



**HAL**  
open science

# Reconstruction paléocéanographique à partir d'assemblages de diatomées et de foraminifères dans le Sud-Est Pacifique depuis la dernière période glaciaire

María Elisabeth Teca Oliva

► **To cite this version:**

María Elisabeth Teca Oliva. Reconstruction paléocéanographique à partir d'assemblages de diatomées et de foraminifères dans le Sud-Est Pacifique depuis la dernière période glaciaire. Biodiversité et Ecologie. Université Paris-Saclay, 2023. Français. NNT : 2023UPASJ005 . tel-04098512

**HAL Id: tel-04098512**

**<https://theses.hal.science/tel-04098512>**

Submitted on 16 May 2023

**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.

# Reconstruction paléocéanographique à partir d'assemblages de diatomées et de foraminifères dans le Sud-Est Pacifique depuis la dernière période glaciaire

*Paleoceanographic reconstruction from diatom and foraminiferal assemblages in the Southeast Pacific since the last glacial period*

## Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n° 579 : Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences (SMEMAG)

Spécialité de doctorat : Géosciences

Graduate School : Géosciences, climat, environnement et planètes

Référent : Faculté des sciences d'Orsay

Thèse préparée dans les unités de recherche : **GEOPS (Université Paris-Saclay, CNRS)** et **Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (Université Paris-Saclay, CNRS, CEA, UVSQ)**

sous la direction de **Giuseppe SIANI**, professeur, le co-encadrement de **Elisabeth MICHEL**, chercheuse

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 26 janvier 2023, par

**María Elisabeth TECA OLIVA**

## Composition du Jury

Membres du jury avec voix délibérative

### **Xavier QUIDELLEUR**

Professeur, Laboratoire GEOPS,  
Université Paris-Saclay

Président

### **Nejib KALLEL**

Professeur, Université de Sfax

Rapporteur & Examineur

### **Mary ELLIOT**

Professeure, Université de Nantes

Rapporteuse & Examinatrice

### **Xavier CROSTA**

Directeur de Recherche CNRS,  
Université de Bordeaux

Examineur

**Titre :** Reconstruction paléocéanographique à partir d'assemblages de diatomées et de foraminifères dans le Sud-Est Pacifique depuis la dernière période glaciaire

**Mots clés :** Paléocéanographie, Pacifique Sud-Est, fronts océaniques, diatomées, foraminifères.

**Résumé :** Dans le contexte du réchauffement climatique, les données paléoclimatiques à différentes échelles temporelles et spatiales sont essentielles pour appréhender les mécanismes et les processus climatiques. La Patagonie chilienne (41°S à 56°S), traversée par les Andes du nord au sud, représente une contrainte topographique majeure sur la circulation océanique et atmosphérique. C'est la seule région qui intercepte toute la ceinture des vents d'ouest et représente donc une zone clé pour l'étude des changements paléoenvironnementaux dans l'hémisphère sud et la compréhension des mécanismes océan-atmosphère et de leurs interactions entre les moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère sud. Dans ce contexte, les objectifs principaux de cette thèse sont : (1) de réaliser des analyses d'assemblages de diatomées sur des sédiments marins profonds collectés le long de la marge sud-chilienne à partir de trois carottes océaniques localisées selon un transect latitudinal entre 41°S et 49°S de la dernière période glaciaire à l'Holocène, (2) d'évaluer leurs liens avec les changements paléohydrologiques régionaux. L'analyse des assemblages de diatomées reflète la proximité des carottes marines à la côte de la marge Patagonienne. Tout au long de la période étudiée, les pourcentages des espèces côtières et benthiques diminuent du Nord vers le Sud tandis que ceux des espèces océaniques subantarctiques, inexistantes au nord, augmentent vers le sud. Au-delà de l'influence très importante d'un environnement plus côtier pour

les assemblages de diatomées, l'étude des 3 carottes a permis de mettre en évidence des variations régionales liées aux changements des différents courants et de l'influence des différentes masses d'eau. Pendant la dernière période glaciaire, les assemblages de diatomées des 3 carottes étudiées ne montrent pas une présence importante d'espèces associées au groupe subantarctique -polaire, de sorte qu'aucun rapprochement du front subantarctique (SAF) de nos sites n'est observé pendant cette période. Tout le long de la période étudiée dans les carottes, le taxon de diatomées associées à une importante présence de macronutriments (*Chaetoceros* spp.) était dominant avec les plus forts pourcentages au cours de la déglaciation. Cette augmentation est associée soit à la reprise de l'upwelling Austral soit à la plus grande influence de l'eau équatoriale de sub-surface (ESSW) riche en nutriments. Enfin au début de l'Holocène, l'augmentation relative des diatomées planctoniques côtières suggère l'influence des eaux continentales qui conduit à un apport accru de micronutriments et des faibles salinités. Pour la carotte plus océanique, cette période est marquée par une forte augmentation des espèces subantarctiques d'océan ouvert (*F. kerguelensis*, *A. tabularis*), apportées par une intensification du courant circumpolaire (ACC). Ces deux effets s'expliquent par une intensification des vents d'ouest.

**Title :** Paleoceanographic reconstruction from diatom and foraminiferal assemblages in the southeast Pacific since the last glaciation

**Keywords :** Paleoceanography, South East Pacific, oceanic fronts, diatoms, foraminifera.

**Abstract :** In the context of global warming, palaeoclimatic records at different temporal and spatial scales are essential to understanding climate processes and mechanisms. Chilean Patagonia (41°S to 56°S), crossed by the Andes from north to south, represents a major topographic barrier to oceanic and atmospheric circulation. It is the only region that intercepts the entire Southern Westerlies Winds (SWW) and therefore represents a key area for the study of palaeoenvironmental changes in the Southern Hemisphere as well as for the understanding of ocean-atmosphere mechanisms and their interactions between the middle and high latitudes of the Southern Hemisphere. In this perspective, the main objectives of this thesis are: (1) to carry out analyses of diatom assemblages in deep marine sediments collected along the southern Chilean margin from three ocean cores located along a latitudinal transect between 41°S and 49°S since the last glacial, (2) to assess their relationship to regional palaeohydrological changes. The analysis of diatom assemblages reflects the proximity of the marine cores to the coastal Patagonian margin. Throughout the period studied, the percentages of coastal benthic species decrease from north to south while those of subantarctic oceanic species, which are absent in the north, increase towards the south.

Beyond the very important influence of a more coastal environment for the diatom assemblages, the study of the 3 cores made it possible to highlight regional variations linked to changes in the various currents and the influence of the different water masses. During the last glacial period, the diatom assemblages of the 3 studied cores do not show a significant presence of species associated with the subantarctic-polar group, so that no proximity of the subantarctic front (SAF) to our sites is observed during this period. Throughout the period recorded in the cores, the macronutrient-rich diatom taxon (*Chaetoceros* spp.) was dominant with the highest percentages during the deglaciation. This increase is associated either with the resumption of the Southern Ocean upwelling either the greater influence of nutrient-rich equatorial subsurface water (ESSW). Finally, during the Holocene, the increased presence of coastal planktonic diatoms suggests the influence of continental waters leading to an increased supply of micronutrients and low salinities. For the most oceanic core, this period is marked by a strong increase in open ocean subantarctic species (*F. kerguelensis*, *A. tabularis*), driven by an intensification of the circumpolar current (ACC). Both changes would be the result of SWW intensification.



Cette thèse a été financée par l'Agence nationale pour la recherche et le développement  
(ANID) du Chili par le biais des bourses Chile,  
appel à doctorat à l'étranger 2018.



## Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation et qui m'ont accompagné durant ces années de doctorat.

Je tiens tout d'abord à remercier Madame Mary Elliot et Monsieur Najib Kellel rapporteurs de cette thèse ainsi que Messieurs Xavier Crosta et Xavier Quidelleur qui ont accepté de s'intéresser à ce travail et de faire partie de ce jury.

Je suis particulièrement reconnaissante envers Xavier Crosta, qui m'a accueilli dans son équipe à l'Université de Bordeaux en m'apportant son soutien et ses connaissances dans ma passion "les diatomées". Merci pour le temps que vous m'avez consacré pour améliorer la préparation des échantillons et pour l'identification des diatomées étape par étape et surtout pour votre générosité en me transmettant vos connaissances personnelles sur les diatomées.

Je tiens également à remercier mes directeurs de thèse, Elisabeth Michel et Giuseppe Siani, pour leur soutien inconditionnel, tant sur le plan scientifique que personnel. Ce sont des personnes formidables et je n'ai pas besoin de l'écrire, elles le montrent par leur façon d'être.

Merci à Gulay et Giuseppe pour leur patience à m'enseigner les foraminifères la première année, alors que je ne maîtrisais pas le français et que j'avais du mal à comprendre.

Un grand merci également au directeur de l'école doctorale SMEMAG, Xavier Quidelleur, pour sa disponibilité à tous moments et pour son souci de répondre à toutes mes questions. Merci au laboratoire GEOPS et l'équipe PALEOCEAN du LSCE pour leur accueil.

Enfin, je tiens également à remercier mon mari Isaac pour avoir participé à mes pleurs et à mes rires. Un grand merci également à Consuelo Martinez, pour nos longues conversations sur la vie et pour m'avoir toujours répété : "nous allons y arriver". Je ne veux pas oublier Francisco, un autre compatriote chilien avec qui j'ai partagé un bureau cette dernière année, merci pour ta compagnie et pour m'avoir apporté le "manjar Colun".

Et pour finir, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont soutenu à distance depuis le Chili tout au long de ces années (je ne les citerai pas un par un car je ne veux oublier personne) : mes parents, mes frères, "le groupe des cousins", "le groupe familial", mes amis, merci beaucoup, vous savez que vous êtes toujours dans mon cœur.







## Sommaire

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1: Contexte du Sud-Est Pacifique.....</b>	<b>7</b>
1.1. Contexte géographique et géologique .....	7
1.2. Circulation atmosphérique .....	10
1.3. Circulation océanique.....	11
1.3.1. Circulation de surface.....	11
1.3.2. Circulation profonde.....	13
<b>Chapitre 2: Matériel et méthodes .....</b>	<b>17</b>
2.1. Carottes étudiées.....	17
2.2. Modèle d'âge .....	17
2.3. Les traceurs micropaléontologiques.....	18
2.3.1. Les foraminifères planctoniques.....	18
2.3.2. Les diatomées .....	22
2.4. Les traceurs géochimiques : les isotopes de l'oxygène.....	30
2.4.1. $\delta^{18}\text{O}$ <i>G. bulloides</i> carotte MD07-3081 .....	30
2.4.2. $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer de surface.....	31
<b>Chapitre 3: Base de données des diatomées dans le secteur Pacifique et Atlantique de l'océan Austral .....</b>	<b>35</b>
3.1. Paramètres de classification des diatomées.....	35
3.2. Compilation de la base de données des diatomées.....	37
3.3. Principaux Taxons de diatomées dans les secteurs Pacifique et Atlantique de l'océan Austral .....	38
3.3.1. Nutriments abondants .....	40
3.3.2. Groupe Planctonique-côtier.....	41
3.3.3. Groupe Benthique-côtier .....	43
3.3.4. Groupe Subtropical.....	43
3.3.5. Groupe Polaire.....	47
3.3.6. Groupe Antarctique .....	50
<b>Chapitre 4: L'enregistrement des 20 derniers ka dans la carotte MD07-3081 .....</b>	<b>55</b>
<b>Paleoceanographic reconstruction based on diatom and foraminiferal assemblages in the South East Pacific since the Late Glacial.....</b>	<b>56</b>
I. Introduction .....	56
II. Study area.....	58
III. Material and methods .....	60
III.1. Radiocarbon dating.....	60
III.2. Oxygen stable isotope analyses ( $\delta^{18}\text{O}$ ).....	62
III.3. Planktonic Foraminifera analyses.....	63
III.4. SST by Modern Analogue Technique (MAT).....	63

III.5.	Diatom analysis .....	64
III.6.	Statistical analysis .....	65
IV.	Results .....	65
IV.1.	Age Model.....	65
IV.2.	<i>G. bulloides</i> $\delta^{18}\text{O}$ .....	65
IV.3.	Foraminiferal assemblages and paleotemperatures .....	67
IV.4.	Diatom abundances and assemblages.....	70
IV.5.	PCA .....	75
V.	Discussion .....	77
V.1.	Late Glacial .....	77
V.2.	Deglaciation.....	78
V.3.	Holocene.....	80
VI.	Conclusions .....	82
VII.	Supplementary information.....	82
VIII.	References .....	83
<b>Chapitre 5: Reconstitution des conditions climatiques et hydrologiques dans les eaux de surface du SEP depuis la dernière période glaciaire à partir des assemblages de diatomées .....</b>		<b>91</b>
5.1.	Données nouvelles discutées dans le chapitre.....	91
5.2.	Abondance et assemblages des diatomées dans la carotte MD07-3100 .....	91
5.2.1.	Groupe Nutriments abondants .....	92
5.2.2.	Groupe Planctonique-côtier.....	93
5.2.3.	Groupe Benthique-côtier .....	93
5.2.4.	Groupe Subtropical.....	94
5.2.5.	Résultats de l'analyse en composantes principales de l'assemblage des diatomées de la carotte MD07-3100.....	97
5.2.6.	Synthèse de principaux résultats de la carotte MD07-3100 .....	98
5.3.	Abondance des diatomées dans la carotte MD07-3088 .....	100
5.3.1.	Groupe Nutriments abondants.....	101
5.3.2.	Groupe Planctonique-côtier.....	101
5.3.3.	Groupe Benthique-côtier .....	101
5.3.4.	Groupe Subtropical.....	102
5.3.5.	Groupe Polaire.....	102
5.3.6.	Résultats de l'analyse en composantes principales de l'assemblage des diatomées de la carotte MD07-3088.....	106
5.3.7.	Synthèse des principaux résultats de la carotte MD07-3088.....	107
5.4.	Comparaison des assemblages de diatomées le long du transect latitudinal 41-49° S .....	108
<b>Chapitre 6: Conclusions et perspectives .....</b>		<b>117</b>
6.1.	Perspectives.....	123
<b>Références bibliographiques.....</b>		<b>125</b>
<b>Annexes.....</b>		<b>138</b>



## Liste des figures

- Figure 0.1** **A)** Concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> (ppmv) des 20 derniers ka (Bereiter et al., 2012); **B)** <sup>18</sup>O (‰) des foraminifères benthiques des 20 derniers ka, obtenus à partir de la carotte MD07-3081 à 49° S dans le SEP (Martinez Fontaine, 2021). ..... 2
- Figure 0.2** Position des fronts océaniques associés à l'ACC (SAF et PF) au cours de la dernière période glaciaire selon **A)** Verleye & Lowye, 2010 (à partir de kystes de dinoflagellés) ; **B)** Caniupán et al, 2011 (à partir d'alcénones) et **C)** Haddam et al, 2018 (à partir de foraminifères planctoniques). ..... 3
- Figure 1.1** **A)** Carte des températures d'été de eaux de surface de la mer (SSST) extraites de WOA 2018 (Locarnini et al., 2019) dans le SEP et localisation des 3 carottes étudiées : MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081 (triangles). Les principaux courants de surface du SEP sont représentés par des flèches noires : ACC (Antarctic Circumpolar Current), PCC (Peru-Chile Current), PCCC (Peru-Chile Counter Current) et CHC (Cape Horn Current). La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995) SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). **B)** Carte de la salinité d'été des eaux de surface (SSS) dans la zone d'étude à partir de la WOA 2018 (Sweng et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View (Schlitzer, 2021). ..... 7
- Figure 1.2** Limites de la calotte de glace Patagonienne lors du dernier maximum glaciaire. Sont également montrées la distribution actuelle des précipitations et des températures saisonnières en Patagonie chilienne. Figure modifiée à partir de Hulton et al., 2002. 9
- Figure 1.3** Climatologie actuelle (1981-2010) de l'hémisphère sud. Vitesse et direction du vent en **A)** été et **B)** hiver à 850 hPa (analyse NCEP/NCAR). Modifié à partir de Bertrand et al., (2014). ..... 10
- Figure 1.4** Schéma de la circulation océanique superficielle dans le SEP. Les flèches indiquent : ACC (Antarctic Circumpolar Current), PCC-C (Peru-Chile Coastal Current), PCC-O (Peru-Chile Oceanic Current), PCCC (Peru-Chile Counter Current) et CHC (Cape Horn Current). Schéma basé sur (Camus, 2001). Figure réalisée avec Ocean data View (ODV, Schlitzer, 2021). Les triangles jaunes indiquent la position des carottes étudiées. .... 11
- Figure 1.5** Coupe de la concentration en oxygène le long de la marge chilienne données WOA 2018 (Garcia et al., 2019a). Distribution verticale des principales masses d'eau dans le SEP entre 10° et 52° S : SAAW (Subantarctic Surface Water), STW (Subtropical Water), ESSW (Equatorial Subsurface Water), AAIW (Antarctic Intermediate Water) et PDW (Pacific deep Water). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View (Schlitzer, 2021). Les triangles noirs indiquent la position des carottes étudiées : MD07-3100 (41° S), MD07-3088 (46° S) et MD07-3081 (49° S). ..... 14
- Figure 2.1** Assemblages des principales espèces et intervalles de température des foraminifères planctoniques présents dans les cinq principales provinces fauniques : polaire, subpolaire, transitionnelle, subtropicale et tropicale. Modifié à partir de Bé et Tolderlund, (1971) et Darling & Wade, (2008). ..... 19

<b>Figure 2.2</b> Morphologie du frustule d'une diatomée pennée. Figure extraite de Eulin et al., (2017). .....	23
<b>Figure 2.3</b> Morphologie des frustules des diatomées centriques et pennées. Figure extraite de Eulin et al., (2017). .....	23
<b>Figure 2.4</b> Convention de comptage pour les diatomées centriques et pennées. La zone en grisé représente les fragments de diatomées que l'on peut trouver sur les lames. Figure extraite de Crosta & Koç, (2007). .....	28
<b>Figure 3.1</b> Distribution globale des eaux de surface en été de la température (°C), de la salinité (psu), du phosphate (µmol/kg), du nitrate (µmol/kg), et de la silice (µmol/kg). Cette figure a été réalisée à partir des données océaniques WOA 2018 (temperature : Locarnini et al., 2019 ; salinité : Sweng et al., 2019 ; nitrate, phosphate et silicate : Garcia et al., 2019b) et du logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021.....	36
<b>Figure 3.2</b> Carte des carottes collectées dans les différentes bases de données des diatomées. La couleur pour chaque base est indiquée ci-dessus. Cette étude considère l'ensemble de ces bases. La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021. ....	38
<b>Figure 3.3</b> Distribution dans les secteurs Pacifique et Atlantique de l'océan Austral du groupe Nutriments abondants : <b>A)</b> <i>Chaetoceros</i> spp. resting spores, <b>B)</b> <i>T. nitzschioides</i> var. <i>nitzschioides</i> et <b>C)</b> <i>Skeletonema costatum</i> . La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021.....	40
<b>Figure 3.4</b> Distribution dans les secteurs Pacifique et Atlantique de l'océan Austral du groupe Planctonique-côtier : <b>A)</b> <i>Thalassiosira eccentrica</i> , <b>B)</b> <i>Coccosinodiscus radiatus</i> , <b>C)</b> <i>Thalassiosira anguste-lineata</i> , <b>D)</b> <i>Thalassiosira pacifica</i> y <b>E)</b> <i>S. oestrupii</i> var. <i>venrickiae</i> . La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021. ....	42
<b>Figure 3.5</b> Distribution dans les secteurs Pacifique et Atlantique de l'océan Austral du groupe Benthique-côtier : <b>A)</b> <i>Paralia sulcata</i> , <b>B)</b> <i>Cocconeis</i> spp. La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021. ....	43
<b>Figure 3.6</b> Distribution dans les secteurs Pacifique et Atlantique de l'océan Austral du groupe Subtropical : <b>A)</b> <i>Actinocyclus curvatus</i> , <b>B)</b> <i>Azpeitia tabularis</i> , <b>C)</b> <i>Fragilariopsis doliolus</i> , <b>D)</b> <i>Hemidiscus cuneiformis</i> , <b>E)</b> <i>Rhizosolenia bergonii</i> , <b>F)</b> <i>Roperia tessellata</i> , <b>G)</b> <i>Shionodiscus oestrupii</i> var. <i>oestrupii</i> et <b>H)</b> <i>Thalassiosira lineata</i> . La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021. ....	46

- Figure 3.7** Distribution dans les secteurs Pacifique et Atlantique de l'océan Austral du groupe Polaire : **A)** *Eucampia antarctica*, **B)** *Fragilariopsis kerguelensis*, **C)** *Fragilariopsis rhombica*, **D)** *T. nitzschioides* var. *lanceolata*, **E)** *Shionodiscus gracilis*, **F)** *Thalassiosira lentiginosa*, **G)** *Thalassiosira oliverana* et **H)** *Shionodiscus trifultus*. La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021..... 49
- Figure 3.8** Distribution dans le secteurs Pacifique et Atlantique de l'océan Austral du groupe Antarctique **A)** *Actinocyclus actinochilus* y **B)** *Thalassiosira antarctica*. La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021)..... 50
- Figure 4.1** **A)** Summer Sea Surface Temperatures (SSST) from WOA 2018 (Locarnini et al., 2019) in the SEP and the location of core MD07-3081 (black triangle) used in this study and Core MD07-3082 (circle) published in Haddam et al., (2018). Main currents in the SEP are represented by black arrows: ACC (Antarctic Circumpolar Current), PCC (Peru-Chile Current) and CHC (Cape Horn Current). The position of the fronts is also shown: STF (Subtropical Front), SAF (Subantarctic Front) and PF (Polar Front) (Orsi et al., 1995). **B)** Summer Salinity Surface (SSS) in the study área from WOA 2018 (Sweng et al., 2019). This figure was made using Ocean data view (Schlitzer, 2021) with DIVA gridding. .... 60
- Figure 4.2** **A)** Age-depth relationship for core MD07-3081. The  $^{14}\text{C}$  ages are shown in calendar ka BP and were calibrated with the SHcal20 curve (Hogg et al., 2020). The inverted red triangles indicate the position where the  $^{14}\text{C}$  ages were obtained. **B)** Oxygen isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ) variations of the planktonic foraminiferal *G. bulloides* (250-315 $\mu\text{m}$ ) as a function of depth. Results were normalized relative to the PDB (Pee DeeBelemnite) standard (%). .... 66
- Figure 4.3** **A)** Summer SSTs based on planktonic foraminiferal assemblage. **B)** Total Foraminifers and foram abundance in core MD07-3081 from the Last Glacial to the Holocene : **C)** *G. bulloides* (%), **D)** *N. pachyderma* (left) (%), **E)** *N. incompta* (%), **F)** *G. inflata* (%) and **G)** *G. glutinata* (%). Note the different Y axes for the relative percentage of the different planktic foraminifera species. Where we present relative abundance of the species in intervals with more than 300 individuals and/or less than 20 % error que reconstruyen los ultimos 19 ka. For total counts see Supplementary Material **Figure S1**. .... 69
- Figure 4.4** **A)**  $\delta^{18}\text{O}$  *G. bulloides* records ; **B)** SSST ; **C)**  $\delta^{18}\text{O}$  anomaly in the core MD07-3082 (Haddam et al., 2018) ; **D)** Total Diatom diatom abundance in the core MD07-3081 from the Late Glacial to the Holocene: **E)** CRS (%), **F)** *T. nitzschioides* var. *nitzschioides*; **G)** *T. eccentrica* (%) and **H)** *P. sulcata* (%). In red dots are plotted the total number of diatom valves counts. This graph shows total counts greater than 150 diatoms. For total counts see supplementary material **Figure S2**. .... 72
- Figure 4.5** Diatoms of the Polar and Subtropical group in core MD07-3081 from the Late Glacial to the Holocene. Polar group species (blue curves) **J)** *Shionodiscus* group (%), **K)** *T. nitzschioides* group **L)** *Eucampia antarctica* **M)** *Fragilariopsis kerguelensis* and Subtropical group (green curves) **N)** *Shionodiscus oestrupii* **O)** *Hemidiscus*



*cuneiformis* **P**) *Fragilariopsis doliolus* and **Q**) *Azpeitia tabularis*. This graph shows total counts greater than 150 diatoms. For total counts see supplementary material Fig. S2..... 74

**Figure 4.6** Principal Component Analysis (PCA) biplot showing the relationship between the diatom species present in core MD07-3081. Abbreviations of diatom species: **Acurv** (*A. curvatulus*); **Atabu** (*A. tabularis*); **CRS** (*Chaetoceros* spp resting spores); **Eanta** (*E. antarctica*); **Fdol** (*F. doliolus*); **Fkerg** (*F. kerguelensis*); **Hcune** (*H. cuneiformis*); **Nbica** (*N. bicapitata*); **Psulca** (*P. sultaca*); **Rtess** (*R. tessellata*); **Shinogr** (*Shionodisus* group); **Soest** (*S. oestrupii*); **Tnigr** (*T. nitzschioides* group); **Tnitz** (*T. nitzschioides* var *nitzschioides*); **Tanta** (*T. antarctica*) and **Tecc** (*T. eccentrica*)..... 76

**Figure 4.7** Graph of PC1 and PC2 versus age in core MD07-3081. .... 76

**Figure 4.8** Productivity and Circulation in the Southern Ocean. **A**) Paired benthic and planktic foraminifera radiocarbon age and  $^{13}\text{C}$  difference in core MD07-3088 located at 46° S (Siani et al., 2013). **B**) Southern Ocean Opal flux, a proxy for upwelling south of the Antarctic polar front from core TN057-13-4PC (Anderson et al., 2009) and **C**) Abundance (%) of *Chaetoceros* spp. resting spores of the core in study MD07-3081. .... 80

**Figure 5.1** **A**) Abondance totale (valves  $\text{g}^{-1}$ ) et comptage total des diatomées (points rouges) et **B**) pourcentage total des fragments de diatomées comptés dans la carotte MD07-3100. (Comprend les 58 échantillons analysés, **Annexe 5-A**)..... 92

