution of dominant species >125 µm (faunal density, ind. 50cm⁻³).

Interpretations

Corrosiveness of deep Baffin Bay water masses with regard to carbonates (depth range of Carbonate Compensation Depth = 600 – 900 msl) ; Aksu, 1983) essentially may explain the proportions of calcareous vs. agglutinated foraminifera as well as (partly) foraminiferal density changes in various sector of northern Baffin Bay.

Food availability, a function of primary productivity, drives high benthic foraminiferal density in the northernmost NWP-influenced region.

The relative proximity of the sample stations to the marginal ice zone, a sector where primary productivity is classically enhanced, during summers 2014 and 2015, additionally concurs to the observed spatial pattern of foraminiferal density.

Additional work on foraminiferal ecology is still needed in order to use faithfully benthic foraminifera as bio-indicator for reconstructions of paleo sea-ice cover and primary productivity in the arctic/subarctic realms.

Chlorophyll a concentration

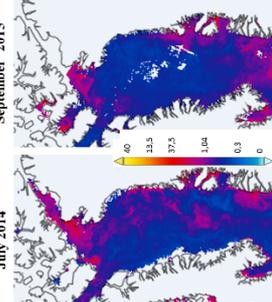


Figure 5: Time-averaged map of chlorophyll a concentration expressed in mg·m⁻³, for July 2014 and September 2015 (4 km resolution MODIS-Aqua data, derived from NASA's Giovanni application)

Highest faunal density in North Water Polynia (NWP)-influenced sector, with *N. labradorica* and *A. glomerata* as index species.

Classical vertical distribution, showing decrease of density with increasing depth in the sediment, suggesting absence of bioturbation.

The highly calcified species *M. barleeanus* is the only calcareous taxa present in deepest Baffin Bay stations.

Annexe 28 : Poster présenté à la conférence Arctic Change 2017 (Québec).



Distribution of living benthic foraminifera in the western Barents Sea

Calypso RACINE^a, Jérôme BONNIN^a, Jacques GIRAUDEAU^a, Sébastien ZARAGOSI^a, Thierry GARLAN^b

^aEPOC UMR 5805 University Bordeaux, Avenue Geoffroy St Hilaire, 33615 Pessac CEDEX
^bSHOM, Service Hydrographique et Oc anographique de la Marine, 13 rue du Chatellier, 29200 Brest, France

calypso.racine@u-bordeaux.fr

Context

Living (Rose Bengal stained) benthic foraminifera were investigated in surface sediments from the western Barents Sea, a subarctic environment strongly impacted by climate warming. In this area, the warmer Atlantic water largely influences intensity and seasonality of the primary productivity and therefore affects the benthic life.

Six surface sediment cores (Fig. 1) were retrieved during the MOCOSED 2014 cruise in August-September 2014 along a south-north transect in the western Barents shelf and slope, from northern Norway to southern Svalbard at water depth ranging from 325 m to 2650 m. Living benthic foraminifera in the fraction >125  m (Fig. 2) were studied together with several sedimentological and geochemical parameters (Fig. 3, sediment grain size, total organic carbon, interstitial water oxygen profiles,  ¹³C,  ¹⁵N).

Study area

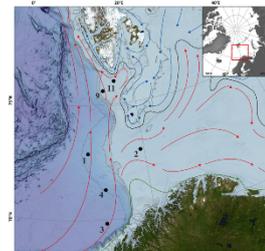
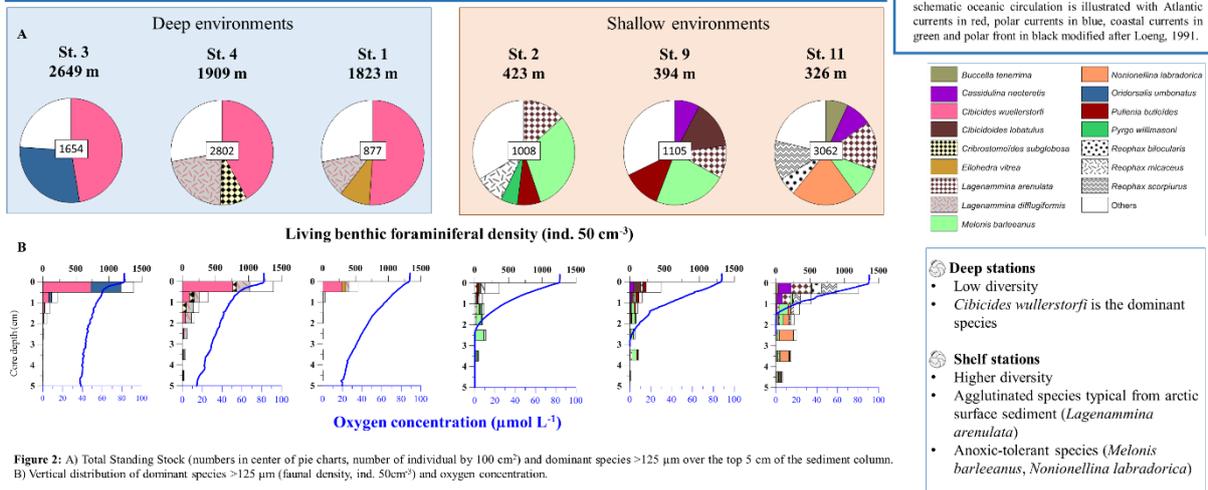
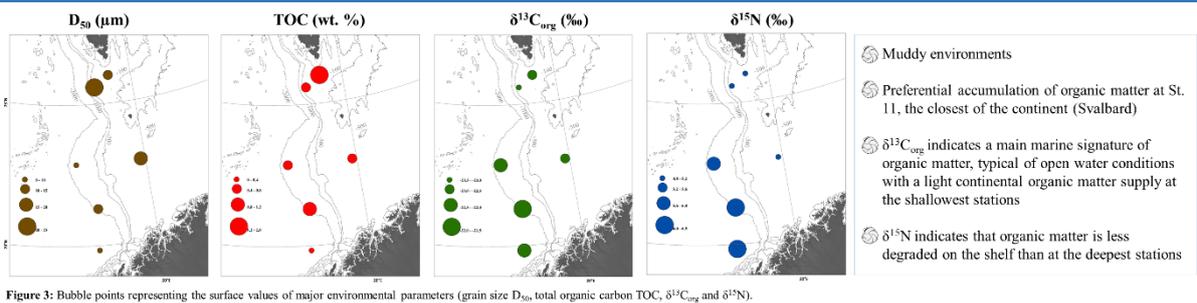


Figure 1: Map of the study area, the western Barents Sea with coring stations (multicores from cruise MCS14). A schematic oceanic circulation is illustrated with Atlantic currents in red, polar currents in blue, coastal currents in green and polar front in black modified after Loeng, 1991.

Living benthic foraminifera



Sedimentological and geochemical data



Interpretations

- Organic matter is not controlled by grain size, muddy sediments cover the whole study area
- Deep environments dominated by *C. wuellerstorfi*, different from shallow environments most likely related to phytodetritus quality ( ¹⁵N) more degraded in deep sediments
- One rich organic matter station (St. 11) is characterised by oxygen depletion, high faunal density and diversity and anoxic-tolerant species (*N. labradorica*)
- Larger productivity at St. 11 could be due to Svalbard derived nutrients or to the presence of the polar front; increasing both ventilation and nutrients supply

Annexe 29 : Poster présenté à la conférence Forams2018 (Edimbourg).