**Figure 5.2** Enregistrements pour la carotte sédimentaire MD07-3100 depuis la dernière période glaciaire jusqu'à l'Holocène supérieur. **A**) Composition isotopique de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) mesurées sur *G. bulloides* d'après Haddam et al., (2018) ; **B**) Reconstruction des températures d'été des eaux de surface (SSST) d'après Haddam et al., (2018) ; **C**) Anomalie de la composition isotopique de l'oxygène de l'eau de surface ( $\delta^{18}\text{O}_w$ ) calculés à partir des SSST et du  $\delta^{18}\text{O}_{G.bulloides}$  d'après Haddam et al., (2018) ; **D**) Abondance totale de diatomées (valves  $\text{g}^{-1}$ ), les cercles rouges indiquent le nombre total de diatomées comptées ; **E**) Pourcentage de fragments de diatomées; **F-Q**) Pourcentage des espèces de diatomées. Ce graphique montre les comptages au-dessus de 50 valves. Pour les comptages totaux, voir l'Annexe 6 **Figure 6-A**. .... 96

**Figure 5.3** Graphique des composantes principales (PC1, PC2 et PC3) en fonction de l'âge dans la carotte MD07-3100. .... 98

**Figure 5.4** **A**) Abondance totale des diatomées (valves  $\text{g}^{-1}$ ) et comptage total des diatomées (points rouges) et **B**) pourcentage total des fragments de diatomées comptés dans la carotte MD07-3088 (inclut les 57 échantillons analysés, **Annexe 5-B**). .... 100

**Figure 5.5.** Enregistrements pour la carotte sédimentaire MD07-3088 depuis la déglaciation jusqu'à l'Holocène supérieur. **A**) Composition isotopique de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) mesurées sur *G. bulloides* d'après Haddam et al., (2018) ; **B**) Reconstruction des températures d'été des eaux de surface (SSST) d'après Haddam et al., (2018) ; **C**) Anomalie de la composition isotopique de l'oxygène de l'eau de surface ( $\delta^{18}\text{O}_w$ ) calculés à partir des SSST et du  $\delta^{18}\text{O}_{G.bulloides}$  d'après Haddam et al., (2018) ; **D**) Abondance totale de diatomées (valves  $\text{g}^{-1}$ ), les cercles rouges indiquent le nombre total de diatomées comptées ; **E**) Pourcentage de fragments totaux de diatomées ; **F**–

<b>T)</b> : Pourcentages des espèces de diatomées présentes dans la carotte MD07-3088. Ce graphique ne présente que les comptages effectués au-dessus de 50 valves. Pour les comptages totaux, voir l'Annexe 6 Figure 6-B.....	105
<b>Figure 5.6</b> Graphique des composantes principales des assemblages de diatomées (PC1, PC2 et PC3) en fonction de l'âge de la carotte MD07-3088. ....	107
<b>Figure 5.7 A)</b> Différence de la composition isotopique du carbone entre foraminifère benthique et planctonique pour la carotte MD07-3088 (Siani et al., 2013); <b>B, C et D)</b> Pourcentages des CRS ; <b>E, F et G)</b> Pourcentage des <i>T. nitzschioides</i> var. <i>nitzschioides</i> sur les 3 carottes étudiées : MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081.....	110
<b>Figure 5.8 A, B et C)</b> Anomalies de la composition isotopique de l'oxygène de l'eau ( $\delta^{18}\text{O}_w$ ) pour les carottes marines MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3082 respectivement (Haddam et al., 2018). <b>D, E et F)</b> Pourcentages de <i>T. eccentrica</i> et <b>G, H et I)</b> Pourcentage de <i>P. sulcata</i> sur les 3 carottes étudiées : MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081. ....	111
<b>Figure 5.9 A, B et C)</b> Reconstruction des températures d'été des eaux de surface (SSST) d'après Haddam et al., (2018) ; <b>D et E)</b> Pourcentage de <i>F. doliolus</i> pour les carottes marines MD07-3088 et MD07-3081 ; <b>F et G)</b> Pourcentage de <i>A. tabularis</i> pour les carottes marines MD07-3088 et MD07-3081 ; et <b>H, I et J)</b> Pourcentage de <i>S. oestrupii</i> pour les 3 carottes étudiées : MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081. ....	112
<b>Figure 5.10 A, B et C)</b> Reconstruction des températures d'été des eaux de surface (SSST) d'après Haddam et al., (2018) ; <b>D, E et F)</b> Pourcentage de <i>Shionodiscus</i> group sur les 3 carottes étudiées, MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081 ; et <b>G et H)</b> Pourcentage de <i>F. kerguelensis</i> pour les carottes MD07-3088 et MD07-3081. ....	113
<b>Figure 6.1</b> Graphiques de CRS (%), $\delta^{18}\text{O}_w$ (‰) (Haddam et al., 2018) et <i>T. eccentrica</i> pour les 3 carottes étudiées : MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081.....	120
<b>Figure 6.2</b> Graphiques de <i>F. kerguelensis</i> (%), <i>A. tabularis</i> (%) observée sur les carottes MD07-3088 et MD07-3081 et <i>P. sulcata</i> (%) observée sur les 3 carottes étudiées : MD07-3100 (41° S), MD07-3088 (46° S) et MD07-3081 (49° S). ....	121
<b>Figure 6.3</b> Schéma des principaux résultats de cette thèse pour les différentes périodes : Dernière Période Glaciaire, Déglaciation, Holocène Inférieur et Holocène Supérieur. ....	122

## Liste des tables

<b>Table 3.1</b> Classification des 54 taxons de diatomées identifiés au niveau des espèces, qui présentaient une abondance de plus de 2% de la base de données dans le secteur Pacifique et Atlantique L'océan Austral. En noir foncé sont indiquées les espèces trouvées dans les 3 carottes étudiées (MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081). ..	39
<b>Table 4.1</b> Planktonic foraminifera radiocarbon ages from core MD07-3081 and the respective marine surface reservoir age correction (Rs) applied for their calibration previous to the age modelling. ....	62
<b>Table 4.2</b> PCA results for core MD07-3081. Scores above  0.2  are in bold. ....	75
<b>Table 5.1</b> Résultats de l'ACP pour la carotte MD07-3100. Les scores supérieurs à  0,2  sont indiqués en gras. ....	97
<b>Table 5.2</b> Résultats de l'ACP pour la carotte MD07-3088. Les scores supérieurs à  0,2  sont indiqués en gras. ....	106

## Liste des abréviations

AABW : Antarctic Bottom Water

AAIW : Antarctic Intermediate Water

ACC : Antarctic Circumpolar Current

ACP : Analyse des composantes principales

ACR : Antarctic Cold Reversal

AMOC : Overturning Circulation

AVZ : Austral Volvanic Zone

CDW : Circumpolar Deep Water

CHC : Cape Horn Current

CRS : Chaetoceros spp. resting spores

ESSW : Equatorial Subsurface Water

IMAGES : International Marine Global changES

IRD : Ice Rafted Debris

LGM : Last Glacial Maximum

MAT : Modern Analog Technique

NPIS : Northern Patagonian Ice-sheet

PACHIDERME : Pacifique-CHili : Dynamique des Eaux interRMédiaires

PC : Principal component

PCC : Peru Chile Current

PCC-C : Peru Chile Current - Coastal

PCC-O : Peru Chile Current-Oceanic

PCCC : Peru Chile Counter Current

PCUC : Peru Chile Under Current

PDW : Pacific Deep Water

PF : Polar Front

PFZ : Polar Front Zone

SAAW : Subantarctic Water

SAF : Subantactic Front

SAZ : Subantarctic Zone

SEP : South East Pacific

SEPSA : South Eastern Pacific Subtropical Anticyclone

SH : Southern Hemisphere

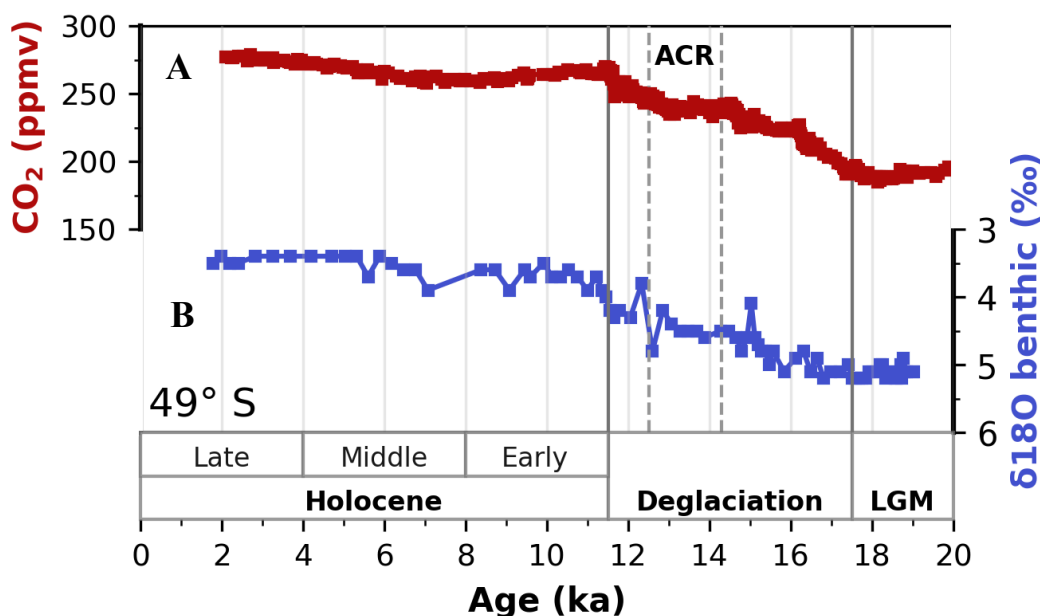
SMOW : Standar Mean Ocean Water  
SPIS : Southern Patagonian Ice-sheet  
SSST : Summer Sea Surface Temperature  
SST : Sea Surface Temperatures  
SSVZ : Southern South Volcanic Zone  
STF : Subtropical Front  
STW : Subtropical Water  
SWW : Southern Westerlies Winds  
VPDB : Vienna Pee Dee Belemnite

## Introduction Générale

Au cours du Quaternaire, soit les 2.6 derniers millions d'années, la Terre a connu des variations cycliques de son climat, passant de phases interglaciaires chaudes à des périodes glaciaires froides. Les périodes glaciaires sont associées à des niveaux de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) atmosphérique nettement inférieurs à ceux des périodes interglaciaires et à la large expansion des calottes glaciaires et des glaciers continentaux de deux hemispheres (EPICA Community Members, 2004). Les changements climatiques des cycles glaciaires-interglaciaires sont associés à des changements de la circulation océanique profonde et de surface que ce soit à l'échelle orbitale ou à l'échelle millénaire. L'océan Austral est le siège du retour des eaux profondes de l'océan vers l'atmosphère, de par l'upwelling à la divergence antarctique (Marshall & Speer, 2012). Cet upwelling, lié à l'intensité et la position de la ceinture des vents d'Ouest du sud (Southern Westerlies Winds, SWW) autour de l'Antarctique, contrôle les échanges thermiques et de gaz carbonique entre l'atmosphère, l'océan de surface et le réservoir océanique plus profond. Ces échanges sont facilités par les isopycnes inclinées qui affleurent aux latitudes polaires et subpolaires, autour de l'Antarctique. Ces isopycnes inclinées séparent les eaux subtropicales des eaux polaires de beaucoup plus grande densité et sont associés au Courant circumpolaire Antarctique (Antarctic Circumpolar Current, ACC), le plus fort courant de la planète.

De nombreuses études ont proposées une stratification plus importante de l'océan lors du dernier maximum glaciaire (Keeling & Stephens, 2001; Ferrari et al., 2014) et cette stratification disparaît lors de la déglaciation notamment à la suite d'une reprise plus intense de l'upwelling à la divergence Antarctique lié au changement de position des vents d'Ouest de l'Hémisphère Sud (Anderson et al., 2009; Skinner et al., 2010; Siani et al., 2013).

Une région stratégique pour l'étude du changement climatique à l'échelle millénaire est le Sud-Est Pacifique (South East Pacific, SEP) adjacente à la Patagonie Chilienne car cette zone est sous l'influence des SWW et du ACC, c'est-à-dire la zone où a lieu l'échange de CO<sub>2</sub> entre l'océan profond et l'atmosphère. Le CO<sub>2</sub> est un gaz à effet de serre dont la concentration dans l'atmosphère varie depuis la dernière période glaciaire, avec des concentrations plus faibles pendant les périodes froides (dernière période glaciaire) et plus élevées pendant les périodes chaudes (Holocène) (Bereiter et al., 2012; Martinez Fontaine, 2021) (**Figure 0.1**).

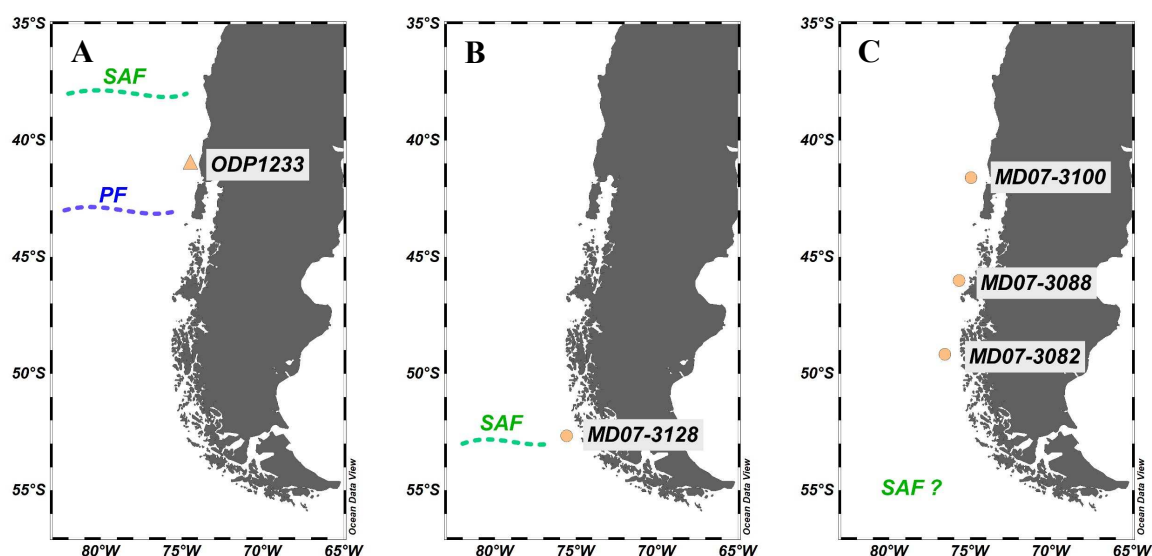


**Figure 0.1** **A)** Concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> (ppmv) des 20 derniers ka (Bereiter et al., 2012); **B)** <sup>18</sup>O (‰) des foraminifères benthiques des 20 derniers ka, obtenus à partir de la carotte MD07-3081 à 49° S dans le SEP (Martinez Fontaine, 2021).

Les études paléoclimatiques dans le SEP ont proposé que pendant les périodes glaciaires les vents d'ouest avaient migré vers le nord (Rojas et al., 2009; Lamy et al., 2010). Ce mouvement latitudinal des SWW a pu influencer la position des fronts océaniques dans le SEP spécifiquement le front subantarctique et le front polaire.

Différents travaux ont étudié les potentiels déplacements des fronts dans le Sud-Est du Pacifique, basés soit sur des reconstructions de température, soit sur des études micropaléontologiques. Ces travaux ont donné des réponses contrastées. (Verleye & Louwyne, 2010), en se basant sur l'étude des cystes de dinoflagellés ont proposé une migration vers le nord de 7 à 10° du front subantarctique, tandis que les études basées sur les foraminifères (Haddam et al., 2018) et les coccolithes (Duchamp, communication personnelle) indiquent que le front subantarctique n'a jamais atteint 49° S, latitude de la carotte la plus sud étudiée. (Caniupán et al., 2011) et (Lamy et al., 2015), à partir de la reconstruction des températures fondée sur les doubles liaisons carbone des chaînes d'alcénones, ont proposé que le front subantarctique ait une position au nord de 53° S pendant le dernier maximum glaciaire (**Figure 0.2**). Cependant les reconstructions de températures sur la marge chilienne sud sont fortement influencées par la fonte de la calotte patagonienne et représentent principalement des variations locales à cette période (Haddam et al., 2018). Il n'y a donc pas de réponse robuste à l'heure

actuelle à la question du déplacement latitudinal du front subantarctique au dernier maximum glaciaire et lors de la déglaciation.



**Figure 0.2** Position des fronts océaniques associés à l'ACC (SAF et PF) au cours de la dernière période glaciaire selon **A**) Verleye & Lowye, 2010 (à partir de kystes de dinoflagellés) ; **B**) Caniupán et al, 2011 (à partir d'alcéonones) et **C**) Haddam et al, 2018 (à partir de foraminifères planctoniques).

Considérant le discordance décrit dans le paragraphe précédent, l'objectif principal de ma thèse est contribuer à la compréhension du mouvement des fronts océaniques et des courants dans le SEP depuis la dernière période glaciaire jusqu'à aujourd'hui. Pour atteindre cet objectif, je vais analyser quantitativement et qualitativement les assemblages de diatomées présents dans un transect latitudinal situé entre 41° et 49° S composé de 3 carottes d'eau profonde : MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081. De plus, j'analyserai quantitativement et qualitativement les assemblages de foraminifères planctoniques présents dans la carotte MD07-3081, dans le but de reconstruire les températures des eaux de surface (SST) à 49° S et de comparer les résultats avec les données de température de surface de la mer en été (Summer Sea Surface Temperature, SSST) déjà publiées entre 41° et 49° S (Haddam et al., 2018).

J'étudierai en parallèle les diatomées et les foraminifères afin de comparer les informations provenant de deux marqueurs micropaléontologiques de l'habitat planctonique, c'est-à-dire qu'ils habitent les premiers mètres de la colonne d'eau et fournissent des informations sur la température, la salinité, les nutriments, etc. présents dans la couche superficielle de l'eau. En raison de leur composition siliceuse, les diatomées ont la capacité d'être bien préservés dans les sédiments. L'étude des assemblages de diatomées dans les sédiments est basée sur l'hypothèse que les diatomées se développent et sont préservées dans des conditions modernes



spécifiques et que lorsque ces diatomées sont trouvées sur le fond marin, elles peuvent s'être développées dans les mêmes conditions océanographiques et climatiques qu'aujourd'hui, fournissant des informations importantes sur les caractéristiques physico-chimiques et en nutriment des masses d'eau (Crosta & Koç, 2007). Les foraminifères planctoniques ont une testa en carbonate de calcium qui leur permet de reconstituer, entre autres paramètres, les conditions de température de l'océan de surface dans lesquelles ils se sont développés (Haddam et al., 2016).

L'étude des diatomées et des foraminifères présents dans les trois carottes situées dans le SEP entre 41° et 49° S depuis la dernière période glaciaire jusqu'à nos jours me permettra de déterminer la position des fronts subantarctique et polaire durant la dernière période glaciaire et l'influence des eaux plus chaudes durant l'Holocène. Cela me permettra également de déterminer les périodes de plus grande influence des eaux océaniques riches en nutriments ainsi que les périodes de plus grande influence des eaux continentales.

Dans le premier chapitre de ma thèse je décrirai le contexte régional du SEP, en présentant les principales caractéristiques océanographiques, atmosphériques et géographiques dans cette région. Le deuxième chapitre décrit les outils utilisés dans cette thèse. La première partie de ce chapitre est focalisé sur les comptages des foraminifères planctoniques et de leur utilisation pour reconstituer statistiquement les paléotempératures de l'océan de surface. Dans la deuxième partie de ce chapitre je présente la description des diatomées, l'approche méthodologique et les protocoles nécessaires pour leur identification et utilisation en tant que paléoproxy océanographique. Dans le troisième chapitre, je présenterai une compilation de 7 bases de données des diatomées (BDD) de l'hémisphère sud provenant de sédiments de surface entre la zone subtropicale jusqu'à l'Antarctique. J'ai utilisé cette compilation pour déterminer les principaux groupes de diatomées de la zone étudiée. Ces groupes me permettent ensuite d'analyser les résultats des assemblages de diatomées dans les chapitres suivants.

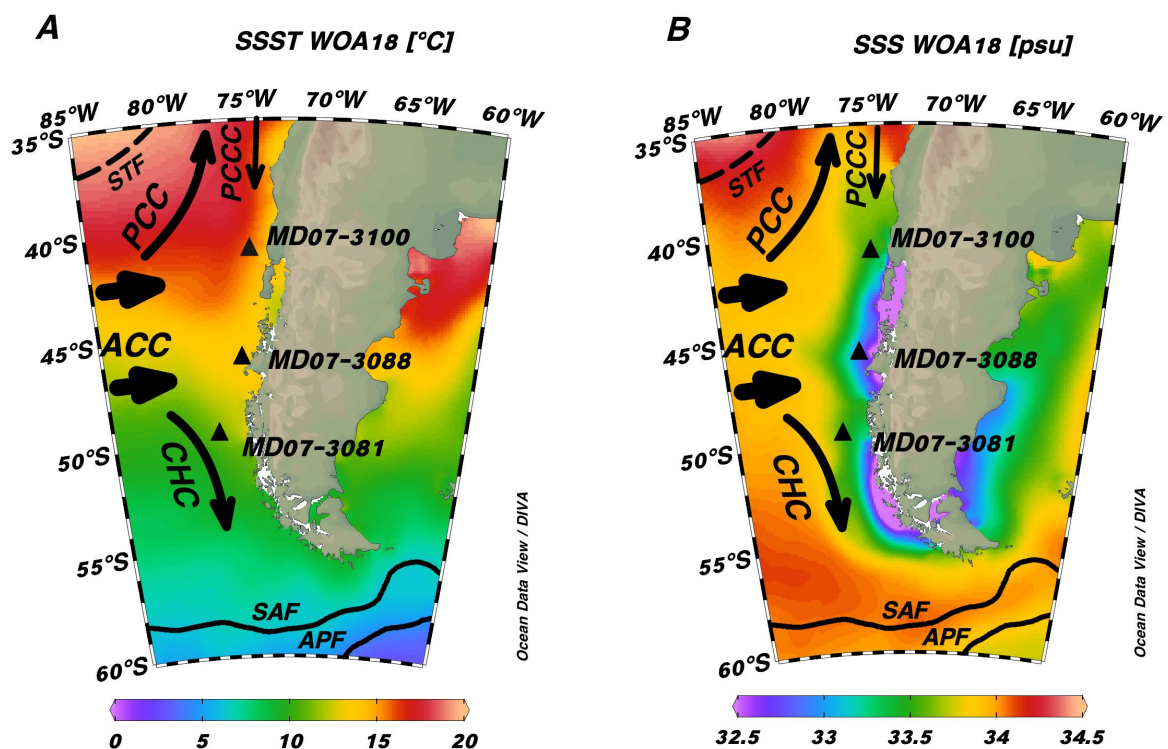
Le quatrième chapitre porte sur une étude de l'analyse qualitative d'assemblages de diatomées et de foraminifères de la carotte plus au sud (49° S ; MD07-3081) située au large de la marge sud-chilienne. Ce chapitre est structuré sous la forme d'un article qui sera soumis prochainement à la revue *Marine Micropaleontology*. Dans le cinquième chapitre je décris et discute des résultats des assemblages obtenus à partir de l'analyse des diatomées des 2 carottes situées plus au Nord (MD07-3100 et MD07-3088). Ensuite je présente les changements

océanographiques déduit de la comparaison des résultats obtenus sur les 3 carottes depuis la dernière période glaciaire.



## Chapitre 1: Contexte du Sud-Est Pacifique

Ce chapitre présente le contexte géographique, atmosphérique et océanographique de la zone Sud-Est Pacifique. Les carottes de sédiments marins utilisées pour cette étude sont indiquées sur la **Figure 1.1**. Ces carottes ont été collectées lors de la campagne en mer PACHIDERME (Pacifique-CHili : Dynamique des Eaux interMédiaires) qui a été réalisée en février 2007, à bord du navire océanographique Marion Dufresne (MD/159) (Kissel, 2007), dans le cadre du programme international IMAGES (International Marine Global changES). Lors de cette mission, de nombreuses archives sédimentaires marines ont été collectés entre 40 et 55° S le long de la côte chilienne (**Figure 1.1A-B**) dans le but de restituer les variations paléoclimatiques, environnementales et océanographiques de cette région.



**Figure 1.1 A**) Carte des températures d'été de eaux de surface de la mer (SSST) extraites de WOA 2018 (Locarnini et al., 2019) dans le SEP et localisation des 3 carottes étudiées : MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081 (triangles). Les principaux courants de surface du SEP sont représentés par des flèches noires : ACC (Antarctic Circumpolar Current), PCC (Peru-Chile Current), PCCC (Peru-Chile Counter Current) et CHC (Cape Horn Current). La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995) SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). **B**) Carte de la salinité d'été des eaux de surface (SSS) dans la zone d'étude à partir de la WOA 2018 (Sweng et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View (Schlitzer, 2021).

### 1.1. Contexte géographique et géologique

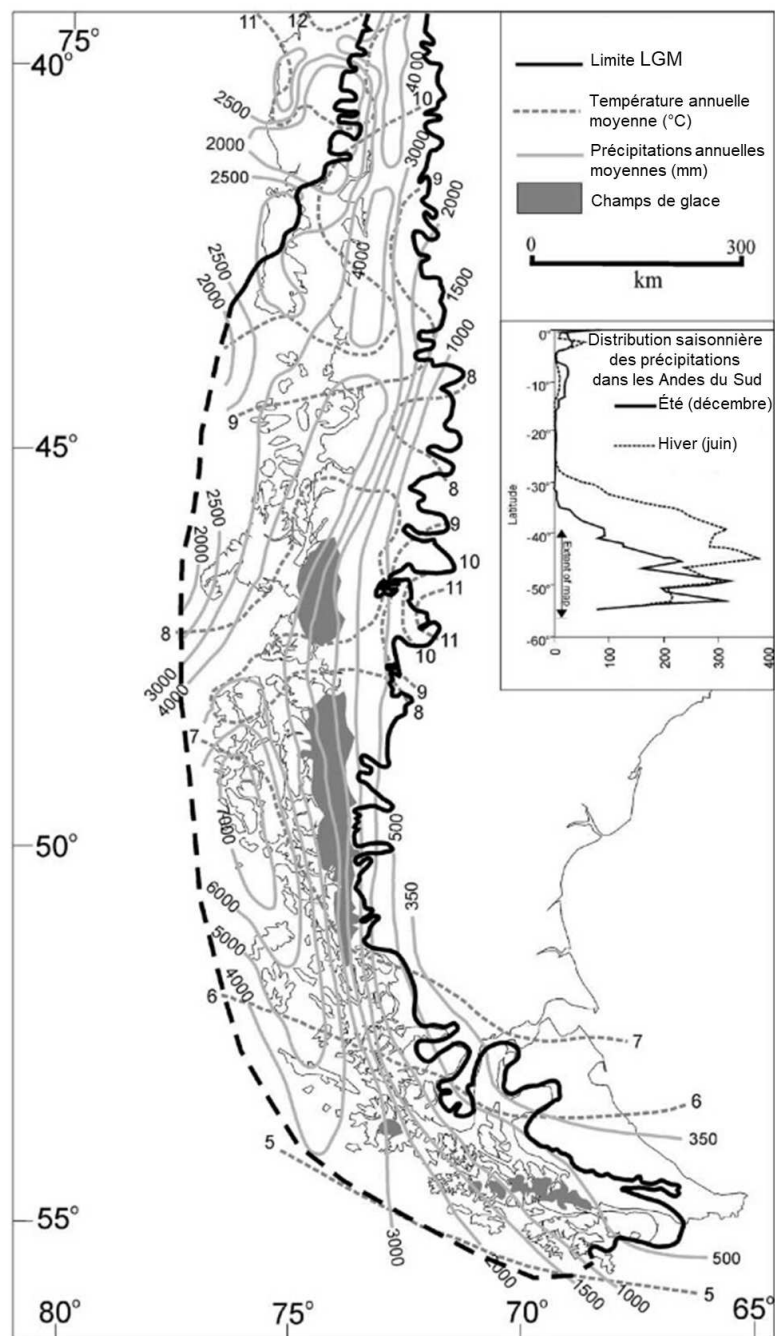
La Patagonie Chilienne est située en Amérique du Sud et s'étend du fjord de Reloncaví à ~41° S au Cap Horn à ~56° S, couvrant une superficie de 240.000 km<sup>2</sup>. Le secteur oriental, délimité

par la Cordillère des Andes, représente l'unique masse continentale des moyennes latitudes de l'Hémisphère Sud (SH) avec des hauteurs entre 3.000 et 4.000 m (i.e. Cerro Tronador, Monte San Valentin, Cerro Chaitén, Cerro Paine Grande et Torres del Paine). Au Sud, les Andes méridionales, formées par la Cordillère Patagonica orientée nord-sud et la Cordillère Fueguina orientée est-ouest, sont le résultat de la subduction des plaques Antarctique et Nazca sous la plaque sud-américaine, (Diraison et al., 2000). Cette dynamique de subduction est aussi à l'origine de deux zones volcaniques (Futa & Stern, 1988), la zone volcanique sud (Southern South Volcanic Zone, SSVZ 40°-46° S) et la zone volcanique australe (Austral Volcanic Zone, AVZ 49°-55° S). Parmi les volcans les plus actifs de cette zone figurent les volcans Puyehue-Cordon Caulle (40,5° S), Calbuco (41° S), Michinmahuida (43° S) Hudson (46° S) et Mont Burney (52° S) qui ont présenté une activité fortement explosive tout le long du Quaternaire (Lopez-Escobar et al., 1993; Naranjo & Stern, 2004; Amigo et al., 2013; Naranjo et al., 2017).

À l'ouest, parallèlement à la Cordillère des Andes, se trouve la Cordillère côtière qui ne dépasse pas 1500 m d'altitude, et donne un aspect très irrégulier au littoral Chilien, caractérisé par des îles, fjords, et des vallées formées par l'érosion produite par l'avancée et le retrait des glaciers pendant les périodes glaciaires (Pantoja et al., 2011). La zone des fjords reçoit continuellement de l'eau douce, principalement du bassin versant des rivières qui se jettent dans l'océan Pacifique : (41° S) rivière Puelo ( $678 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) et Petrohué ( $278 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) ; (43° S) rivière Yelcho ( $363 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) ; (45° S) rivière Aysén ( $283 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) et Cisnes ( $253 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) ; (48° S) rivière Baker ( $1133 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), Pascua ( $753 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) et Bravo ( $112 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) (Pantoja et al., 2011). Ces rivières affectent directement la salinité de la zone océanique adjacente à la Patagonie Chilienne (**Figure 1.1-B**) avec des valeurs maximales des débits individuels des rivières situées autour de  $\sim 46^\circ$  et  $50^\circ$  S (Davila et al., 2002).

Trois glaciers continentaux surmontent la cordillère des Andes : au nord le Campo Hielo Patagónico Norte (Northern Patagonian Ice-sheet, NPIS,  $47^\circ$  S,  $\sim 4200 \text{ km}^2$ ) et au Sud le Campo Hielo Patagónico Sur (Southern Patagonian Ice-Sheet, SPIS,  $48-51^\circ$  S,  $\sim 13000 \text{ km}^2$ ) et la cordillère Darwin ( $54^\circ - 55^\circ$  S,  $\sim 2300 \text{ km}^2$ ). Le volume de ces glaciers est contrôlé par les apports de précipitations venant de l'Océan et qui dépend de deux facteurs : l'intensité des SWW et l'altitude des Andes. Les SWW soufflent d'ouest en est entre  $30^\circ$  et  $60^\circ$  S et transportent de l'air chaud de l'océan Pacifique qui entre en collision avec les Andes et produit des précipitations annuelles de 3.000 à 10.000 mm (Garreaud et al., 2013). Le volume de ces glaciers a entre autre subi de nombreuses phases d'extension et de régression depuis le dernier

periode glaciaire (DPG) et leur étude a permis de restituer les variations climatiques qui contrôlent les précipitations (Denton & Karlen, 1973; Steig et al., 1998; Pantoja et al., 2011; Garreaud et al., 2013). En fait, au cours de la DPG, la Patagonie Chilienne était couverte d'une seule et vaste calotte qui s'étendait entre 38° S et 53° S (Hulton et al., 2002; Davies et al., 2020) (**Figure 1.2**). La séparation entre NPIS et SPIS n'aurait eu lieu qu'il y a environ 12.000 ans (Glasser et al., 2004).

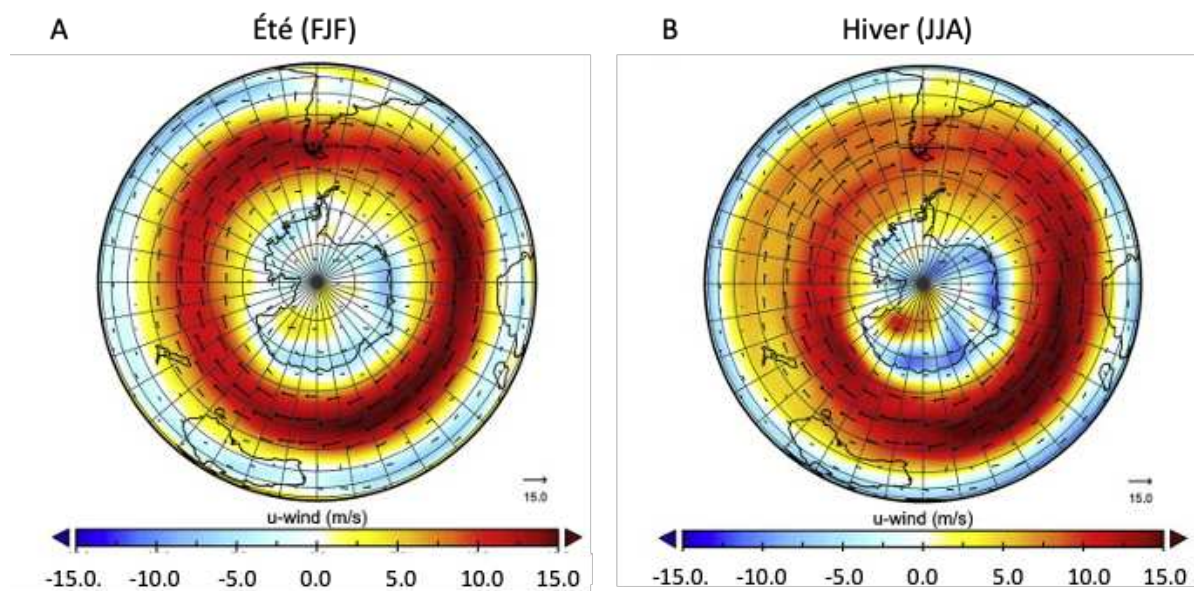


**Figure 1.2** Limites de la calotte de glace Patagonienne lors du dernier maximum glaciaire. Sont également montrées la distribution actuelle des précipitations et des températures saisonnières en Patagonie chilienne. Figure modifiée à partir de Hulton et al., 2002.

## 1.2. Circulation atmosphérique

Le Sud-Est Pacifique et le Sud de l'Amérique du Sud se positionnent dans une zone de transition entre les basses et hautes latitudes. Dans le secteur nord de cette région entre  $\sim 10^\circ$  S et  $\sim 30^\circ$  S s'installe l'anticyclone subtropical du SEP (South-Eastern Pacific Subtropical Anticyclone, SEPSA). Au Sud, entre  $\sim 60^\circ$  et  $65^\circ$  S se localise la dépression Polaire qui entoure le continent Antarctique. Entre ces deux zones ( $30^\circ$  et  $60^\circ$  S) dans le SEP soufflent les SWW.

Actuellement, le centre de la cellule des SWW est situé entre  $50^\circ$  et  $55^\circ$  S et module le régime des précipitations sur le côté ouest des Andes. A l'échelle interannuelle, il est possible d'observer une migration latitudinale des SWW. Pendant l'hiver austral (juin, juillet et août), les SWW s'étendent vers le nord en produisant des précipitations dans le centre du Chili ( $33^\circ$  et  $40^\circ$  S) et diminue d'intensité entre  $50^\circ$  et  $55^\circ$  S. Pendant l'été austral (décembre, janvier et février), la cellule des SWW s'intensifie et se concentre sur le secteur sud du Chili ( $50^\circ$  et  $55^\circ$  S) (Lamy et al., 2010; Garreaud et al., 2013; Bertrand et al., 2014) (**Figure 1.3**).



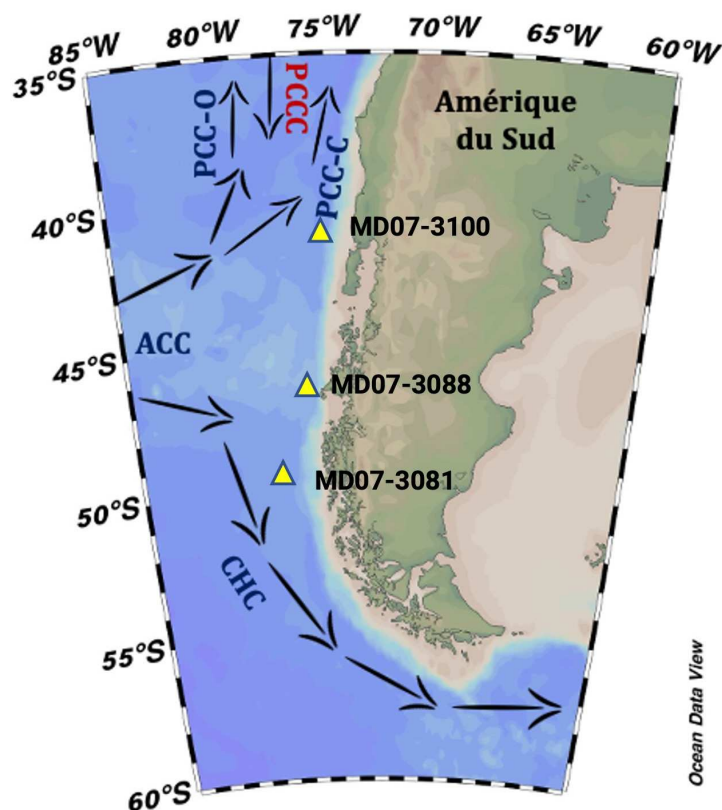
**Figure 1.3** Climatologie actuelle (1981-2010) de l'hémisphère sud. Vitesse et direction du vent en **A**) été et **B**) hiver à 850 hPa (analyse NCEP/NCAR). Modifié à partir de Bertrand et al., (2014).

Les fortes précipitations produites par les SWW sont à l'origine du développement et de l'extension des forêts, des rivières et de l'expansion et la contraction des grands glaciers présents en Patagonie Chilienne (Garreaud et al., 2013).

## 1.3. Circulation océanique

### 1.3.1. Circulation de surface

La circulation océanique de surface dans cette région est dominée par le courant froid circumpolaire Antarctique se propageant d'Ouest en Est et reliant les bassins des océans Pacifique, Atlantique et Indien (Orsi et al., 1995) et contrôlé par les SWW. Actuellement, ce courant atteint la côte chilienne entre 40° S et 46° S et se sépare alors en deux branches : le courant Pérou-Chili ou courant de Humboldt qui se dirige vers l'équateur en longeant la côte occidentale de l'Amérique du sud sur environ 40° de latitude (Silva et al., 2009) et le courant du Cap Horn, qui circule vers le sud à travers le passage de Drake (Strub et al., 2019) (**Figure 1.4**). La branche nord du courant Pérou-Chili se divise à son tour en une branche côtière et une branche océanique, entre lesquelles le contre-courant Pérou-Chili (Peru-Chile Counter Current, PCCC) s'écoule vers le sud, transportant de l'eau subtropicale (Subtropical Waters, STW) depuis l'équateur (Strub et al., 1998 ; Camus, 2001; Silva et al., 2009).



**Figure 1.4** Schéma de la circulation océanique superficielle dans le SEP. Les flèches indiquent : ACC (Antarctic Circumpolar Current), PCC-C (Peru-Chile Coastal Current), PCC-O (Peru-Chile Oceanic Current), PCCC (Peru-Chile Counter Current) et CHC (Cape Horn Current). Schéma basé sur (Camus, 2001). Figure réalisée avec Ocean data View (ODV, Schlitzer, 2021). Les triangles jaunes indiquent la position des carottes étudiées.



Au niveau de la couche de surface (entre 0 et 100 m), le courant Pérou-Chili transporte l'eau de surface subantarctique (Subantarctic Water, SAAW 11.5° C ; 33.8 psu) jusque vers ~28° S où elle se mélange avec le STW (20° C ; 35.2 psu) (Silva et al., 2009). La STW est transportée vers le sud par le PCCC qui circule de ~10° à ~28° S (Strub et al., 1998). Sous les eaux de surface, entre 50 et 100 m, se trouve l'eau équatoriale de sub-surface (Equatorial Subsurface Water, ESSW) (12.5° C ; 34.9 psu) qui est transportée vers le sud de 10° à 43° S par le sous-courant Pérou-Chili (Peru Chile Under Current, PCUC).

En ce qui concerne les températures actuelles des eaux de surface (Sea Surface Temperatures, SST) du SEP, elles varient en fonction de la latitude entre 35° S et 60° C présentant des valeurs moyennes annuelles entre ~17° C et ~4° C à ces latitudes respectivement. La saisonnalité de la SST est de ±3° C. Il est intéressant de remarquer que le gradient latitudinal de température est le plus fort le long du passage de Drake, dans la zone du front polaire (Polar Front, PF), avec une différence de ~8° C entre 55° S à 60° S. La deuxième zone où l'on peut observer un fort gradient latitudinal de température est le front subtropical (Subtropical Front, STF), qui atteint ~4° C sur une distance de 0.5° de latitude (<60 km) (Rintoul et al., 1997). Entre la région du passage de Drake et le STF, le gradient latitudinal de température diminue à mesure que l'on s'approche de la côte chilienne.

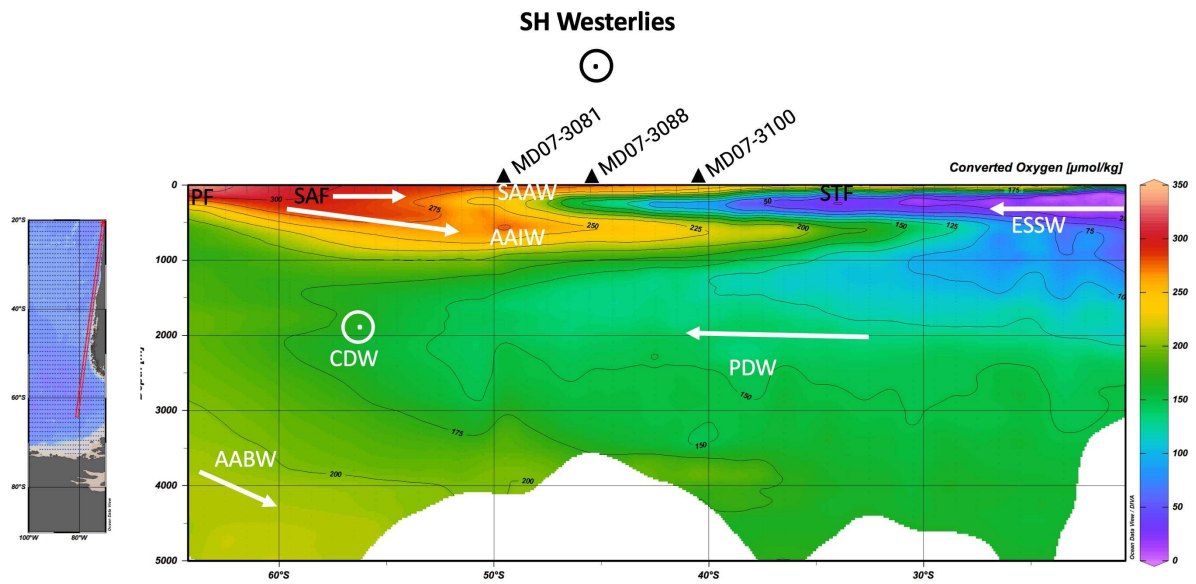
L'hydrologie superficielle du SEP est aussi influencée par les eaux provenant de la fonte des glaciers, des écoulements fluviaux et des précipitations. Cette interaction des masses d'eau continentales et océaniques génère un fort gradient de salinité et de température dans la colonne d'eau à l'intérieur des fjords et des chenaux et dans la zone océanique adjacente (Sievers & Silva, 2006). Une partie de l'eau subantarctique transportée par l'ACC entre dans les fjords et se mélange à l'eau douce apportée par les rivières et les précipitations pour former les eaux subantarctiques modifiées avec des salinités comprises entre 31 et 33 psu (Sievers & Silva, 2006). Ces apports d'eaux douces varient de manières saisonnières, et culminent durant l'été austral, lors de la fonte des neiges hivernales. Ceci provoque au large de la côte chilienne une anomalie négative de salinité maximum entre ~42 et 48° S et entre ~51 et 53° S (Davila et al., 2002).

Notre zone d'étude est donc située entre le Front Subtropical et le Front Subantarctique, par conséquent l'étude des diatomées et des foraminifères depuis la dernière période glaciaire jusqu'à l'Holocène permet d'observer des changements dans les assemblages qui pourraient être associés à un déplacement vers le nord et/ou vers le sud de ces fronts.

Le front subantarctique et le front polaire, associés à des zones de forts courants dans l'ACC, sont contraints dans le passage de Drake, le SAF rejoignant ce passage autour de 58° S (Park et al., 2019). Par contre, le front subtropical est situé autour de 35° S dans le SEP et s'estompe à l'approche de la côte (Chaigneau & Pizarro, 2005).

### 1.3.2. Circulation profonde

Les courants plus profonds comprennent les eaux modales (mode waters) et les eaux Antarctiques Intermédiaires (Antarctic Intermediate Water, AAIW) qui plongent depuis le SAF au PF et s'écoulent vers le nord jusque vers ~27° S, entre ~200 et 1200 m de profondeur autour de 50° S (Fig.5). L'AAIW est caractérisée par les faibles salinités (~33.8 ‰) et les mode waters par un maximum de la concentration en oxygène > ~3.5 ml/l. Ces masses d'eau jouent entre autres un rôle primordial sur la circulation thermohaline globale. À une profondeur plus importante jusqu'à environ 3000 m se trouvent les eaux du courant circumpolaire profond (Circumpolar Deep Water, CDW ; (Tsuchiya & Talley, 1998). Après avoir transité vers le Pacifique nord où elle accumule des nutriments, cette masse d'eau retourne vers le sud pour former l'eau Pacifique profonde qui se situe entre 1000 et 3000 m de profondeur (Pacific Deep Water, PDW). La PDW se caractérise par des concentrations pauvres en O<sub>2</sub> < ~3 ml/l, et plus riche en éléments nutritifs tels que les phosphates, nitrates, et silicates (> ~2.5 μmol/l, > ~30 μmol/l, et > ~120 μmol/l ; Boyer et al. 2013). Les Eaux de la CDW mélangées aux eaux pacifiques profondes remontent à la surface au niveau de la divergence Antarctique pour replonger au Sud de celle-ci. La plongée vers le fond, sous forme d'eaux de saumures, forme l'eau Antarctique de fond (Antarctic Bottom Water, AABW) qui s'écoule sur le fond en direction du Nord (**Figure 1.5**).



**Figure 1.5** Coupe de la concentration en oxygène le long de la marge chilienne données WOA 2018 (Garcia et al., 2019a). Distribution verticale des principales masses d'eau dans le SEP entre 10° et 52° S : SAAW (Subantarctic Surface Water), STW (Subtropical Water), ESSW (Equatorial Subsurface Water), AAIW (Antarctic Intermediate Water) et PDW (Pacific deep Water). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View (Schlitzer, 2021). Les triangles noirs indiquent la position des carottes étudiées : MD07-3100 (41° S), MD07-3088 (46° S) et MD07-3081 (49° S).





## Chapitre 2: Matériel et méthodes

Le chapitre 2 de ce manuscrit est consacré à la description des méthodologies (i.e. protocoles expérimentaux, principes analytiques, interprétations) correspondant aux diatomées et foraminifères planctoniques. Seront détaillées les méthodologies de comptage, d'identification et d'analyse statistique utilisées pour déduire les changements passés de la température des eaux de surface de l'Océan, de la salinité et de l'hydrologie depuis la dernière période glaciaire jusqu'à aujourd'hui dans le SEP.

Le chapitre présente également la description des longues carottes sédimentaires étudiées durant ce travail de thèse le long de la marge sud-chilienne (carottes MD07-3100, MD073088, MD07-3081).

### 2.1. Carottes étudiées

Les carottes de sédiments marins analysées dans cette étude ont été collectées lors de la mission PACHIDERME (MD/159) à bord du navire océanographique Marion Dufresne en février 2007 (Kissel, 2007) à l'aide de l'équipement de carottier à piston Calypso.

Les deux principaux objectifs de PACHIDERME étaient 1) en océan ouvert, étudier les principaux systèmes de circulation océan-atmosphère et les masses d'eau de l'hémisphère sud et 2) dans les fjords, déterminer les interactions terre-océan et l'impact des SWW sur les précipitations et le débit d'eau. Pour cela, 38 carottes de sédiments marins ont été prélevées le long de la marge sud chilienne et dans les fjords entre 40° et 53° S. Pour cette étude, 3 carottes ont été sélectionnées (**Annexe 1**) :

1. MD 07-3100 41° 36,13' S - 74° 57,40' W Profondeur 1792 m.
2. MD 07-3088 46° 04.30' S - 75° 41.23' W Profondeur 1536 m.
3. MD 07-3081 49° 25.76' S - 76° 34.03' W Profondeur 3273 m.

### 2.2. Modèle d'âge

Les modèles d'âge des carottes qui seront utilisés dans cette thèse ont été actualisés en utilisant la courbe de calibration du carbone 14 atmosphérique SHCal20, à partir des âges réservoirs publiés précédemment. Dans la carotte MD07-3100, 33 âges  $^{14}\text{C}$  ont été analysés (Haddam et al., 2018) ; dans la carotte MD07-3088, 24 âges  $^{14}\text{C}$  ont été analysés (Siani et al., 2013, Haddam et al., 2018) ; et dans la carotte MD07-3081, 20 âges  $^{14}\text{C}$  ont été obtenus (Martinez Fontaine,

2021). Pour comparer les 3 carottes, Martinez Fontaine (2021) a calibré les âges  $^{14}\text{C}$  avec la courbe SH Cal20 (Hogg et al., 2020) à l'aide du logiciel Udatale (Lougheed & Obrochta, 2019).

## **2.3. Les traceurs micropaléontologiques**

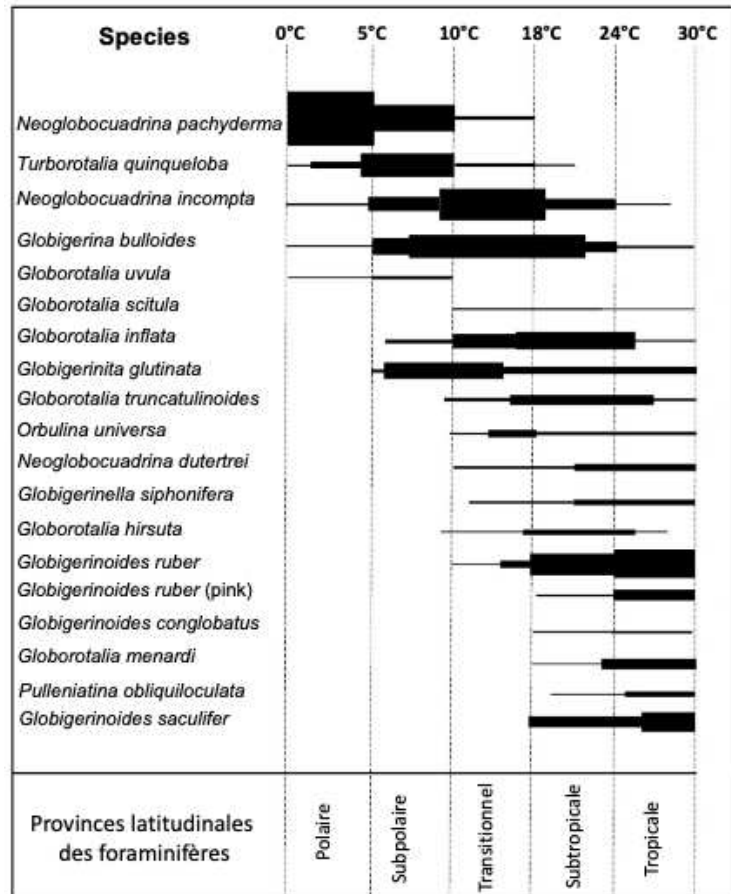
### **2.3.1. Les foraminifères planctoniques**

Les foraminifères sont un groupe de protistes marins hétérotrophes (Pawloński et al., 2003) qui présentent deux caractéristiques principales qui les distinguent des autres protistes : la présence de pseudopodes à texture granuleuse (pour l'alimentation) et une coquille qui enveloppe l'organisme et le sépare du milieu environnant (Loeblich & Tappan, 1988; Goldstein, 1999).

La coquille ou test est composée de carbonate de calcium et possède une ou plusieurs chambres interconnectées. Selon leur mode de vie, les foraminifères sont divisés en espèces planctoniques (vivant dans les 500 premiers mètres de la colonne d'eau) et en espèces benthiques (vivant au-dessus ou à quelques centimètres dans les sédiments marins). Il existe actuellement environ ~10.000 espèces de foraminifères (Vickerman, 1992), dont seulement une cinquantaine sont des foraminifères planctoniques (Kucera, 2007 ; Schiebel & Hemleben., 2017). En plus d'avoir une grande diversité, les foraminifères benthiques sont présents dans les archives fossiles depuis le Cambrien, alors que les espèces planctoniques sont présentes depuis le Jurassique (Barun & Gupta, 1999).

L'abondance des foraminifères planctoniques est sensible à la température, à la salinité, à la chimie des carbonates et aux conditions trophiques. Par conséquent, ces organismes peuvent fournir des informations indirectes sur ces variables physico-chimiques dans le temps, grâce à l'étude des assemblages de foraminifères et de la composition de leurs tests (Kucera, 2007; Kucera et al., 2005; Schiebel et al., 2017) (**Figure 2.1**).

La forte relation entre les foraminifères planctoniques et les températures des eaux de surface de l'océan a permis de développer des modèles statistiques qui associent les assemblages de foraminifères fossiles aux paramètres de distribution moderne des foraminifères actuels. Parmi ces modèles, on trouve la fonction de transfert développée par Imbrie & Kipp, (1971) et la méthode des meilleurs analogues (Modern Analogue Technique MAT, Prell, 1985) qui figure parmi les méthodes de reconstruction des SST les plus précises (Haddam et al., 2016).



**Figure 2.1** Assemblages des principales espèces et intervalles de température des foraminifères planctoniques présents dans les cinq principales provinces fauniques : polaire, subpolaire, transitionnelle, subtropicale et tropicale. Modifié à partir de Bé et Tolderlund, (1971) et Darling & Wade, (2008).

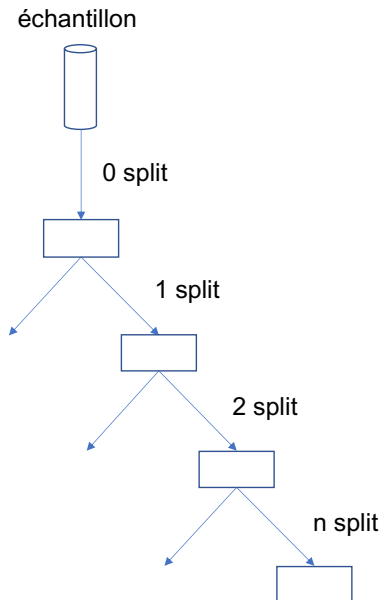
### 2.3.1.1. Comptage des foraminifères MD07-3081

Dans la carotte MD07-3081, 38 échantillons ont été sélectionnés tous les ~20 cm pour déterminer l'abondance des foraminifères planctoniques. Chaque échantillon a été tamisé par voie humide et la fraction >150 µm a été étudiée pour le comptage des foraminifères des différentes espèces. Pour l'identification des foraminifères, nous avons principalement adopté l'approche taxonomique de Schiebel & Hemleben, (2017).

Le comptage et l'identification des foraminifères planctoniques ont été réalisés dans les laboratoires GEOPS de l'Université Paris Saclay et LSCE à l'Orme des Merisiers, Gif Sur Yvette, à l'aide du matériel suivant : plateau de comptage (divisée en 45 carrés), microsplitter, pinceau fin et petit bécquet d'eau, entonnoir métallique et loupe binoculaire stéréoscopique.

Pour chaque échantillon, un minimum de 300 foraminifères a été compté quand cela était possible et associé au comptage des fragments de foraminifères planctoniques et de la fraction détritique d'IRD (Ice Rafted Debris) en suivant la méthode schématisée ci-dessous :





Si la totalité des foraminifères présents dans l'échantillon est comptée, aucune division (split = 0) est effectuée.

Par contre, s'il y a beaucoup de foraminifères ou si l'échantillon contient beaucoup d'IRD, l'échantillon est divisé jusqu'à ce qu'un minimum de 300 foraminifères puisse être compté et identifié.

Le nombre de foraminifères par gramme de sédiment a été calculé à partir de la formule suivante :

$$\text{N}^\circ \text{ Foraminifères (Individus g}^{-1}\text{)} = \frac{\left( \text{FC} \times 2^{(\text{split})} \times \frac{45}{(\text{CC})} \right)}{\text{P (g)}}$$

Où :

FC : correspond au nombre total de foraminifères comptés.

Split : correspond au nombre de divisions effectuées sur l'échantillon.

CC : correspond au nombre de carrés comptés sur la plaque de comptage.

P (g) : correspond au poids de l'échantillon en grammes.

Le pourcentage de fragments dans un échantillon a été calculé à partir de la formule suivante :

$$\% \text{ Fragments} = 100 \times \frac{\text{FC}}{(\text{Frag} + \text{FC})}$$

Où :

Frag : correspond au nombre total de fragments de foraminifères comptés.

FC : correspond au nombre total de foraminifères comptés.

Afin d'interpréter les résultats obtenus, nous avons calculé l'erreur associée à chaque pourcentage pour les différentes espèces de foraminifères planctoniques (i.e. Patterson & Fishbein, 1989).

Lors de l'analyse quantitative d'un échantillon, l'objectif principal est d'obtenir des estimations de la quantité relative :  $X_i = n_i/N$  où  $n_i$  est le nombre de spécimens pour l'espèce  $i$  et  $N$  est le nombre total de spécimens.

Après avoir compté  $N$  spécimens, l'erreur standard  $S_{X_i}$  pour  $X_i$  est normalement distribuée, indépendante du nombre d'espèces et égale à :

$$S_{X_i} = [X_i (1 - X_i)/N]^{1/2}$$

En conséquence, après  $N$  comptages, l'estimation  $f_i$  de  $X_i$  est indépendante du nombre d'espèces et est calculée, avec un niveau de confiance de 95%, à l'aide de l'équation suivante (i.e. Patterson & Fishbein, 1989):

$$X_i - 1.96 S_{X_i} \leq f_i \leq X_i + 1.96 S_{X_i}$$

### **2.3.1.2. Reconstruction des paléotempératures (SST)**

Pour reconstruire la SSST nous avons utilisé la technique MAT (Prell, 1985), le programme PaleoAnalog (Therón et al., 2004) et la base de données des carottes modernes de l'hémisphère sud (SHO) (15° S et 64° S) publiée par Haddam et al., (2016). Les reconstructions de température ont porté sur la carotte MD07-3081. Pour les deux autres carottes MD07-3100 et MD07-3088, les reconstitutions de SSST ont été précédemment publiées par Haddam et al., (2018).

Pour la reconstruction de SSST de la carotte MD07-3081, seulement les niveaux avec des comptages supérieurs ou égaux à 300 foraminifères planctoniques et présentant moins 30 % de fragments de foraminifères sont prises en compte. Lorsque les fragments de foraminifères planctoniques sont >30 % de l'assemblage planctonique total, la reconstruction de SST peut être biaisée par la présence accrue d'espèces résistantes à la dissolution. Par conséquent, les résultats de ces échantillons doivent être interprétés avec une précaution particulière (i.e. Haddam et al., 2016, 2018).

Pour chaque échantillon fossile, entre 4 et 15 analogues ont été sélectionnés. La sélection correspond aux analogues présentant un faible coefficient de dissimilarité et s'arrête dès l'augmentation plus importante de ce coefficient. Le coefficient de dissimilarité correspond (Prell, 1985) à la distance entre l'assemblage de foraminifères de l'échantillon étudié et les assemblages modernes de la base de données Austral (Haddam et al., 2016). Enfin, les SSST ont été calculées par la moyenne des meilleures valeurs des analogues sélectionnés. L'erreur associée représente l'écart-type moyen des valeurs de température des analogues sélectionnés.

### **2.3.2. Les diatomées**

Les diatomées sont des microorganismes protistes photosynthétiques unicellulaires de la classe des Bacillariophyceae qui habitent tous les types de milieux aquatiques (océans, mers, rivières, lacs, lagunes, etc). Dans l'océan, les diatomées sont distribuées dans les régions froides et riches en nutriments où l'acide silicique n'est pas limitant, par exemple dans les régions polaires, les zones côtières et les zones d'upwelling (Crosta & Koç, 2007).

Les diatomées sont présentes dans les archives fossiles des sédiments marins depuis le Crétacé inférieur (Harwood & Gersonde, 1990) et, en raison de la composition siliceuse de leurs valves, elles peuvent être préservées dans les sédiments et être utilisées dans des études biostratigraphiques, géochimiques et paléocéanographiques (Crosta & Koç, 2007). Elles sont formées par une boîte de silice amorphe appelée frustule, qui mesure entre 2µm et 1-2 mm et composée de deux parties : l'épivalve et l'hypovalve (**Figure 2.2**). Selon leur morphologie, les diatomées sont subdivisées en centriques (symétrie radiale) et pennées (symétrie bilatérale). Le frustule est très ornementé et possède des pores, des processus labiaux, des processus internes et externes, des épines, des côtes, etc., ce qui leur confère une grande importance taxonomique (Crosta & Koç, 2007) (**Figure 2.3**).

Les diatomées se divisent par reproduction asexuée et sexuelle. Dans la reproduction asexuée, la cellule mère se divise en deux épithèques, qui génèrent une hypothèque. Après de nombreuses divisions, la taille de la cellule est réduite à un point critique où les diatomées initient un cycle de reproduction sexuée avec la formation d'une auxospore pour restaurer la taille et commencer un nouveau cycle de reproduction asexuée.

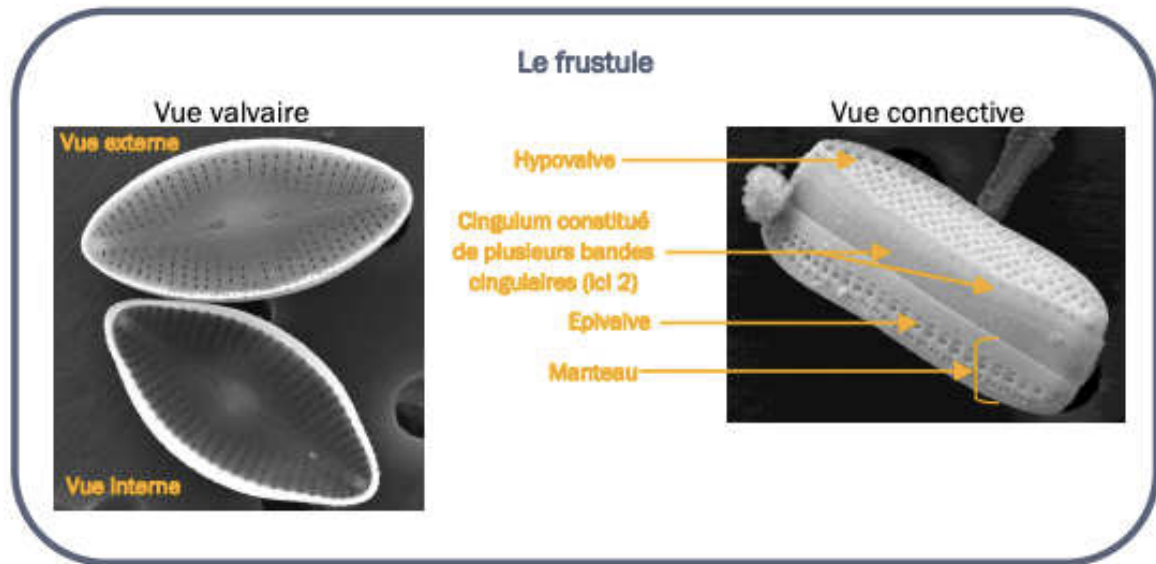


Figure 2.2 Morphologie du frustule d'une diatomée pennée. Figure extraite de Eulin et al., (2017).

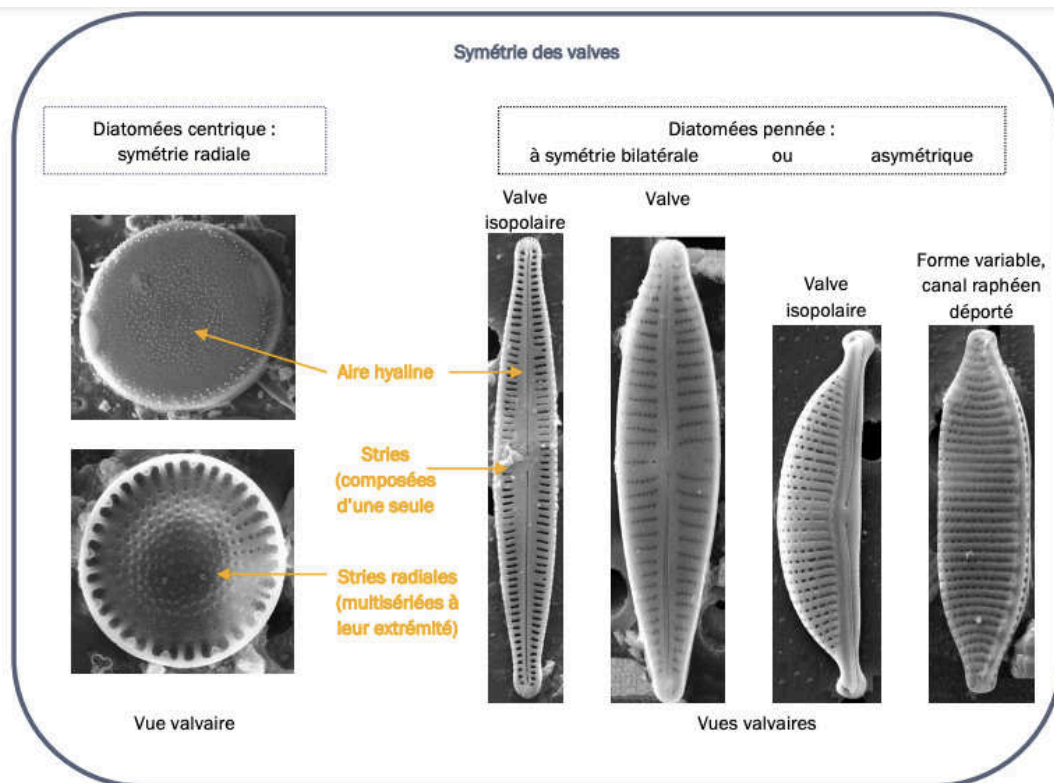


Figure 2.3 Morphologie des frustules des diatomées centriques et pennées. Figure extraite de Eulin et al., (2017).

Les diatomées représentent 20 % de la productivité primaire totale de la Terre et jusqu'à 40 % de la productivité marine totale (Tréguer et al., 2018). À la surface de l'océan, les diatomées incorporent du CO<sub>2</sub> par photosynthèse et transfèrent du carbone vers les niveaux trophiques supérieurs, dont une part sédimente ensuite dans la colonne d'eau, où la majeure partie du

carbone est reminéralisée en CO<sub>2</sub> et le reste rejoint les sédiments marins. Ce processus est appelé pompe biologique (Tréguer et al., 2018).

### **2.3.2.1. Analyse des diatomées**

Pour la quantification et l'identification des diatomées, j'ai fait une sélection de 58, 57 et 51 échantillons sur les carottes MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081 respectivement.

Afin d'identifier les diatomées, la matière organique a été retirée des sédiments selon le protocole fourni par Crosta et al., (2020) et détaillé ci-dessous. Cependant, j'ai adapté ce protocole pour fonctionner dans les conditions et équipements présents dans les laboratoires GEOPS de l'Université Paris Saclay et LSCE Ormes des Merisiers, Gif Sur Yvette.

1. Pour chaque échantillon sélectionné, le sédiment sec a été pesé sur une balance électronique et le poids a été enregistré dans un cahier de laboratoire (cette étape est très importante, car elle permet d'obtenir le nombre de diatomées par gramme de sédiment sec). Le sédiment pesé a été placé dans un bécher en verre et recouvert d'une feuille d'aluminium.

(\*) De l'étape 3 à l'étape 7, les analyses ont été effectués sous une hotte, avec des gants, une chemise de laboratoire et des lunettes de protection, car le H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> est très corrosif et nocif pour la peau et les yeux.

2. On a préparé une solution de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 35% + Pyrophosphate (Na<sub>4</sub>O<sub>7</sub>P<sub>2</sub>-10H<sub>2</sub>O) : pour 1 litre de solution on ajoute 870 ml d'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> à 35% + 130 ml d'eau distillée + 42 g de pyrophosphate. La solution a été agitée énergiquement et chauffée pour dissoudre complètement le pyrophosphate. Le pyrophosphate est un sel qui permet d'éliminer les argiles des sédiments.
3. 100 ml de solution de pyrophosphate et H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ont été ajoutés à chaque échantillon et laissés au repos pendant 1 heure. Les échantillons ont ensuite été chauffés à 60° C sur une plaque chauffante. Les échantillons commencent à faire effervescence lorsqu'ils sont chauffés, et il faut donc veiller à conserver un minimum de 100 ml de solution de pyrophosphate et H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dans le bécher. Lorsque les échantillons deviennent très effervescents, ils sont retirés de la plaque chauffante et quelques gouttes d'alcool sont ajoutées pour réduire la mousse. On arrête de chauffer les échantillons lorsqu'ils ne sont

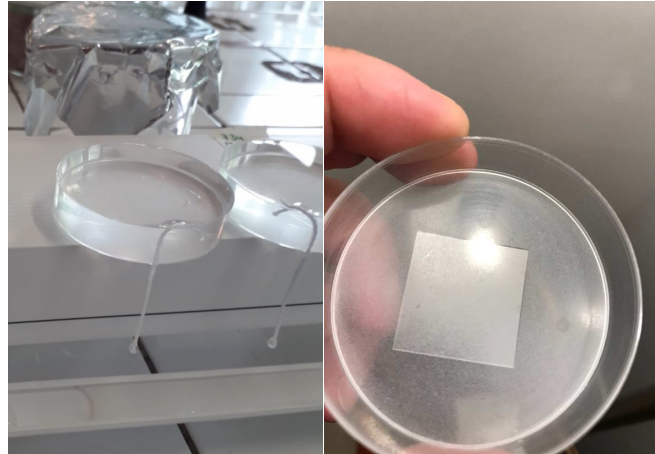
plus en effervescence. Chaque échantillon a été chauffé ~3 heures par jour et laissé au repos sous la hotte pendant ~24 heures. En raison de la forte présence de matière organique, notamment dans les échantillons de l'Holocène, ce processus a duré 4 à 5 jours par échantillon.



4. Dans chaque bécher, on a ajouté 5 ml d'acide chlorhydrique (HCl) à 37 % pour éliminer les carbonates et on a laissé décanter sous la hotte pendant 24 heures.
5. Enfin, à l'aide d'une pipette Pasteur de 5 ml, environ ~50 ml ont été retirés de chaque bécher en verre, en prenant soin de ne pas toucher ou enlever le sédiment décanté au fond. Ensuite, afin d'éliminer l'acide chloridique (HCl), chaque échantillon a été soigneusement transféré dans un tube Falcon de 50 ml (préalablement étiqueté avec le nom de la carotte et la profondeur analysée) et centrifugé pendant 5 minutes à 2000 tours par minute. Après chaque centrifugation, ~35 ml d'eau ont été soigneusement retirés avec une pipette Pasteur de 5 ml et remplis d'eau distillée pour laver l'échantillon. Le cycle de centrifugation a été répété jusqu'à l'obtention d'un pH neutre.
6. L'échantillon de sédiment de chaque tube Falcon a été soigneusement placé dans un bécher en verre de 250 ml (préalablement étiqueté avec le nom de la carotte et la profondeur). Ceci a été fait à l'aide d'une pissette avec de l'eau distillée. Le bécher a été recouvert avec une feuille d'aluminium et laissé en décantation pendant 24 heures.

7. Après 24 heures, chaque bécher a été laissé avec un volume initial de 50 ml pour les carottes MD07-3100 et MD07-3081 et 150 ml pour la carotte MD07-3088 (J'ai utilisé 150 ml de volume initial pour diluer la grande quantité de grosses particules qui empêchaient l'identification des diatomées au microscope).
8. Les lames, les lamelles couvre-objet et les boîtes de Pétri en plastique ont été nettoyés à l'alcool. Cette étape est très importante pour éliminer tout résidu de graisse ou de saleté, car autrement l'échantillon ne sera pas réparti uniformément dans la boîte de Pétri.
9. Pour cette étape, un support en plastique a été construit pour placer les boîtes de Pétri et faciliter l'extraction de l'eau. Quinze boîtes de Pétri correspondant à 5 échantillons de sédiment en triplicata ont été placées sur ce support.
10. Ensuite, une goutte d'eau distillée a été placée au centre de chaque boîte de Pétri et une lamelle couvre-objet en verre a été placée sur le dessus. La lamelle couvre-objet se colle à la boîte de Pétri par capillarité. Il faut éviter de laisser des bulles d'air entre la lamelle couvre-objet et la boîte de Pétri, car si des bulles sont laissées quand on ajoute l'échantillon de sédiment, la lamelle couvre-objet se déplacera et ne sera pas recouverte uniformément.
11. Une fois la lamelle couvre-objet collée à la boîte de Pétri, on ajoute environ 2 millimètres d'eau distillée (couvrant toute la lamelle couvre-objet). Au cours de cette étape, on a vérifié que la lamelle couvre-objet ne se déplace pas du centre.
12. Ensuite, l'échantillon de sédiment (étape 7) a été prélevé et lentement, avec des mouvements circulaires, l'échantillon a été bien mélangé sans créer de tourbillon. Une fois l'échantillon homogénéisé, 300  $\mu$ l ou 400  $\mu$ l d'échantillon ont été rapidement prélevés et déposés au centre de la boîte de Pétri. (Les embouts utilisés dans la micropipette étaient prédécoupés (3 mm) afin d'éviter la sélection des diatomées par la taille). Immédiatement après, les boîtes de Pétri ont été soigneusement remplies d'une pipette avec de l'eau distillée et laissées à décanter pendant 24 heures. Cette étape a été réalisée pour chaque réplique dans chaque boîte de Pétri.
13. Après 24 heures, un morceau de laine de 3 cm a été coupé et placé dans un bécher avec de l'eau distillée. Une fois la laine mouillée, elle est placée sur le côté de la boîte de

Pétri, en prenant soin de ne pas toucher la lamelle couvre-objet ou le fond pour éviter de disperser l'échantillon. La laine permet de retirer l'eau des échantillons goutte à goutte. Ce processus dure entre 24 et 30 heures.



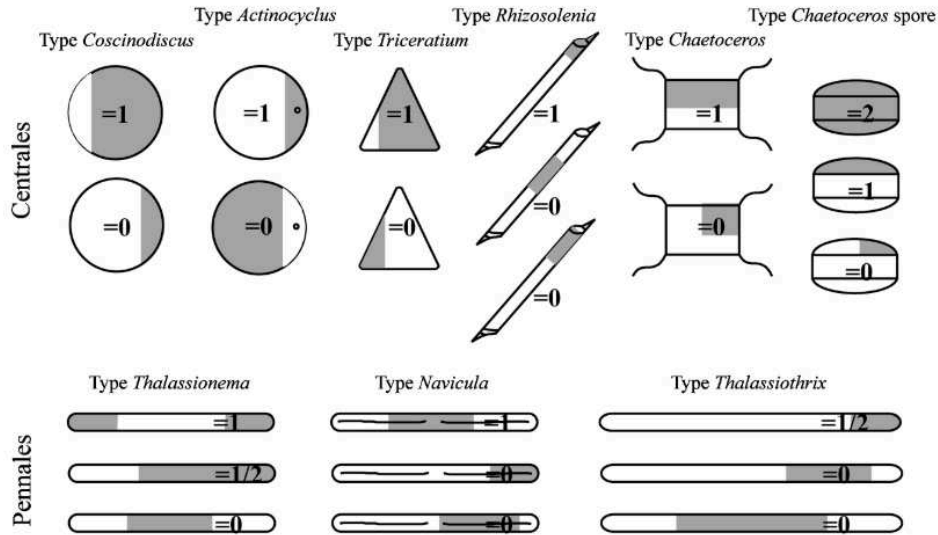
14. Trois lames de verre par échantillon ont été étiquetées avec le nom de la carotte, la profondeur, le répliquat (R1, R2 et R3) et le  $\mu\text{l}$  d'échantillon utilisé. Cette étape a été réalisée en portant des gants pour éviter de salir les lamelles couvre-objet.
15. Pour le montage permanent des échantillons, une goutte de Naphrax a été placée au centre de chaque lame, puis la lamelle couvre-objet contenant l'échantillon de sédiment a été délicatement déposée sur la lame. La lame a ensuite été placée sur la plaque chauffante jusqu'à ce que le Naphrax se disperse et forme de grosses bulles. La lame a ensuite été retirée et pressée avec un fin bâton de bois pour éliminer les bulles. Enfin, les échantillons ont été laissés à refroidir pendant 4 heures et stockés dans des boîtes à lames jusqu'à l'observation microscopique.

#### **2.3.2.2. Identification et comptage des diatomées**

Les diatomées ont été identifiées et comptées à un grossissement de 1000X en utilisant un microscope optique Leica-P750 et de l'huile d'immersion. En raison de la faible abondance des diatomées, trois comptages indépendants (si possible) ont été effectués pour la plupart des échantillons pour obtenir un minimum de 300 valves.

Pour compter les valves de diatomées, on a utilisé la méthode décrite par Schrader et Gersonde (1978). Cette méthode indique le fragment minimum qu'une diatomée doit avoir pour pouvoir compter une valve (**Figure 2.4**).





**Figure 2.4** Convention de comptage pour les diatomées centrées et pennées. La zone en grisé représente les fragments de diatomées que l'on peut trouver sur les lames. Figure extraite de Crosta & Koç, (2007).

Les diatomées ont été identifiées en respectant l'approche taxonomique selon Cupp, (1943); Hasle & Syvertsen, (1996); Johansen & Fryxell, (1985); Tomas, (1998); Wilks & Armand, (2017).

L'abondance totale des diatomées en valves par gramme de sédiment sec a été déterminée à l'aide de l'équation suivante :

$$N^{\circ} \text{ Diatomeés}(\text{valves } g^{-1}) = \left( \frac{N_d}{N_v} \right) \times \left( \frac{S_p}{S_m} \right) \times \left( \frac{V_t}{V_e} \right) \times \left( \frac{1}{P} \right)$$

Où :

$N_d$  correspond au nombre de valves de diatomées comptées.

$N_v$  correspond au nombre de champs de vision comptés.

$S_p$  correspond à la surface de la boîte de petri ( $cm^2$ ).

$S_m$  correspond à la surface du champ de vision du microscope utilisé ( $cm^2$ ).

$V_t$  correspond au volume total de la dilution de l'échantillon (ml).

$V_e$  correspond au volume utilisé pour chaque échantillon (ml).

$P$  correspond au poids sec de l'échantillon utilisé en grammes.

Le pourcentage de fragments a été calculé à partir de la formule suivante :

$$\% \text{ Fragments diatomées} = 100 \times \frac{\text{FC}}{(\text{FC} + \text{TD})}$$

Où :

FC : correspond au nombre total de fragments de diatomées comptés par échantillon.

TD : correspond au nombre total de diatomées comptés par échantillon.

Pour chaque échantillon, l'erreur associée à chaque espèce a été calculée selon la méthodologie décrite par Patterson & Fishbein, (1989).

Les spores de *Chaetoceros* (*Chaetoceros* spp. resting spores, CRS) n'ont pas été identifiés au niveau de l'espèce. En raison de leur écologie similaire, nous avons regroupé les espèces : *Thalassionema nitzschioides* var. *capitulata* et *Thalassionema nitzschioides* var. *lanceolata* en tant que *Thalassionema nitzschioides* groupe (Esper et al., 2010; Cárdenas et al., 2019) ; les espèces *Shionodiscus trifultus* et *Shionodiscus frenguelli* ont été regroupées également en tant que *Shionodiscus* groupe en raison de leur forte ressemblance au microscope optique et en raison de leurs caractéristiques écologiques similaires (Wilks & Armand, 2017) ; *Azpeitia tabularis* var. *tabularis* et *Azpeitia tabularis* var. *egreerius* ont été regroupés en tant que *Azpeitia tabularis*. *Shionodiscus oestrupii* var. *oestrupii* est ci-après dénommé *Shionodiscus oestrupii*.

J'ai regroupé les deux espèces *Thalassiothrix antarctica* et *Thalassiothrix longissima* sous le nom de *Thalassiothrix* spp., car étant observées dans les sédiments sous forme de fragments, il était difficile de les discriminer (Zielinski & Gersonde, 1997). Les espèces du genre *Cocconeis* ont été regroupées sous le nom de *Cocconeis* spp. group, car la plupart des espèces avaient une taille inférieure à 8 microns ce qui rend difficile leur discrimination. Les espèces de Pennate bentoniques ont été regroupées sous le nom de Pennate spp. benthic car elles ont été observées en petites tailles (5-8 microns) ce qui rendait leur identification au microscope difficile. Il n'a pas été possible d'identifier les très petits *Thalassiosiras*, au niveau de l'espèce, donc je les ai regroupés sous le nom de *Thalassiosira* <10µm. Ces taxons sont surtout observés dans les zones côtières (Xavier Crosta, communication personnelle).

### 2.3.2.3. Analyse statistique des diatomées

Pour identifier les groupes d'espèces présentant des variations similaires, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à l'aide de PASTv4.10 (Hammer, 2020). La sélection des espèces a été basée sur les règles suivantes : (1) présents dans les échantillons dans lesquels plus de 150 valves ont été comptées, (2) représentent plus de 2 % dans au moins un roman, (3) ont été observés à plus de trois niveaux dans la carotte. Cependant, pour interpréter nos données, nous avons calculé l'erreur associée à chaque pourcentage (Patterson & Fischbein., 1989). Pour réduire l'impact des espèces les plus abondantes, les données ont été normalisées à  $\text{Log}(x+1)$  où  $x$  est l'abondance relative. Les facteurs dont la charge factorielle est supérieure ou égale à  $|0,2|$  ont été interprétés.

## 2.4. Les traceurs géochimiques : les isotopes de l'oxygène

### 2.4.1. $\delta^{18}\text{O}$ *G. bulloides* carotte MD07-3081

L'utilisation des isotopes stables de l'oxygène mesurés sur les foraminifères planctoniques est indispensable dans l'étude des changements paléocéanographiques car les analyses effectuées sur leurs tests carbonatés permettent de remonter à la composition isotopique de l'eau dans laquelle ils se sont développés. Les foraminifères planctoniques sont directement liés au cycle de l'eau, car ils conservent les caractéristiques de l'eau océanique (température et salinité) à partir de laquelle ils ont formé leur coquille de carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ).

Le ratio isotopique entre  $^{18}\text{O}$  (isotope représentant 0,2%) et  $^{16}\text{O}$  (isotope plus léger représentant 99,762%) est exprimé en parties pour mille (‰) avec le symbole  $\delta$  et est obtenu en analysant la fraction  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  de l'échantillon par rapport à un standard, qui dans le cas du carbonate est le PDB (Pee Dee Belemnite) et pour l'eau de mer le SMOW (Standard Mean Ocean Water). La formule utilisée est :

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

Pour la carotte MD07-3081, des mesures isotopiques  $\delta^{18}\text{O}$  du foraminifère planctonique *G. bulloides* (fraction 250-315  $\mu\text{m}$ ) ont été obtenues sur 108 échantillons avec une résolution en profondeur de tous les 10 cm. Entre 5 et 30 coquilles de *G. bulloides* ont été utilisées pour les

mesures, nettoyées avec du méthanol dans un bain à ultrasons et mesurées avec un spectromètre de masse GV Isoprime au LSCE, Gif Sur Yvette, France.

Les mesures sont rapportées au standard Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB) par rapport au standard NBS-19, avec une reproductibilité externe moyenne ( $1 \sigma$ ) pour les standards carbonatés de  $\pm 0,06 \text{ ‰}$  pour  $\delta^{18}\text{O}$ . La reproductibilité des mesures isotopiques de  $\delta^{18}\text{O}$  de *G. bulloides* dans cette carotte est de  $0,11 \text{ ‰}$ .

#### 2.4.2. $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer de surface

Une fois que la température des échantillons de foraminifères fossiles est reconstruite, et avec les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  mesurés sur l'espèce *G. bulloides*, il est possible de reconstruire le  $\delta^{18}\text{O}_w$  en utilisant l'équation de Shackleton, (1974) :

$$T = 16.9 - 4.38 \times (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w) + 0.1 \times (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w)^2$$

Où :

T correspond à la reconstruction SSST de chaque échantillon exprimé en °C.

$\delta^{18}\text{O}_c$  correspond au  $\delta^{18}\text{O}$  *G. bulloides* mesuré dans chaque échantillon.

$\delta^{18}\text{O}_w$  correspond au  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux de surface, qui est influencé par la composition isotopique moyenne de l'océan, l'évaporation, les précipitations et les apports fluviaux.

Comme le  $\delta^{18}\text{O}_w$  est étroitement lié à la salinité des eaux de surface, nous pouvons considérer que ses variations reflètent les changements de salinité. Au cours de la déglaciation, le signal isotopique est donc lié aux variations de salinité, auxquelles s'ajoute un changement isotopique moyen global de  $\sim 1.05 \text{ ‰}$  de l'oxygène océanique dû aux flux d'eau de fonte des calottes glaciaires (Duplessy et al., 2002). Nous avons choisi de ne pas corriger les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}_w$  de ce dernier paramètre car la chronologie du signal  $\delta^{18}\text{O}_w$  obtenu peut présenter des variations temporelles locales importantes jusqu'à plusieurs milliers d'années (Ganopolski et al., 2009). Pour cette étude, nous utiliserons l'anomalie  $\delta^{18}\text{O}_w$ , c'est-à-dire la différence de  $\delta^{18}\text{O}_w$  entre un échantillon prélevé le long de la carotte étudié et le plus récent. Grâce à cette approche, nous n'avons pas besoin de corriger les valeurs  $\delta^{18}\text{O}_w$  de *G. bulloides* de l'effet vital, en faisant l'hypothèse que le fractionnement isotopique qui se produit lorsque cette espèce calcifie sa coquille est resté le même à travers le temps.

Dans le cadre de cette thèse, j'utiliserai les valeurs  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{18}\text{O}_w$  publiées dans Haddam et al., (2018) pour les carottes MD07-3100 et MD07-3088. Pour le calcul de l'anomalie  $\delta^{18}\text{O}_w$  la formule utilisée par Haddam et al., (2018) a été utilisée et les valeurs n'ont pas été corrigées avec le signal global :

$$\text{Anomalie } \delta^{18}\text{O}_w(\text{niveau } i) = \delta^{18}\text{O}_w(\text{niveau } i) - \delta^{18}\text{O}_w(\text{le plus récent})$$





## Chapitre 3: Base de données des diatomées dans le secteur Pacifique et Atlantique de l'océan Austral

Dans ce chapitre je décrirai dans un premier temps les principes de classification et les paramètres physico-chimiques (température, salinité, phosphate et silice) et écologiques associés à l'abondance des diatomées. Ensuite, j'analyserai la distribution des espèces présentes dans 7 bases de données publiées précédemment sur les diatomées provenant de sédiments de surface dans les secteurs pacifique et atlantique de l'océan Austral. Je décrirai d'abord les principaux taxons de diatomées trouvés dans la base de données, puis je me concentrerai sur les espèces observées dans les 3 carottes étudiées.

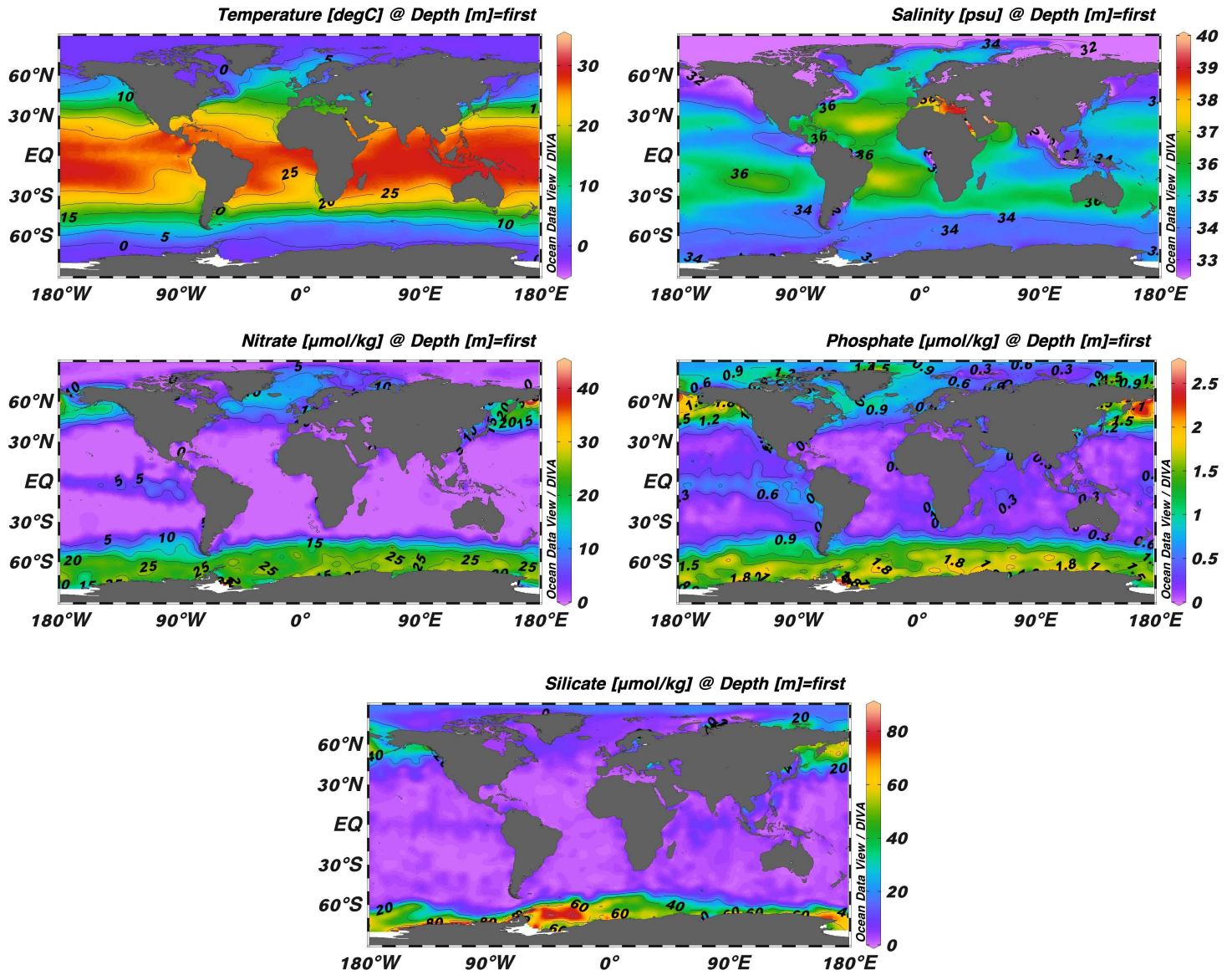
Il est important de mentionner qu'entre 41° et 49° S du secteur sud-est Pacifique, il n'y a pas d'études de diatomées couvrant la dernière période glaciaire et la déglaciation. Par conséquent, les données publiées dans cette thèse permettront de compléter les connaissances taxonomique et écologique de ces micro-organismes dans le SEP dans le passé.

### 3.1. Paramètres de classification des diatomées

Comme décrit précédemment dans le chapitre 2, la plus grande abondance de diatomées dans l'océan mondial est principalement concentrée dans les régions froides polaires où la silice, indispensable à la constitution de leur squelette, n'est pas limitante et dans les systèmes d'upwelling côtiers et équatoriaux marqués par une plus forte disponibilité en nutriments (Crosta & Koç, 2007; Malviya et al., 2016). Par conséquent, l'analyse des assemblages de diatomées peut se révéler un outil puissant en paléocéanographie pour la compréhension des changements climatiques passés.

A l'échelle de l'océan global, un gradient marqué de la distribution de la température (SST) et de la salinité de surface peut être observé de l'équateur (températures ~30° C ; salinité 36-37 psu) vers les pôles (températures proches de 0° C ; salinité entre 33-34 psu). Dans les zones côtières, la salinité est fortement affectée par l'évaporation, les précipitations et les apports par les rivières (Lagerloef et al., 2010). Plus spécifiquement, dans le SEP, les apports sont amplifiés par l'influence des calottes de glace nord et sud patagonienne (**Figure 3.1**)





**Figure 3.1** Distribution globale des eaux de surface en été de la température (°C), de la salinité (psu), du phosphate (μmol/kg), du nitrate (μmol/kg), et de la silice (μmol/kg). Cette figure a été réalisée à partir des données océaniques WOA 2018 (température : Locarnini et al., 2019 ; salinité : Sweng et al., 2019 ; nitrate, phosphate et silicate : Garcia et al., 2019b) et du logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021.

Selon leur mode de vie, les diatomées peuvent être classées comme planctoniques ou pélagiques et benthiques (associées au substrat), toutes vivant dans la zone photique : au maximum les 100 premiers mètres de la colonne d'eau. En fonction de la distance par rapport à la côte, la zone pélagique peut être divisée en zone néritique ou côtière-planctonique (sur le plateau continental) et en zone océanique (océan ouvert, en dehors du plateau continental).

### 3.2. Compilation de la base de données des diatomées

Pour analyser la distribution des assemblages de diatomées présents dans les 3 carottes étudiées, 7 bases de données de diatomées ont été compilées à partir de sédiments superficiels de l'hémisphère sud : zone subantarctique de l'océan Atlantique (Armand et al., 2005; Crosta et al., 2005; Romero et al., 2005), la côte sud-américaine dans le SEP (Abrantes et al., 2007; Romero & Hebbeln, 2003), le secteur Pacifique et Atlantique de l'océan Austral (Esper et Gersonde., 2014), le secteur Pacifique de l'océan Austral (Benz et al., 2016) et le secteur Passage de Drake-Antarctique (Cárdenas et al., 2019) (**Figure 3.2**). Ces publications seront brièvement décrites ci-dessous :

**Armand et al., 2005; Crosta et al., 2005 et Romero et al., 2005:** ils ont publié 24 carottes du secteur Atlantique de l'océan Austral. Armand et al., (2005) ont publié des assemblages de diatomées associés à la glace, Crosta et al., (2005) ont publié des espèces de diatomées associées à l'océan ouvert et Romero et al., (2005) ont publié des diatomées de la zone subantarctique.

(Armand et al., 2005 : <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.425284>).

(Crosta et al., 2005 : <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.425285>).

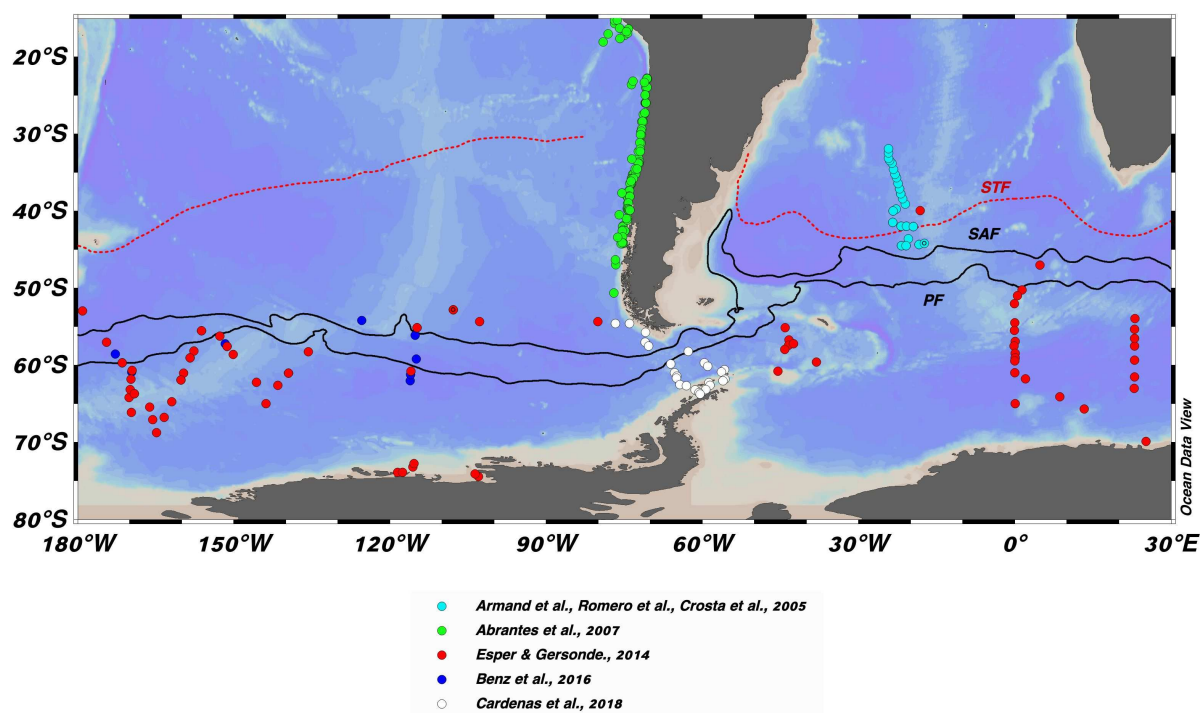
(Romero et al., 2005 : <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.425286>).

**Abrantes et al., (2007)** ont étudié les sédiments de surface de la marge côtière du SEP située entre 15° N et 50° S en compilant une base de données de 142 sommets de carottes.

**Esper and Gersonde, (2014)** ont publié une base de données composée de 80 échantillons de surface des secteurs sud de l'océan Pacifique et Atlantique entre 40° S et 80° S, maintenant disponible (<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.828674>).

**Benz et al., (2016)** présentent l'étude de 17 carottes de sédiments marins de l'océan Austral situées entre la zone antarctique et subantarctique. Pour la compilation de la base de données présentée dans cette thèse, j'ai utilisé les abondances de diatomées du sommet des 17 carottes.

Enfin **Cárdenas et al., (2019)** ont analysé les assemblages de diatomées de 24 échantillons de sédiments de surface situés entre l'ouest et le centre du passage de Drake, depuis la marge continentale Chilienne et Argentine jusqu'aux îles Shetland du Sud et au détroit de Bransfield (<https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.927022>).



**Figure 3.2** Carte des carottes collectées dans les différentes bases de données des diatomées. La couleur pour chaque base est indiquée ci-dessus. Cette étude considère l'ensemble de ces bases. La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021.

### 3.3. Principaux Taxons de diatomées dans les secteurs Pacifique et Atlantique de l'océan Austral

Cette nouvelle compilation des bases de données est composée de 244 sommets de carottes situées entre 15° et 80° S, avec un total de 117 taxons de diatomées décrits. Au total, 70 taxons présentaient une abondance supérieure à 2 % et 54 d'entre eux ont été identifiés au niveau des espèces. Je présente donc ces 54 espèces.

Cette nouvelle compilation m'a permis de classer les espèces de diatomées de la zone en 7 groupes que j'ai déterminé selon la position des principaux fronts (STF, SAF et PF), les

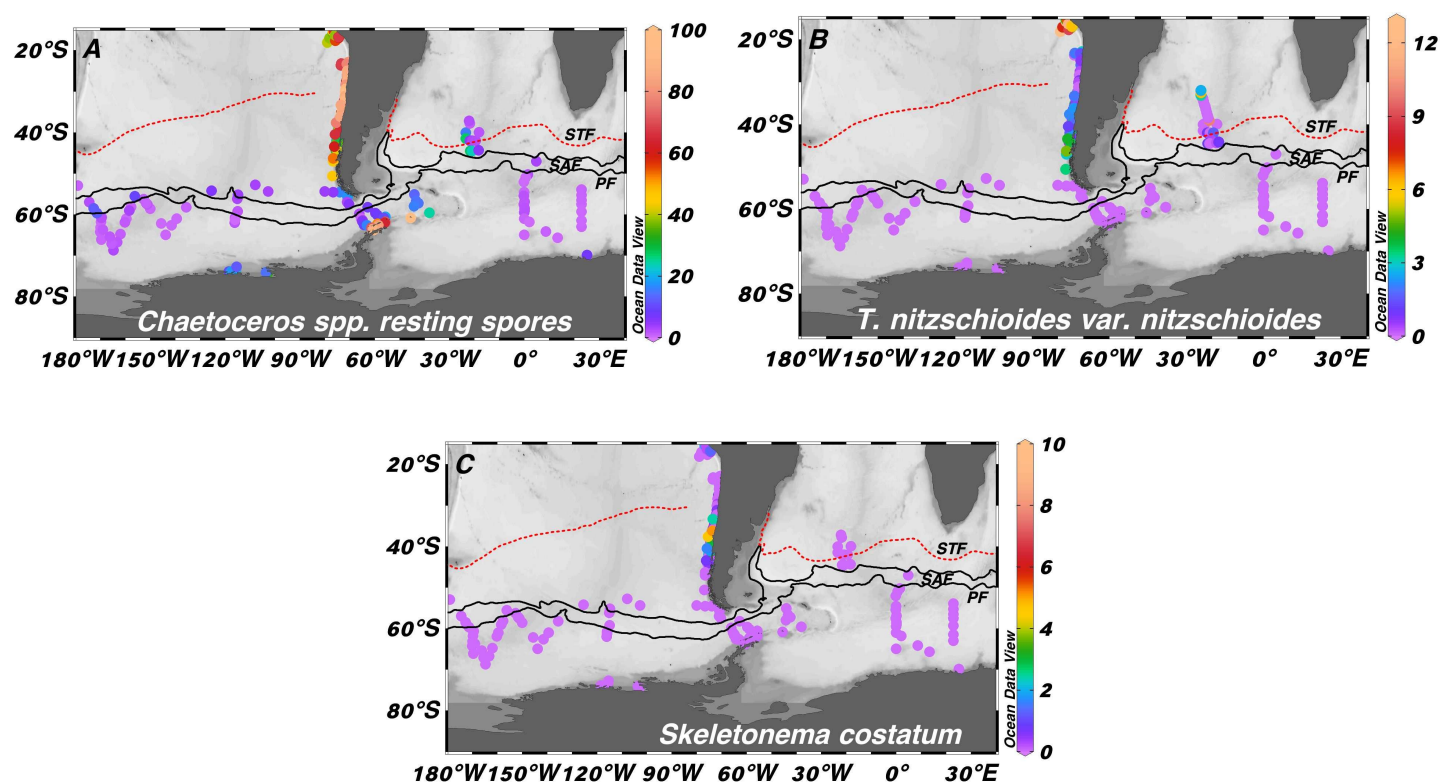
caractéristiques hydrologiques et la disponibilité des nutriments (**Table 3.1**). Dans ce qui suit, je présente cette répartition et détaille chacun des groupes en me focalisant sur les espèces présentes dans les carottes étudiées.

**Table 3.1** Classification des 54 taxons de diatomées identifiés au niveau des espèces, qui présentaient une abondance de plus de 2% de la base de données dans le secteur Pacifique et Atlantique L'océan Austral. En noir foncé sont indiquées les espèces trouvées dans les 3 carottes étudiées (MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081).

1) Groupe Nutriments abondants	2) Groupe Planctonique-côtier	3) Groupe Benthique-côtier
<i>Chaetoceros resting spores</i>	<i>Coscinodiscus radiatus</i>	<i>Cocconeis spp.</i>
<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Nitzschia interrupta</i>	<i>Paralia sulcata</i>
<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>nitzschioides</i>	<i>Shionodiscus oestrupii</i> var. <i>venrickae</i>	
	<i>Thalassiosira aestivalis</i>	
	<i>Thalassiosira anguste-lineata</i>	
	<i>Thalassiosira delicatula</i>	
	<i>Thalassiosira eccentrica</i>	
	<i>Thalassiosira ferelineata</i>	
	<i>Thalassiosira gerloffii</i>	
	<i>Thalassiosira mendiolana</i>	
	<i>Thalassiosira nanolineata</i>	
	<i>Thalassiosira pacifica</i>	
	<i>Thalassiosira poro-irregulata</i>	
	<i>Thalassiosira tumida</i>	
4) Groupe Subtropical	5) Groupe Polaire	6) Groupe Antarctique
<i>Actinocyclus curvatus</i>	<i>Corethron pennatum</i>	<i>Actinocyclus actinochilus</i>
<i>Actinocyclus ellipticus</i>	<i>Eucampia antarctica</i>	<i>Fragilariopsis cylindrus</i>
<i>Actinocyclus octonarius</i>	<i>Fragilariopsis curta</i>	<i>Fragilariopsis vanheurckii</i>
<i>Alveus marinus</i>	<i>Fragilariopsis kerguelensis</i>	<i>Thalassiosira antarctica</i>
<i>Azpeitia nodulifera</i>	<i>Fragilariopsis obliquecostata</i>	
<i>Azpeitia tabularis</i>	<i>Fragilariopsis rhombica</i>	
<i>Azpeitia tabularis</i> var. <i>egregius</i>	<i>Fragilariopsis separanda</i>	
<i>Fragilariopsis doliolus</i>	<i>Odontella weissflogii</i>	
<i>Hemidiscus cuneiformis</i>	<i>Rhizolenia antennata</i> f. <i>semispina</i>	
<i>Porosira pseudodenticulata</i>	<i>Shionodiscus gracilis</i> var. <i>gracilis</i>	
<i>Rhizolenia bergonii</i>	<i>Shionodiscus gracilis</i>	
<i>Roperia tessellata</i>	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>lanceolata</i>	
<i>Shionodiscus oestrupii</i>	<i>Thalassiosira lentiginosa</i>	
<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>parva</i>	<i>Thalassiosira oliverana</i>	
<i>Thalassiosira lineata</i>		
<i>Thalassiosira symmetrica</i>		
		7) Groupe d'eau douce
		<i>Chaetoceros muelleri</i> resting spores

### 3.3.1. Nutriments abondants

Dans ce groupe, j'ai inclus les espèces qui sont principalement distribuées dans les zones côtières, spécifiquement où il y a une forte abondance de nutriments tels que le nitrate et le phosphate : *Chaetoceros* spp. resting spores, *Skeletonema costatum* et *Thalassionema nitzschioides* var. *nitzschioides* (Figure 3.3).



**Figure 3.3** Distribution dans les secteurs Pacifique et Atlantique de l'océan Austral du groupe Nutriments abondants : **A)** *Chaetoceros* spp. resting spores, **B)** *T. nitzschioides* var. *nitzschioides* et **C)** *Skeletonema costatum*. La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021.

***Chaetoceros* spp. resting spores** : *Chaetoceros* est un important genre de diatomées centriques planctoniques. Environ un tiers des espèces de *Chaetoceros* ont la capacité de former des spores qui correspondent à des cellules fortement silicifiées (Crosta et al., 1997 et références incluses). Leur habitat est Planctonique–côtier et leur distribution dans le SEP est abondante dans les zones influencées par l'upwelling côtier du Pérou-Chili (Romero & Hebbeln, 2003; Abrantes et al., 2007) et dans les eaux riches en nutriments (Figure 3.3-A).

***T. nitzschioides* var. *nitzschioides*** : est une diatomée pennate planctonique, marine, cosmopolite, associée à une forte disponibilité de nutriments (Figure 3.3-B)

L'habitat de cette espèce est planctonique–côtier et leur distribution dans le SEP montre des abondances supérieures à 10 % dans la zone d'upwelling équatorial (Abrantes et al., 2007).

***Skeletonema costatum*** : diatomée centrique (formant une chaîne tubulaire) associée à une forte disponibilité de nutriments avec un habitat planctonique–côtier. Leur distribution dans le SEP se caractérise par des fortes abondances autour de 35° S, associées à l'upwelling côtier Pérou-Chili (Abrantes et al., 2007) (**Figure 3.3-C**).

### 3.3.2. Groupe Planctonique-côtier

Dans ce groupe, j'ai inclus 14 espèces qui sont principalement distribuées sur le plateau continental, dans les zones tempérées à chaudes (**Figure 3.4**).

Les espèces suivantes sont décrites : *Thalassiosira eccentrica*, *Coscinodiscus radiatus*, *Thalassiosira anguste-lineata*, *Thalassiosira pacifica* et *Shionodiscus oestrupii* var. *venrickiae* (ces espèces ont été identifiées dans les 3 carottes étudiées dans cette thèse).

***Thalassiosira eccentrica*** : diatomée centrique, planctonique, marine avec une distribution cosmopolite sauf dans les océans Arctique et Antarctique (Tomas, 1998). Leur habitat est principalement planctonique-côtier, bien qu'il soit également possible de trouver quelques formes en océan ouvert (Hasle, 1976). Dans le SEP, *Thalassiosira eccentrica* est principalement distribuée dans la zone planctonique côtière avec des abondances ~12 % entre 42° et 43° S, avec des abondances similaires également observées dans la zone océanique subantarctique de l'océan Atlantique (**Figure 3.4-A**).

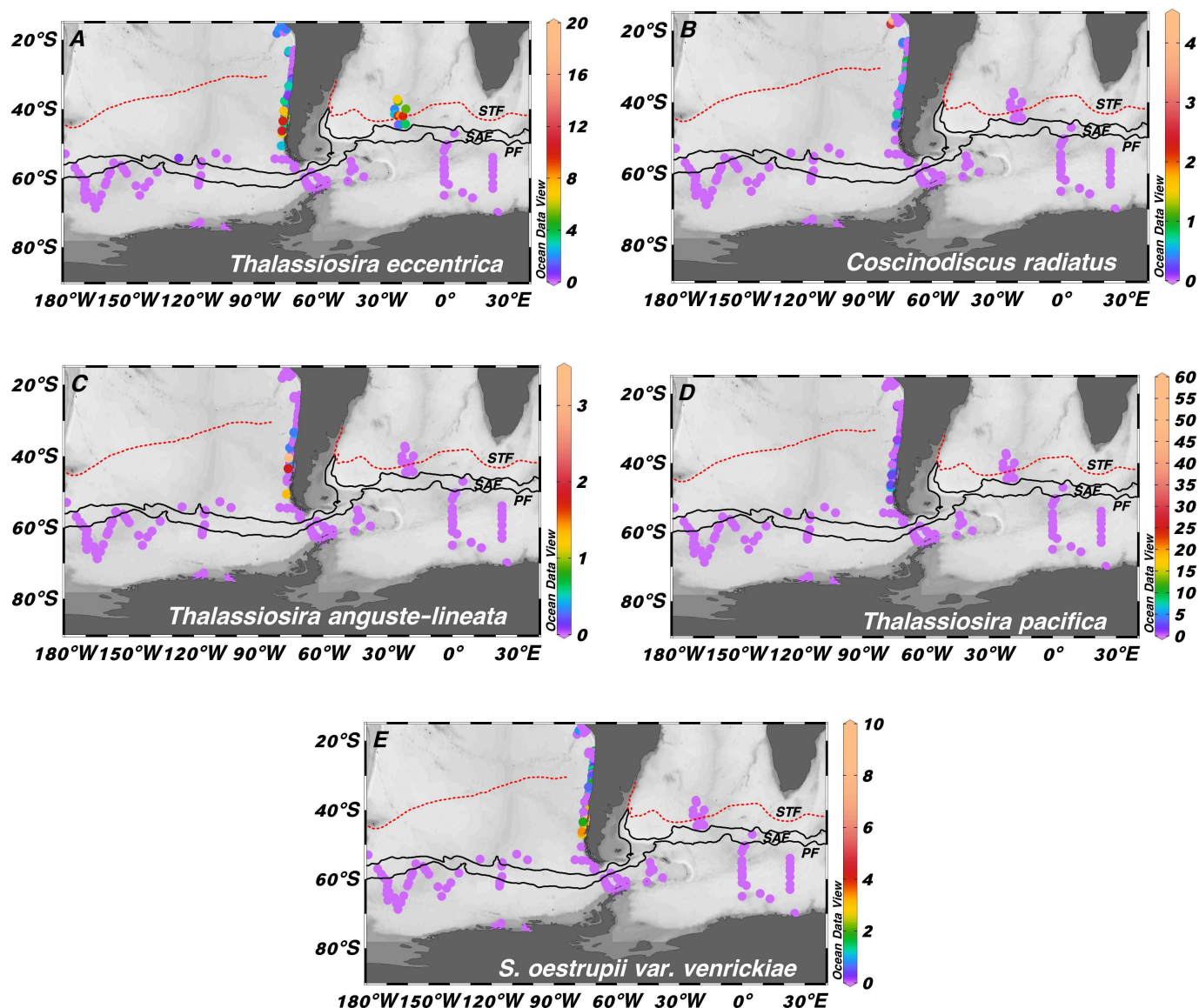
***Coscinodiscus radiatus*** : diatomée centrique, planctonique, marine, cosmopolite, se trouvant principalement dans les eaux tempérées avec un habitat planctonique–côtier. Dans le SEP, cette espèce est distribuée de 41° S vers le nord, avec les plus grandes abondances observées autour de 20° S dans la zone subtropicale (**Figure 3.4-B**).

***Thalassiosira anguste-lineata*** : diatomée centrique, marine, planctonique avec un habitat planctonique–côtier. La distribution de *Thalassiosira anguste-lineata* dans le SEP présente des faibles abondances (2-3.5 %) entre ~40 et 45° S (**Figure 3.4-C**).

***Thalassiosira pacifica*** : diatomée centrique, planctonique et marine que se trouve dans les océans froids à subtropicaux (Park et al., 2016). Cette espèce présente un habitat planctonique–

côtier et une distribution dans le SEP principalement centrée dans la zone côtière du Chili entre 32° et 48° S (**Figure 3.4-D**).

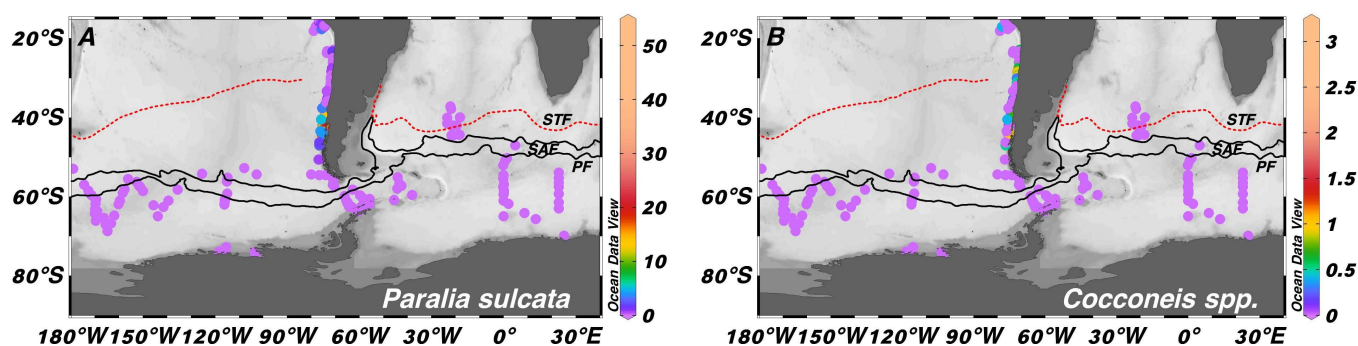
*Shionodiscus oestrupii* var. *venrickiae* : diatomée centrique, planctonique, marine, associée au plateau continental des zones tropicales à subtropicales (Fryxell & Hasle, 1980). Son habitat est planctonique–côtier avec une distribution dans le SEP entre 32° et 48° S (**Figure 3.4-E**).



**Figure 3.4** Distribution dans les secteurs Pacifique et Atlantique de l’océan Austral du groupe Planctonique–côtier : **A)** *Thalassiosira eccentrica*, **B)** *Coscinodiscus radiatus*, **C)** *Thalassiosira anguste-lineata*, **D)** *Thalassiosira pacifica* y **E)** *S. oestrupii* var. *venrickiae*. La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctic) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021.

### 3.3.3. Groupe Benthique-côtier

Ce groupe est associé au plateau continental, dans les zones proches des rivières (par exemple, la rivière Biobio, Chili) et dans les zones côtières des fjords et des canaux chiliens. Ces zones présentent des salinités proches de ~34 psu et des températures tempérées. Je décrirai ci-dessous l'espèce *Paralia sulcata* et le groupe de taxons *Cocconeis* spp. group.



**Figure 3.5** Distribution dans les secteurs Pacifique et Atlantique de l'océan Austral du groupe Benthique-côtier : **A)** *Paralia sulcata*, **B)** *Cocconeis* spp. La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021.

***Paralia sulcata*** : diatomée centrique, formant des chaînes, présente dans le benthos et le plancton, d'origine saumâtre à marine (McQuoid & Nordberg, 2003). Son habitat est benthique-côtier avec une distribution dans le SEP dans les sédiments côtiers entre ~38 et 42° S au large de l'embouchure de la rivière Biobio (Abrantes et al., 2007) (**Figure 3.5-A**).

***Cocconeis* spp.** : est un genre appartenant aux diatomées pennates diversifiées qui habitent les eaux douces et marines en milieu benthique-côtier se développant des tropiques aux régions polaires (Al-Handal et al., 2019). Leur distribution dans le SEP est principalement concentrée dans la zone côtière au sud de 37° S (Romero & Hebbeln, 2003) (**Figure 3.5-B**).

### 3.3.4. Groupe Subtropical

Sous ce groupe, j'ai inclus les 16 espèces qui peuvent vivre dans de larges gammes de température entre les zones subantarctiques et subtropicales, avec leurs plus grandes abondances observées à des températures chaudes, associées à une faible teneur en nutriments (**Figure 3.6**). Les espèces décrites sont : *Actinocyclus curvatulus*, *Azpeitia tabularis*, *Fragilariopsis doliolus*, *Hemidiscus cuneiformis*, *Rhizosolenia bergonii*, *Roperia tessellata*, *Shionodiscus oestrupii* var. *oestrupii* et *Thalassiosira lineata* (ces espèces ont été identifiées dans les 3 carottes étudiées dans cette thèse).



*Actonocyclus curvatulus* : diatomée centrique, marine, avec une distribution cosmopolite et un habitat planctonique–côtier. La distribution de *Actonocyclus curvatulus* dans le SEP est concentré dans la zone côtière entre 30° et 48° S, avec des abondances de moins de ~2 % (Romero & Hebbeln, 2003). Dans la zone subantarctique de l'océan Atlantique, il est possible d'observer des abondances de ~7-8 % (Romero et al., 2005) (**Figure 3.6-A**).

*Azpeitia tabularis* : diatomée centrique, planctonique, hautement silicifiée, typique des conditions océaniques (Sims et al., 1989) avec un habitat planctonique–côtier. Elle est observée dans le SEP entre 50° et 59° S dans la zone océanique et côtière avec des abondances ~2 %. Dans la zone subantarctique de l'océan Atlantique, on observe des abondances d'environ 12 % (**Figure 3.6-B**). Dans le secteur atlantique de l'océan Austral, elle est distribuée entre 0 et 20° C, avec des abondances plus élevées entre 10 et 20° C (Zielinski & Gersonde, 1997).

*Fragilariopsis doliolus* : diatomée marine pennate, planctonique, majoritairement présente aux basses et moyennes latitudes dans un habitat planctonique–côtier (Zielinski & Gersonde, 1997; Romero et al., 2005; Esper et al., 2010). Dans le SEP cette espèce est distribuée au nord de 50° S avec des abondances de moins de 5 % (Abrantes et al., 2007) (**Figure 3.6-C**). Dans la zone subantarctique de l'océan Atlantique, des abondances allant jusqu'à 40 % sont observées (Zielinski & Gersonde, 1997). Dans le secteur atlantique de l'océan Austral, elle est distribuée entre 8 et 20° C (Zielinski & Gersonde, 1997).

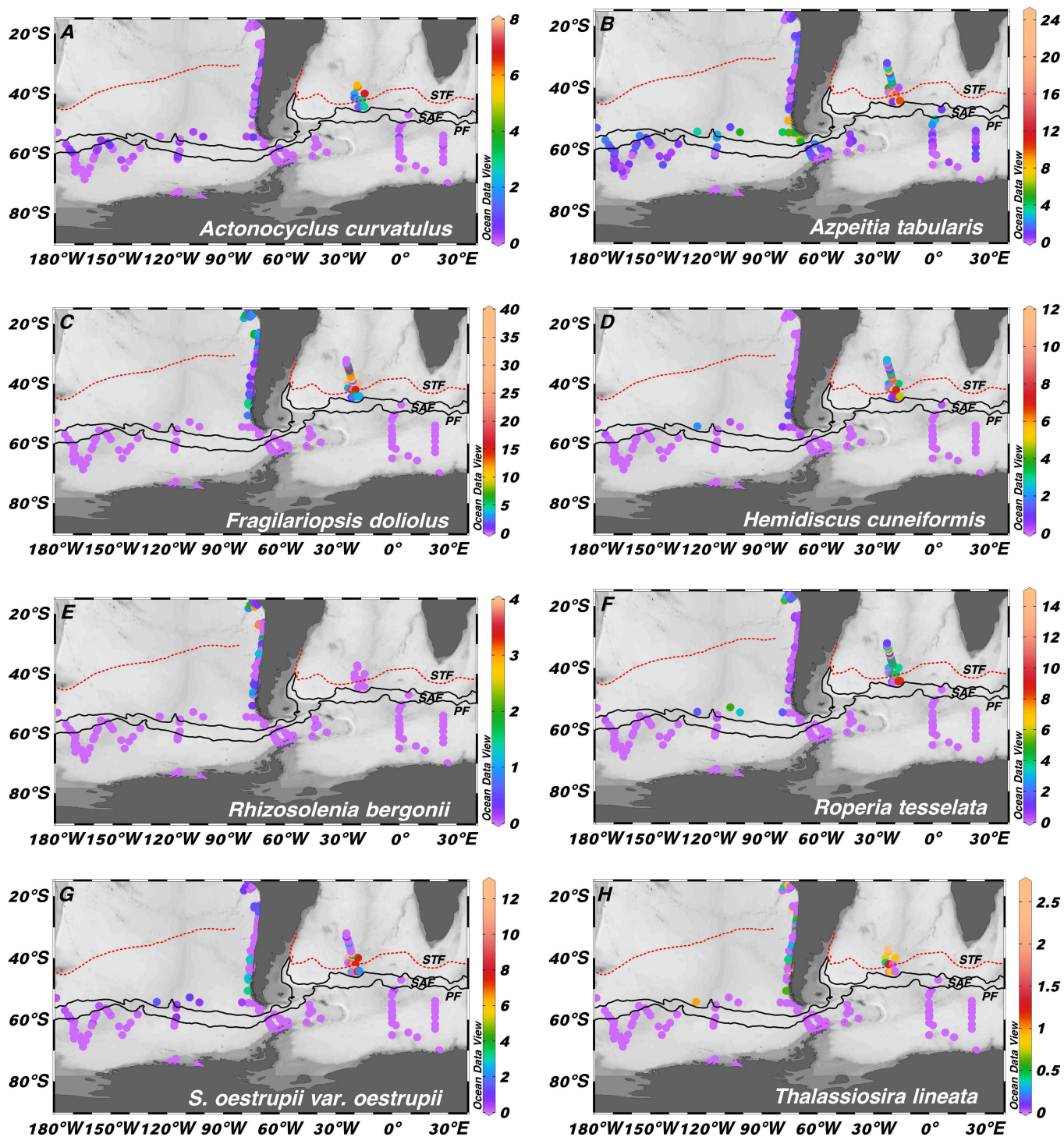
*Hemidiscus cuneiformis* : diatomée centrique, planctonique, marine, présente dans les eaux tempérées à chaudes en milieu planctonique–côtier (Romero et al., 2005). *Hemidiscus cuneiformis* est observé dans le SEP entre 42 et 55° S avec des abondances ~2 % (Romero & Hebbeln, 2003; Benz et al., 2016), même si les plus fortes abondances (jusqu'à 12%) sont retrouvées dans le secteur subantarctique de l'océan Atlantique (Romero et al., 2005) (**Figure 3.6-D**). Dans le secteur atlantique de l'océan Austral, elle est distribuée entre 7.5 et 20° C (Zielinski & Gersonde, 1997).

*Rhizosolenia bergonii* : diatomée marine centrique, planctonique, habitant préférentiellement les eaux tropicales en milieu planctonique–côtier (Gómez et al., 2007). Dans le SEP, cette espèce est observée entre 15° et 25° S avec des abondances ne dépassant pas ~ 4 % (Abrantes et al., 2007) (**Figure 3.6-E**). Dans le secteur atlantique de l'océan Austral, elle est présente entre 11 et 20° C (Zielinski & Gersonde, 1997).

*Roperia tessellata* : diatomée marine centrée, planctonique, des eaux tropicales à subtropicales (Zielinski & Gersonde, 1997), avec une teneur modérée à faible en nutriments (Romero et al., 2005). Sa distribution dans le SEP montre des abondances de ~4 % en océan ouvert à 58° S (Benz et al., 2016) et entre 15° et 20° S (Abrantes et al., 2007) (**Figure 3.6-F**). Dans le secteur atlantique de l'océan Austral, elle est distribuée entre 4° et 20° C (Zielinski & Gersonde, 1997).

*Shionodiscus oestrupii* var. *oestrupii* : diatomée centrique, planctonique, marine avec une distribution cosmopolite, prédominante dans les eaux tropicales à tempérées (Romero et al., 2005). Ils s'agit d'un taxon présentant un habitat planctonique-côtier avec une distribution dans la zone côtière du SEP entre 51° S et 40° S et des abondances d'~3 % (Romero & Hebbeln, 2003) (**Figure 3.6-G**). Dans le secteur atlantique et indien de l'océan Austral, elle se répartit entre 4.5 et 22° C.

*Thalassiosira lineata* : diatomée centrique, planctonique et marine, représentatif d'eaux plus chaudes et moins riches en nutriments dans le SEP et dans le secteur Atlantique (**Figure 3.6-H**).



**Figure 3.6** Distribution dans les secteurs Pacifique et Atlantique de l'océan Austral du groupe Subtropical : **A)** *Actonocyclus curvatulus*, **B)** *Azpeitia tabularis*, **C)** *Fragilariopsis doliolus*, **D)** *Hemidiscus cuneiformis*, **E)** *Rhizosolenia bergonii*, **F)** *Roperia tessellata*, **G)** *Shionodiscus oestrupii* var. *oestrupii* et **H)** *Thalassiosira lineata*. La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021.

### 3.3.5. Groupe Polaire

Dans ce groupe, j'ai inclus 14 espèces qui ont des pourcentages maximaux dans la zone antarctique, c'est-à-dire au sud du front polaire. Cependant ces espèces sont également abondantes dans la zone du front polaire, soit entre les fronts sub-antarctiques et polaires. Elles sont encore présentes dans le sud de la zone sub-antarctique, proche du front. Dans cette zone, un gradient nord-sud de nitrate et de phosphate est observé (**Figure 3.7**). Les espèces décrites sont *Eucampia antarctica*, *Fragilariopsis kerguelensis*, *Fragilariopsis rhombica*, *Thalassionema nitzschioides* var. *lanceolata*, *Shionodiscus gracilis*, *Thalassiosira lentiginosa* et *Thalassiosira oliverana*, *Shionodiscus trifultus*, et de *Shionodiscus trifultus* (ces espèces ont été identifiées dans les 3 carottes étudiées dans cette thèse).

***Eucampia antarctica*** : diatomée centrique, planctonique et marine que l'on trouve dans les sédiments de surface principalement sous forme de spore au repos et endémique de l'Océan Austral (Zielinski & Gersonde, 1997). Elle présente un habitat planctonique à planctonique-côtier avec une distribution dans le SEP observée dans les zones littorales de l'Antarctique (~75° S) et du sud de l'Amérique du Sud (entre ~55°-60° S) avec les abondances les plus élevées entre ~6-12 %. Dans le secteur Atlantique de l'Océan Sud entre 38° et 73° S, des abondances de moins de 4 % ont été observées (**Figure 3.7-A**). Dans le secteur atlantique de l'Océan Austral, *Eucampia antarctica* est distribuée entre -2 et 12° C (Zielinski & Gersonde, 1997).

***Fragilariopsis kerguelensis*** : diatomée pennate, planctonique, marine et endémique de l'Océan Austral et hautement silicifiée (Zielinski & Gersonde, 1997). Son habitat est planctonique (principalement océanique) avec une distribution dans les sédiments de surface du SEP dans la zone océanique entre 55° et 70° S avec des abondances entre 60 et 90 %. Elle est toujours présente à des pourcentages élevés, 40-50% dans la zone du front polaire (**Figure 3.7-B**). Dans le secteur atlantique de l'océan Austral, elle est distribuée entre -1 et 22° C (Crosta et al., 2005).

***Fragilariopsis rhombica*** : diatomée pennate, planctonique, marine et endémique de l'Océan Austral (Zielinski & Gersonde, 1997). La distribution de *Fragilariopsis rhombica* dans les sédiments de surface du SEP présente les plus grandes abondances (3-5 %) au sud du FP (Esper et al., 2010) (**Figure 3.7-C**). Dans le secteur atlantique de l'océan Austral, elle est distribuée entre -1.3 et 11.5° C (Armand et al., 2005).

***Thalassionema nitzschioides* var. *lanceolata*** : diatomée pennate, planctonique, marine. Habituellement décrite avec *Thalassionema nitzschioides* var. *capitulata* sous le nom de groupe

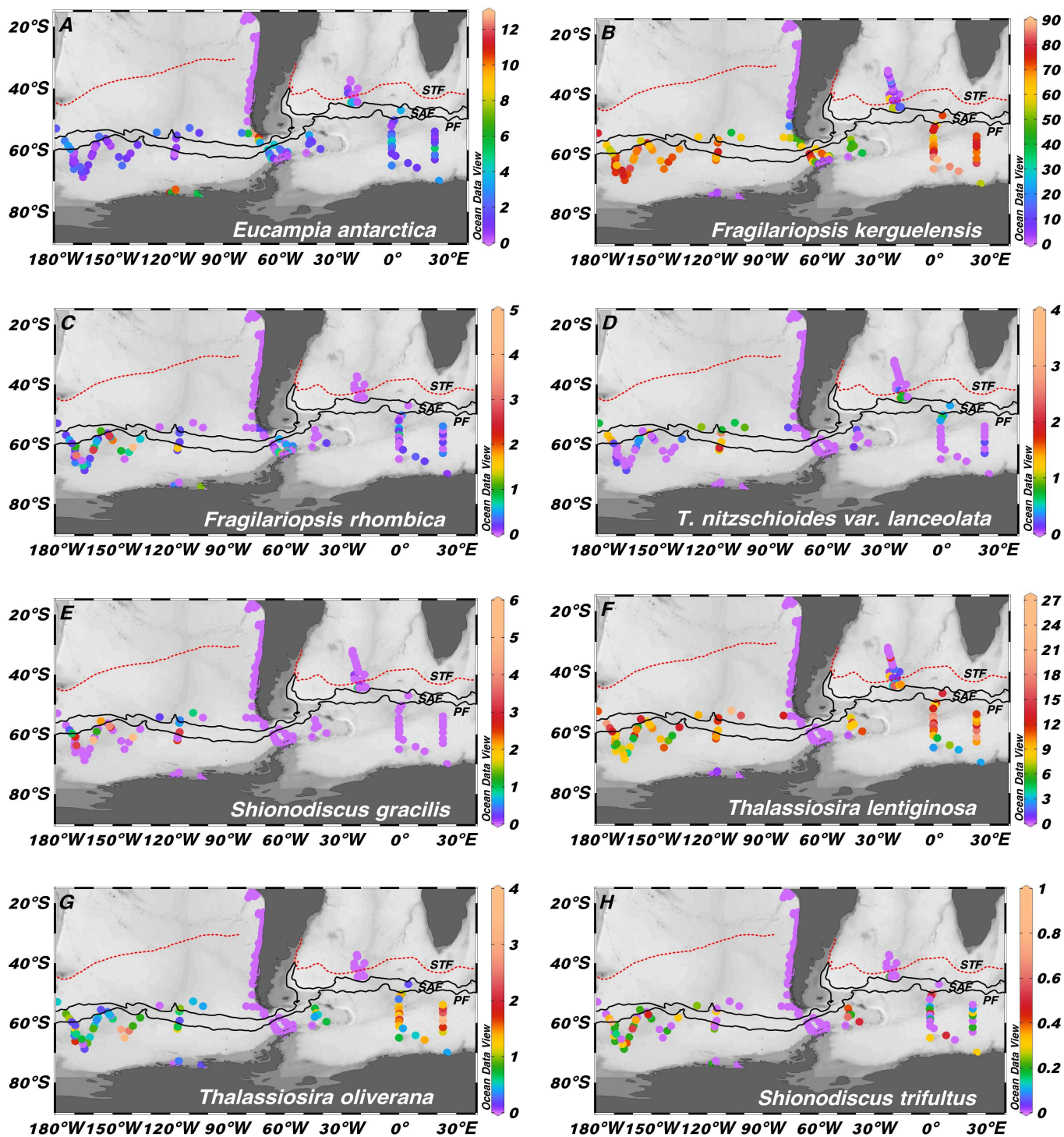
*Thalassionema nitzschioides* en raison de la difficile discrimination de ces deux espèces (Zielinski & Gersonde, 1997; Crosta et al., 2005). Les plus fortes abondances (3 %) sont observées dans les sédiments de surface de la zone océanique subantarctique (Esper et al., 2010) (**Figure 3.7-D**). Dans le secteur atlantique de l'océan Austral, elle est distribuée entre 2 et 19° C (Crosta et al., 2005).

*Shionodiscus gracilis* : diatomée centrique, planctonique, marine, endémique de l'Océan Austral (Zielinski & Gersonde, 1997). Sa distribution dans les sédiments de surface du SEP montre des abondances entre 4 et 6 % dans la zone océanique près du FP (Esper et al., 2010) (**Figure 3.7-E**). Dans le secteur atlantique et indien de l'océan Austral, elle est distribuée entre -1.3 et 18° C (Crosta et al., 2005).

*Thalassiosira lentiginosa* : diatomée centrique, planctonique et marine endémique de l'Océan Austral. Dans les sédiments de surface du SEP et du secteur Atlantique et Indien de l'Océan Austral *Thalassiosira lentiginosa* est observée dans la zone océanique située entre la zone subantarctique (Subantarctic Zone, SAZ) et au nord de la zone saisonnière de la glace de mer (Seasonal Sea Ice Zone, SSIZ) (Gersonde et al., 2005; Esper et al., 2010) (**Figure 3.7-F**). Dans le secteur atlantique et indien de l'océan Austral, elle est distribuée entre -0.5 et 18° C (Crosta et al., 2005).

*Thalassiosira oliverana* : diatomée centrique, planctonique, marine, fortement silicifiée et endémique de l'Océan du Sud (Zielinski & Gersonde, 1997). Cette espèce présente des abondances entre 1 et 3 % dans la SAZ et le PFZ (non associées à la glace de mer) des océans Pacifique et Atlantique (Esper et al., 2010) (**Figure 3.7-G**). Dans le secteur Atlantique et Indien de l'Océan Sud, elle est distribuée entre -1.3 et 18° C (Crosta et al., 2005).

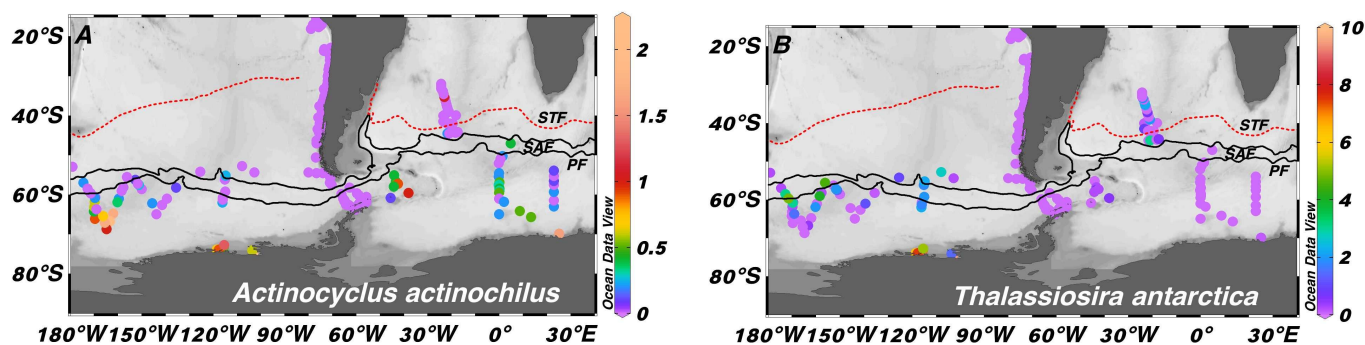
*Shionodiscus trifultus* : est une diatomée centrique, planctonique et marine. Dans les sédiments de surface, des abondances de moins de 1% sont observées dans le secteur Atlantique de l'océan Austral entre le SAZ et le sud du PF, non associé à la glace de mer (Esper et al., 2010) (**Figure 3.7-H**).



**Figure 3.7** Distribution dans les secteurs Pacifique et Atlantique de l'océan Austral du groupe Polaire : **A)** *Eucampia antarctica*, **B)** *Fragilariopsis kerguelensis*, **C)** *Fragilariopsis rhombica*, **D)** *T. nitzschioides* var. *lanceolata*, **E)** *Shionodiscus gracilis*, **F)** *Thalassiosira lentiginosa*, **G)** *Thalassiosira oliverana* et **H)** *Shionodiscus trifultus*. La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) (Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021.

### 3.3.6. Groupe Antarctique

Dans ce groupe, j'ai inclus les 4 espèces qui sont les plus abondantes près de la glace sur la péninsule Antarctique. Ici, nous observons une température plus basse (en dessous du point de congélation) et une plus grande disponibilité de la silice, du nitrate et du phosphate (**Figure 3.8**). Les espèces décrites sont : *Actinocyclus actinochilus* et *Thalassiosira antarctica* (ces espèces ont été identifiées dans la carotte MD07-3081).



**Figure 3.8** Distribution dans le secteurs Pacifique et Atlantique de l'océan Austral du groupe Antarctique **A**) *Actinocyclus actinochilus* y **B**) *Thalassiosira antarctica*. La position des fronts est également indiquée : STF (front subtropical) (Orsi et al., 1995), SAF (front subantarctique) et PF (front polaire) Park et al., 2019). Cette figure a été réalisée avec le logiciel Ocean Data View Schlitzer, 2021).

*Actinocyclus actinochilus* : est une diatomée centrique, planctonique, marine, endémique de l'Océan Austral, associée aux eaux couvertes par la glace de mer (Zielinski & Gersonde, 1997; Armand et al., 2005). La distribution de cette espèce dans les sédiments de surface du SEP est limitée au nord par le PF et au sud par la limite maximale de la glace de mer saisonnière d'hiver entre -1.5 y 0° C (Esper et al., 2010) (**Figure 3.8-A**). Dans le secteur Atlantique et Indien de l'Océan Sud, elle est distribuée entre -1.3 et 9° C (Armand et al., 2005).

*Thalassiosira antarctica* : est une diatomée centrique, planctonique et marine, présent dans les régions froides de l'océan Austral (Tomas, 1998). Dans les sédiments de surface du secteur SEP de L'Océan Austral, *Thalassiosira antarctica* est distribué entre le SAF et la zone antarctique associée à la glace de mer (Esper et al., 2010) (**Figure 3.8-B**). Dans le secteur atlantique et indien de l'océan Austral, elle est distribuée entre -1.3 et 3.5° C (Armand et al., 2005). Zielinski & Gersonde, (1997) ont rapporté une température de -2 à 9.5° C pour les sédiments de surface dans l'océan Atlantique Sud, avec des abondances plus élevées dans les zones côtières de la mer de Weddel à des températures entre -2 et 1° C.

Ci-dessous le tableau récapitulatif présente les espèces principales que j'ai déterminé dans les trois carottes marines étudiées dans cette thèse, regroupées dans les différents groupes que j'ai établi dans ce chapitre.

Espèces	Groupe écologique	Caractéristiques
<i>Chaetoceros</i> spp. resting spores <i>Skeletonema costatum</i> <i>T. nitzschioides</i> var. <i>nitzschioides</i>	Nutriments abondants Nutriments abondants Nutriments abondants	Dans le SEP, groupe associé à la présence de nutriments abondants provenant de l'upwelling côtier.
<i>Coscinodiscus radiatus</i> <i>S. oestrupii</i> var. <i>venrickae</i> <i>Thalassiosira anguste-lineata</i> <i>Thalassiosira eccentrica</i> <i>Thalassiosira pacifica</i>	Planctonique-côtier Planctonique-côtier Planctonique-côtier Planctonique-côtier Planctonique-côtier	Groupe associé à la zone néritique côtière.
<i>Cocconeis</i> spp. group <i>Paralia sulcata</i>	Benthique-côtier Benthique-côtier	Espèces associées au benthos, transportées du continent vers la zone marine.
<i>Actinocyclus curvatus</i> <i>Azpeitia tabularis</i> <i>Fragilariopsis doliolus</i> <i>Hemidiscus cuneiformis</i> <i>Rhizosolenia bergonii</i> <i>Roperia tessellata</i> <i>Shionodiscus oestrupii</i> <i>Thalassiosira lineata</i>	Subtropical Subtropical Subtropical Subtropical Subtropical Subtropical Subtropical Subtropical	Un groupe d'espèces associées à des eaux plus chaudes d'origine subtropicale avec moins de disponibilité de nutriments.
<i>Eucampia antarctica</i> <i>Fragilariopsis kerguelensis</i> (* <i>Fragilariopsis rhombica</i> ) <i>Shionodiscus gracilis</i> <i>T. nitzschioides</i> var. <i>lanceolata</i> (* <i>Thalassiosira lentiginosa</i> ) (* <i>Thalassiosira oliverana</i> )	Polaire Polaire Polaire Polaire Polaire Polaire Polaire	Groupe d'espèces d'eau froide océanique, non associées à la glace de mer.
(* <i>Actinocyclus actinochilus</i> ) <i>Thalassiosira antarctica</i>	Antarctique Antarctique	Groupe d'espèces d'eau froide, associées à la glace de mer.

(\* ) Espèces trouvées en abondance inférieures à 1 % dans la carotte MD07-3081 (49°S).

**En Annexe 2 le tableau présente la totalité des espèces rencontrées dans les trois carottes marines (abondance supérieure à 2 %).**



En conclusion, la compilation de ces bases de données m'a permis de regrouper les principales espèces de diatomées en fonction de leurs préférences environnementales. Je vais utiliser cette classification pour présenter, dans le chapitre suivant, une étude portant sur la reconstruction paléocéanographique basée sur les assemblages de diatomées dans le Sud-Est Pacifique depuis la fin de la période glaciaire sous forme d'article scientifique.





## **Chapitre 4: L'enregistrement des 20 derniers ka dans la carotte MD07-3081**

Ce chapitre est consacré à l'étude de la carotte située la plus au sud (49° S), en contexte d'océan ouvert, à 100 km de la côte. Cette carotte présente une population relativement importante de diatomées, sur les derniers 20 ka. L'étude conjointe des foraminifères et des diatomées nous a permis de présenter des hypothèses quant aux principaux facteurs environnementaux responsables des assemblages de diatomées. Cela nous permet également d'apporter des informations complémentaires quant à l'hydrologie de la zone au cours des derniers 20 ans.

Ces résultats font l'objet d'un article rédigé en anglais et qui sera soumis à *Marine Micropaleontology*.

# Paleoceanographic reconstruction based on diatom and foraminiferal assemblages in the South East Pacific since the Late Glacial

Elisabeth Teca Oliva<sup>a,b</sup>, Elisabeth Michel<sup>b</sup>, Giuseppe Siani<sup>a</sup>, Xavier Crosta<sup>c</sup>, Carina Lange<sup>d,f,g</sup>,  
Consuelo Martinez Fontaine<sup>h</sup>, Paola Cárdenas<sup>f</sup>

<sup>a</sup>Geoscience Paris Saclay (GEOPS) Université Paris-Saclay, CNRS UMR 8148, 91405 Orsay, France;

<sup>b</sup>Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Laboratoire mixte CNRS-CEA-UVSQ, Bât 714, L'orme des Merisiers, 91190 Gif-sur-Yvette Cedex, France; <sup>c</sup>UMR-CNRS 5805 EPOC, Avenue des Facultés,

F-33405 Talence, France; <sup>d</sup>Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Chile; Centro Oceanográfico COPAS Sur-Austral/COPAS-Coastal, Universidad de Concepción, Chile; <sup>e</sup>Centro de Investigación

Dinámica de Ecosistemas Marinos de Altas Latitudes (IDEAL), Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile;

<sup>g</sup>Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA 92037, USA; <sup>h</sup>Universidad de Magallanes, Chile.

## Abstract

Key words

## I. Introduction

The Southeast Pacific (SEP) represents a transition area between the subtropical waters of the Pacific Ocean and the Southern Ocean. This area is of great interest for present and past climate studies due, among other factors, to the presence of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) and the Southern Westerlies Wind (SWW) that influence ocean circulation and regional and global climate (Mayr et al., 2007).

The SWW blow between 30° and 60° S from west to east and partly drive the Antarctic Circumpolar Current (ACC), which is the only global current that connects the Atlantic, Indian and Pacific oceans allowing the exchange of heat, salinity, nutrients and CO<sub>2</sub> between these basins (Orsi et al., 1995; Toggweiler et al., 2006). The ACC is characterized by surface water masses that present marked thermohaline gradients called oceanic fronts: Subantarctic Front (SAF), Polar Front (PF) and the Southern Front of the ACC (SACCF) (Orsi et al., 1995; Kim and Orsi., 2014; Park et al., 2019), whose position allows delimiting different oceanographic zones in the SEP. From north to south, the Subantarctic Zone is located between the Subtropical

Front (STF) ( $\sim 30^\circ$  S) and the SAF ( $53^\circ$  S), then the Polar Front Zone located between the SAF and the PF ( $\sim 55^\circ$  S) and finally the Antarctic Zone associated with sea ice around Antarctica (Park et al., 2019).

The past and present variability of the SWW, the ACC and their associated fronts in the SEP has been the subject of numerous studies during the last 20 ka (Lamy et al., 2010; Verleye et al., 2010; Caniupán et al., 2011; Kohfeld et al., 2013; Lamy et al., 2015; Haddam et al., 2018) with the main interest being to know the processes involved in the end of the last glacial period and their implication at the global level. This variations in SWW across the Last Glaciation would be linked to: 1) changes in the thermohaline circulation between the Northern and Southern hemispheres in response to the bipolar seesaw (Broecker, 1998); Blunier & Brook, 2001; Lamy et al., 2004, Barker et al., 2009); 2) changes in the atmospheric component that controls the latitudinal movements of the Atlantic intertropical convergence zone and the Pacific Split Jet (Chiang et al., 2014, Haddam et al., 2018; Buizert et al., 2018) and 3) changes in the flow of the ACC through the Drake Passage (PD) (Lamy et al., 2015). During glacial periods, a strong weakening of the ACC entering through the PD is observed, implying increased transport of surface and intermediate waters from the ACC into the Pacific Gyre and reduced transport between the Pacific and Atlantic oceans, affecting the Atlantic Meridional Overturning Circulation (Lamy et al., 2015). However, care must be taken when interpreting variations in SWW intensity and position during the LGM, as multiple factors may be involved in these changes i.e., changes in land moisture, dust deposition, sea surface temperatures and ocean fronts, and ocean productivity (Kohfeld et al., 2013).

Past oceanographic reconstructions in the using different organisms show discrepancies in the latitudinal movement of oceanographic fronts associated with the ACC. Verleye & Louwye (2010) used dinoflagellate cysts from ODP site 1233 at  $41^\circ$  S and proposed a 7-10° equatorward movement of circumpolar fronts during the last glacial between 25 and 21 ka of its present position. They also suggested a southward shift to  $41^\circ$  S of the STF between 14.4 and 9.6 ka and a further southern position of the SAF and PF between 11.6 and 9.8 ka at the time of the Holocene Maximum. Considering the Sea Surface Temperatures (SST) from alkenone reconstructions for the last 60 ka, from a core located at  $53^\circ$  S at the entrance of the Strait of Magellan, Caniupán et al. (2011) considered a northward latitudinal shift of the subantarctic and polar fronts during the glacial. In contrast, Haddam et al., (2018) using planktonic foraminifers for SSST reconstructions across a  $41^\circ$  S to  $49^\circ$  S latitudinal transect, did not record

a northward SAF shift to 49° S during the glacial events and the southward displacements of the STF did not exceed 41° S. These authors indicated that freshwater inputs at 41° and 46°S from the melting of the PIS during the late glacial and early Holocene must be considered when reconstructing the SSTs.

Considering the apparent discrepancies in the position and displacement of the fronts associated with the ACC, here we present a paleoceanographic reconstruction based on diatom and foraminiferal assemblages at 49° S from the last glacial period to the present. Our main objectives were to determine whether there was a northward/southward migration of the SAF and PF during the Last Glacial to the present and to determine the main implications for regional and global ocean circulation in the SEP.

The advantage of studying diatoms and planktonic foraminifera is that they provide, in conjunction with other biological tracers, pivotal information on environmental parameters. On the one hand, the description of diatom assemblages provides qualitative information on the prevailing oceanographic conditions (e.g: temperature, salinity and nutrients) in the SEP since the Last Glacial period (Zielinski & Gersonde, 1997; Crosta et al., 2005; Romero et al., 2005; Abrantes et al., 2007; Esper & Gersonde, 2014; Benz et al., 2016; Cárdenas et al., 2019). On the other hand, foraminifera because the calcitic composition of their testes is influenced by the temperature, salinity and ice volume in which they lived (Haddam et al., 2016; Reyes-Macaya et al., 2023). For this reason, diatom and foram are an excellent biological proxy whose study in the SEP will complement the work already done on the position of oceanic fronts over the last 23 ka.

## II. Study area

The modern oceanic and coastal circulation in the SEP adjacent to Peru and Chile is dominated on the surface by waters of the ACC. The ACC transports Subantarctic Water (SAAW) from the surface waters of the Antarctic divergence zone (Silva et al., 2009). Approximately between 40° S and 50° S the ACC collides with the South American continent and splits into two branches: the Peru Chile Current (PCC) or Humboldt Current that flows equatorward, and the Cape Horn Current that flows southward through the Drake Passage (Strub et al., 2019) (See **Figure 4.1**).

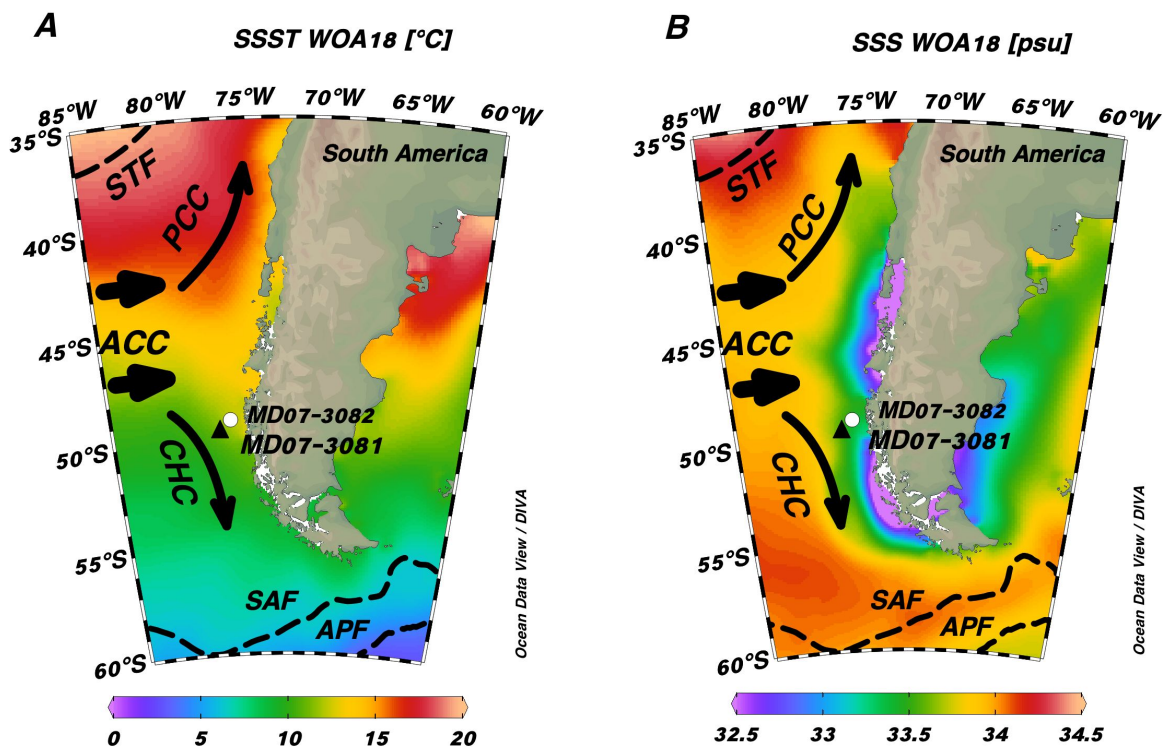
The SAAWs ocean ( $T=11.63 \pm 1.08^\circ \text{C}$ ;  $S= 34.28 \pm 0.19 \text{ psu}$ ;  $\text{Phosphate}= 1 \pm 0.39 \mu\text{mol Kg}^{-1}$ ) located between 0 and 200m depth, are transported northward by the PCC up to  $\sim 32^\circ \text{S}$  and in their trajectory they mix with a part of the warmer Subtropical Water (STW) ( $T=17.47 \pm 1.08^\circ \text{C}$ ;  $S= 35.11 \pm 0.19$ ;  $\text{Phosphate}= 0.64 \pm 0.54 \mu\text{mol Kg}^{-1}$ ) up to  $24^\circ \text{S}$ . The STW is advected southward by the Peru Chile Countercurrent (PCCC) (Silva et al., 2009; Reyes-Macaya et al., 2022). Between 200 and 600m below the SAAW and STF is located the Equatorial Subsurface Water (ESSW) that presents high temperature, salinity and nutrients but low oxygen content. The ESSW is transported southward along the South American coast by the Peru Chile Undercurrent (PCUC) up to  $\sim 42^\circ \text{S}$  (Silva et al., 2009). Between 500 and 1000m deeper, the Antarctic Intermediate Water (AAIW) is located, which has low temperature, low salinity, low nutrients and high oxygen content. The AAIW flows from the subantarctic zone of Patagonia towards the equator influencing the ventilation of the Pacific basin waters (Martinez Fontaine et al., 2019; Reyes-Macaya et al. 2022). At depths greater than 1500m it is possible to observe the Pacific Deep Water, which constitutes the most abundant and oldest water in the world ocean (Reyes-Macaya et al. 2022).

The ACC is largely driven by SWW whose core is currently located between  $50^\circ$  and  $55^\circ \text{S}$ . SWW vary seasonally in position and intensity due among other factors (e.g. the polar vortex and the Intertropical Convergence Zone) to changes in sea surface temperature and regulate the precipitation regime in central and southern Chile as they collide with the Andes Mountains (Lamy et al., 2010; Bertrand et al., 2014). During the austral winter (June, July and August) the SWW migrate latitudinally northward, bringing precipitation between  $33^\circ$  and  $40^\circ \text{S}$  and decreasing its intensity between  $50^\circ$  and  $55^\circ \text{S}$ . Conversely, during the austral summer (December, January and February), the SWW core intensifies and is centered in southern Chile ( $50^\circ$ - $55^\circ \text{S}$ ) (Lamy et al., 2010; Garreaud et al., 2013; Bertrand et al., 2014).

Between  $41.5^\circ \text{S}$  and  $56^\circ \text{S}$ , the Chilean landscape is composed of numerous islands, fjords and channels characteristic of the Chilean Patagonia. Three main ice fields are found in the region: the Northern Patagonian Icefield (NPI,  $46^\circ \text{S}$ ), the Southern Patagonian Icefield (SPI,  $48^\circ \text{S}$ ) and the Cordillera Darwin Icefield (CDI) ( $54^\circ$ - $55^\circ \text{S}$ ). These icefields are a remnant of the Patagonian Icesheet (PIS) that covered a wide area of Chilean Patagonia between  $40^\circ$  and  $55^\circ \text{S}$  during the late glacial period (Davies et al., 2020; Hulton et al., 2002). The heavy precipitation between  $42^\circ$  and  $50^\circ \text{S}$  ( $4000 \text{ mm yr}^{-1}$  to  $7000 \text{ mm yr}^{-1}$ ; Garreaud et al., 2013) together with the high river discharge and meltwater from glaciers, decrease salinity in the



oceanic zone adjacent to the continent with low salinity area centered at ~45 and 53° S, 75 km offshore (Dávila et al., 2002) (See ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.-B).



**Figure 4.1** A) Summer Sea Surface Temperatures (SSST) from WOA 2018 (Locarnini et al., 2019) in the SEP and the location of core MD07-3081 (black triangle) used in this study and Core MD07-3082 (circle) published in Haddam et al., (2018). Main currents in the SEP are represented by black arrows: ACC (Antarctic Circumpolar Current), PCC (Peru-Chile Current) and CHC (Cape Horn Current). The position of the fronts is also shown: STF (Subtropical Front), SAF (Subantarctic Front) and PF (Polar Front) (Orsi et al., 1995). B) Summer Salinity Surface (SSS) in the study area from WOA 2018 (Sweng et al., 2019). This figure was made using Ocean data view (Schlitzer, 2021) with DIVA gridding.

### III. Material and methods

The core MD07-3081 (49°25.76' S 76°58.17' W 1620 m long, 3273 water depth, at 100 km from the coast, was collected with a CALYPSO piston corer during the oceanographic expedition MD159 PACHIDERME on the R/V Marion Dufresne (Kissel, 2007) (Fig.1). The core is composed of homogeneous gray to olive silty clay interbedded by episodic sandy layers. A sandy layer is observed along the core between 180 cm and 210 cm, probably corresponding to a turbidite, so this level was not considered in the analysis of diatoms and foraminifera.

#### III.1. Radiocarbon dating

Radiocarbon ( $^{14}\text{C}$ ) dates were obtained for twenty depths of core MD07-3081, between 50 and 1230 cm. Depending on foraminifera availability, either monospecific planktonic foraminifera

*Globigerina bulloides* or mixed planktonic foraminifera (*G. bulloides*, *Globorotalia inflata*, *Globigerinita glutinata*, *Neogloboquadrina incompta*, *Neogloboquadrina pachyderma* (left coiling) and *Tuborotaliaa quinqueloba*) were picked from the fraction >150  $\mu\text{m}$  for radiocarbon dating. All samples were analyzed at the AMS facility UMS-ARTEMIS (Pelletron 3 MV), CNRS-CEA Saclay, France (procedures described in Dumoulin et al., 2017). The  $^{14}\text{C}$  activity was corrected by normalizing by a  $\delta^{13}\text{C}$  of  $-25.0$  ‰ relative to the Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB) to correct for isotopic fractionation, and by subtracting the background age. Ages are presented in conventional  $^{14}\text{C}$  years Before Present (BP, **Table 4.1**), following the convention by Stuiver & Polach, (1977).

**Table 4.1** Planktonic foraminifera radiocarbon ages from core MD07-3081 and the respective marine surface reservoir age correction (Rs) applied for their calibration previous to the age modelling.

Depth MD07- 3081 (cm)	Laboratory code	Species	<sup>14</sup> C age (years BP)	1σ (years)	Calendar Age mean (cal years BP)
50	SacA 62139	Mixed planktonic foraminifera	2700	30	2241
100	SacA 61334	<i>G. bulloides</i>	4620	30	4607
250	SacA 62141	Mixed planktonic foraminifera	8860	35	9275
280	SacA 61335	Mixed planktonic foraminifera	9180	40	9817
340	SacA 61336	Mixed planktonic foraminifera	10200	40	11130
390	SacA 62143	<i>G. bulloides</i>	10465	35	11833
430	SacA 62145	<i>G. bulloides</i>	11305	40	12806
470	SacA 61337	Mixed planktonic foraminifera	12215	40	13630
520	SacA 62146	<i>G. bulloides</i>	13070	60	14509
610	SacA 62148	Mixed planktonic foraminifera	13500	50	15383
630	SacA 62150	Mixed planktonic foraminifera	14080	50	15927
670	SacA 62151	Mixed planktonic foraminifera	14730	50	16595
680	SacA 62152	Mixed planktonic foraminifera	14550	70	16755
700	SacA 61338	Mixed planktonic foraminifera	14850	60	17071
770	SacA 62154	Mixed planktonic foraminifera	15000	60	17288
801	SacA 62155	Mixed planktonic foraminifera	15270	60	18139
930	SacA 62156	Mixed planktonic foraminifera	16900	70	19153
1050	SacA 62157	Mixed planktonic foraminifera	16730	130	19737
1160	SacA 62158	Mixed planktonic foraminifera	17130	100	20153
1230	SacA 62159	Mixed planktonic foraminifera	17390	100	20527

### III.2. Oxygen stable isotope analyses ( $\delta^{18}\text{O}$ )

Isotopic measurements of  $\delta^{18}\text{O}$  were obtained from the planktonic foraminifera *G. bulloides* (fraction 250-315  $\mu\text{m}$ ) on 108 samples with a depth resolution every  $\sim 10$  cm. Between 5 and 30 shells of *G. bulloides* were used for the measurements, cleaned with methanol in an ultrasonic bath and then measured using a GV Isoprime mass spectrometer at LSCE, Gif Sur Yvette, France. The measurements are reported versus the Vienna Pee Dee Belemnite standard (VPDB) with respect to NBS-19 standard, with a mean external reproducibility ( $1\sigma$ ) for carbonate standards of  $\pm 0.06$  ‰ for  $\delta^{18}\text{O}$ . The reproducibility of  $\delta^{18}\text{O}$  isotopic measurements on *G. bulloides* in this core is 0.11 ‰.

### III.3. Planktonic Foraminifera analyses

Quantitative analyses on planktic foraminifera were performed on 38 samples along the core MD07-3081, spaced every ~20 cm. Each sample was wet sieved and the foraminiferal content of the fraction >150  $\mu\text{m}$  was counted and divided by a microsplitter into aliquots each containing at least 300 specimens of planktonic foraminifera. All the species counted in the sub-samples were then identified following the taxonomic concepts and the ecological inferences of Schiebel and Hembleben (2017). On the basis of this classification, more than 94% of our planktonic foraminifera fauna is dominated by the following species: *Globigerina bulloides*, *Neogloboquadrina pachyderma* (left coiling), *Neogloboquadrina incompta*, *Globorotalia inflata* and *Globigerinita glutinata*. To interpret the abundances obtained with more precision, we calculated the associated error of each abundance (Patterson & Fishbein, 1989 and references herein). When quantitatively analyzing a sample, the main objective is to obtain estimates of fractional abundance:  $X_i = n_i/N$  where  $X_i$  is the fractional abundance of specie  $i$ ,  $n_i$  is the number of specimen for species  $i$  and  $N$  is the total number of specimen. After counting  $N$  specimens, the standard error  $S_{X_i}$  for  $X_i$  is normally distributed, independant of the number of species and equal to:

$$S_{X_i} = [X_i (1 - X_i)/N]^{1/2}$$

Therefore, after  $N$  counts, the estimate  $f_i$  of  $X_i$  is independant of the number of species and is calculated, within 95% confidence with the following equation (Patterson & Fishbein, 1989 and references herein):

$$X_i - 1.96 S_{X_i} \leq f_i \leq X_i + 1.96 S_{X_i}$$

### III.4. SST by Modern Analogue Technique (MAT)

The Modern Analog Technique (MAT; Prell, 1985) was used to reconstruct the summer sea surface temperature (SSST) (December-January-February) using the PaleoAnalog program (Therón et al., 2004) and the modern core-top data base for the Southern Ocean (Haddam et al., 2016), based on modern temperatures from World Ocean Atlas (WOA 1998) at the depth of 0 m. We used the relative abundances of foraminifera in samples where census counts were greater than 300 individuals and presence of fragments was less than 20% to ensure good preservation and quantitative estimates (Haddam et al., 2018). For each fossil sample, between

4 and 15 analogs were selected using the squared chord distance test (Prell, 1985). This selection was performed by retaining the best analogs before the dissimilarity coefficient increases abruptly, with a minimum of 4 analogs retained. Finally, the reconstructed SSST is calculated by averaging the temperature values of the selected analogs. The associated error represents the mean standard deviation of the temperature values of the selected analogs.

### III.5. Diatom analysis

Fifty-one samples, spaced every ~20 cm, were investigated for their diatom content. Sediment processing and slide preparation are detailed in Crosta et al., (2020). Three permanent slides were prepared for each sample and mounted with Naphrax medium. Diatom count was performed at 1000X using a LEICA 750P light microscope following the methodology described by Schrader and Gersonde (1978). Diatoms were identified at the lowest taxonomic level possible according to Johansen et al., 1985; Hasle and Syvertsen, 1996; Tomas 1998; Wilks and Armand, 2017, and references herein. Due to overall low abundance of diatoms, the 3 slides were counted to reach a minimum of 300 valves in each fossil sample.

Total absolute diatom abundance (ADA) was determined using the following equation:

$$ADA = \left( \frac{N_d}{N_f} \right) \times \left( \frac{S_p}{S_f} \right) \times \left( \frac{V_t}{V_s} \right) \times \left( \frac{1}{W} \right)$$

Where:  $N_d$  is the number of diatoms (valves),  $N_f$  is the number of fields of view,  $S_p$  is the area of the petri dish ( $\text{cm}^2$ ),  $S_f$  is the area of the microscope field of view ( $\text{cm}^2$ ),  $V_t$  is the total volume dissolution (ml),  $V_s$  is the volume used for each sample (ml) and  $W$  is the dry weight of the sample (g).

We calculated the error associated with abundances (Patterson & Fishbein, 1989) using the methodology described for the foraminifera.

*Chaetoceros* spp. resting spores (CRS) were not identified to species level. Due to their similar ecology, we grouped the species: *Thalassionema nitzschioides* var. *capitulata* and *Thalassionema nitzschioides* var. *lanceolata* in a group named *Thalassionema nitzschioides* group according to Esper et al., (2010) and Cárdenas et al., (2019); the species of *Shionodiscus trifultus* and *Shionodiscus frenguelli* were grouped under the name of *Shionodiscus* group because these species look very similar under light microscope and present a similar ecology

(Wilks & Armand, 2017) and *Azpeitia tabularis* var *tabularis* and *Azpeitia tabularis* var. *egrerius* are grouped under the name *Azpeitia tabularis* group. Finally, *Shionodiscus oestrupii* var. *oestrupii* is referred hereafter as *Shionodiscus oestrupii*.

### III.6. Statistical analysis

To identify groups of species with similar variations down-core MD07-3081, a principal component analysis (PCA) was performed using the program PASTv4.10 (Hammer, 2020). The selection of the species is based on the following lines: (1) present in the samples in which more than 150 valves were counted, (2) account for more than 2 % in at least one sample, (3) was observed in more than three down-core samples. We selected 150 diatom valves because of the low diatom counts per level (less than 300). However, to interpret our data we calculated the error associated with each percentage (Patterson & Fischbein., 1989). To reduce the impact of the most abundant species, the data were normalized to  $\text{Log}(x+1)$  where  $x$  is the relative abundance. Factors whose factor loadings were greater than or equal to  $|0.2|$  were interpreted.

## IV. Results

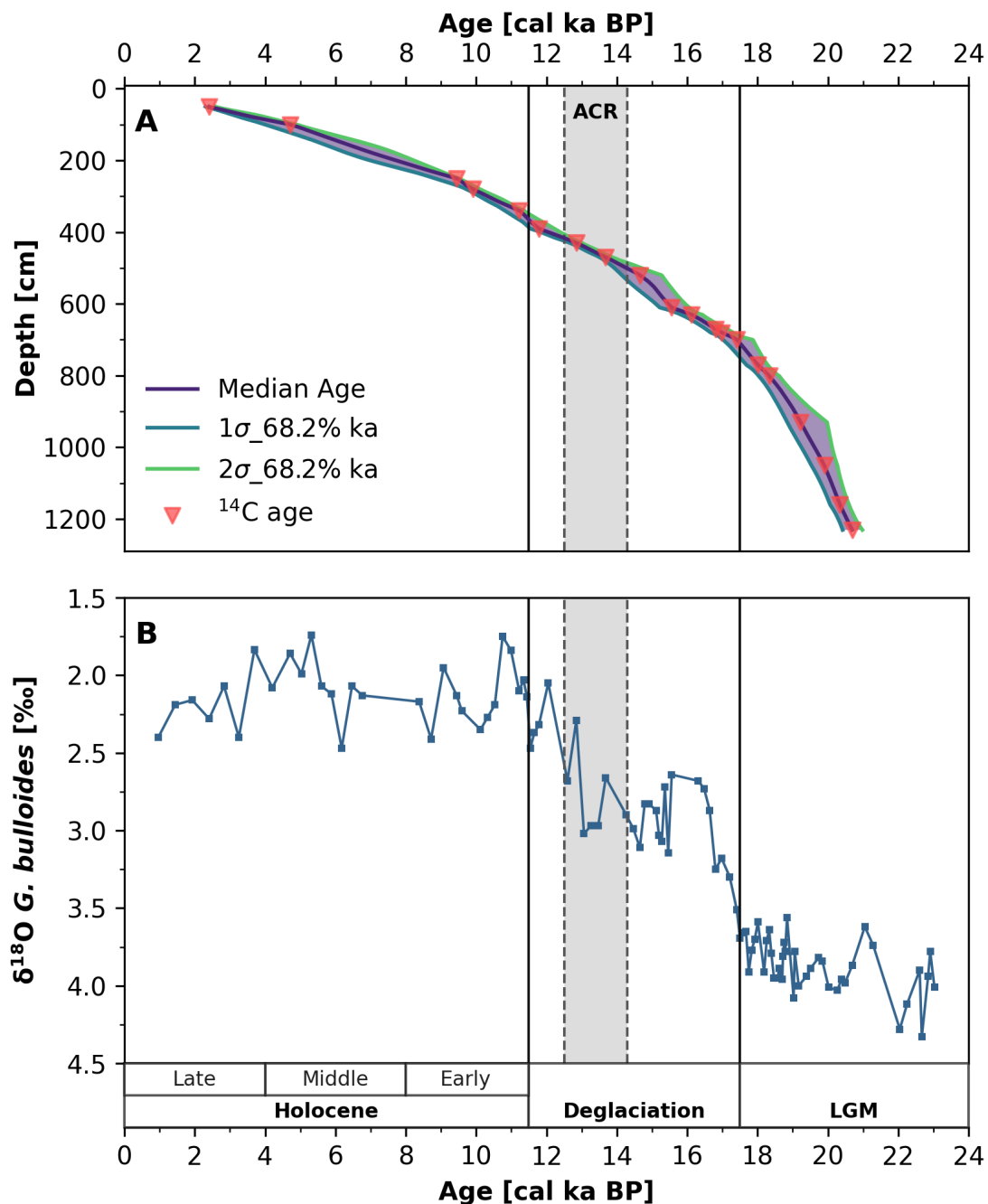
### IV.1. Age Model

The age model of core MD07-3081 was derived from 20 AMS  $^{14}\text{C}$  dates performed on the planktonic foraminifera shells of *G. bulloides* (4) and *mixed planktonic foraminifera* (16) in the size fraction  $>150\ \mu\text{m}$ . In Martinez Fontaine (2021), the conventional radiocarbon ages have been corrected using a variable reservoir  $^{14}\text{C}$  age ( $R_{\text{surf}}$ ), calibrated with the SHCal20 curve (Hogg et al., 2020) and modeled using a deterministic approach by the Undatable software (Lougheed and Obrochta, 2019). The results of the age model are described in **Table 4.1** whereas the median, mean,  $1\sigma$  and  $2\sigma$  envelopes are reported in **Figure 4.2-A** and, on the text, the calendar ages correspond to the median values. According to the age model, the core covers the last  $\sim 23000$  years (23 ka) in 1600 cm and the estimated sedimentation rate was higher during the late glacial ( $\sim 160\ \text{cm/ka}$ ) than the deglaciation and the Holocene respectively ( $\sim 65\ \text{cm/ka}$ ).

### IV.2. *G. bulloides* $\delta^{18}\text{O}$

The oxygen isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ) measurements performed on the planktic foraminifera *G. bulloides* display a  $\delta^{18}\text{O}$  stratigraphic record in agreement with the inferred age model (see **Figure 4.2-**

**B).** The  $\delta^{18}\text{O}$  record shows a late glacial to Holocene  $\delta^{18}\text{O}$  difference of  $\sim 2.5\text{‰}$  with the highest values observed during the late glacial with a maximum (up to  $\sim 4.3\text{‰}$ ) at 22.7 ka. A progressive  $\delta^{18}\text{O}$  stepwise decrease of  $\sim 2\text{‰}$  covers the interval between 17.8 and 12 ka during the last deglaciation before attaining lower  $\delta^{18}\text{O}$  *G. bulloides* values (1.7 to 2.5 ‰) during the Early and Mid-Holocene. An increase in  $\delta^{18}\text{O}$  *G. bulloides* values is subsequently observable during the Late Holocene.



**Figure 4.2** A) Age-depth relationship for core MD07-3081. The  $^{14}\text{C}$  ages are shown in calendar ka BP and were calibrated with the SHcal20 curve (Hogg et al., 2020). The inverted red triangles indicate the position where the

<sup>14</sup>C ages were obtained. **B**) Oxygen isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ) variations of the planktonic foraminiferal *G. bulloides* (250-315 $\mu\text{m}$ ) as a function of depth. Results were normalized relative to the PDB (Pee DeeBelemnite) standard (‰).

### IV.3. Foraminiferal assemblages and paleotemperatures

Relative abundances of planktic foraminifera are presented with their respective standard errors in Supplementary material **Table S1**.

Total planktonic foraminifer abundances ( $\text{ind./g}^{-1}$ ) and relative abundances of foraminifer species are presented in Supplementary material **Table S1**. Twenty-six samples with more than 300 planktonic foraminiferal shells were used for summer SST reconstruction, were used to reconstruct the last 19 ka.

Overall, lowest abundances were found between 19 ka and 18 ka (mean of  $\sim 37 \text{ ind. g}^{-1}$ ) during the late glacial period and increasing progressively across the deglaciation to reach highest values ( $> 400 \text{ ind. g}^{-1}$ ) during the middle Holocene between  $\sim 6$  and 4 ka (See **Figure 4.3-B**). Among the 12 species of planktonic foraminifera recovered over the past 19 ka, only five species (*G. bulloides*, *Neogloboquadrina pachyderma* (left), *Neogloboquadrina incompta*, *Globorotalia inflata* and *Globigerinita glutinata*) dominate the total assemblage.

During the past 19 ka, SSSTs ranged between  $\sim 8$  and  $11.5^\circ \text{ C}$  except for a temperature maximum ( $\sim 17^\circ \text{ C}$ ) at 15.2 ka (See **Figure 4.3-A**).

The lowest temperatures were observed at the end of the late glacial period at  $\sim 18$  ka and at the beginning of the deglaciation until 16.5 ka. During this period, we observed a higher abundance of the species *N. pachyderma* (left) (up to 44%) and *G. bulloides* (up to 39%).

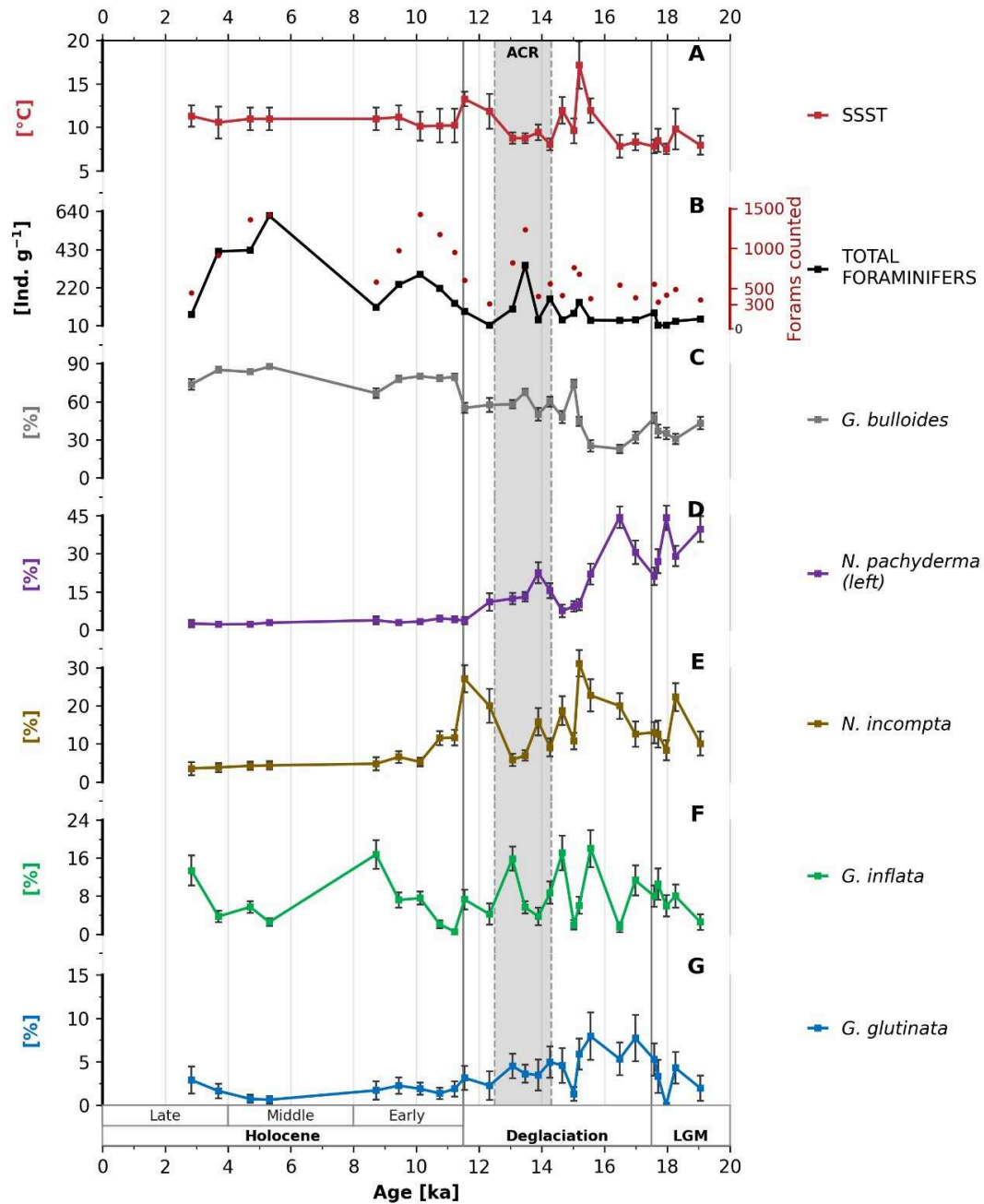
Thereafter, during the deglaciation a rapid increase in temperature is observed between 16 to 14.7 ka. During this period, the abundance of *N. pachyderma* (left) displays a decreasing trend and is progressively replaced by *N. incompta* ( $\sim 30\%$ ) and *G. bulloides* that presents a peak at 15 ka (70%). A short countertendency of these three species is observed between 14.6 ka and 13 ka with a slight increase of *N. pachyderma* (left) at the expense of *G. bulloides* and *N. incompta*. Thereafter, the latter two species increase again during the last deglaciation attaining values around 20-25% and 50-55% respectively. It is also to be noted the occurrence during the last deglaciation of *G. inflata* displaying marked changes (1 to 18%), with abundance peaks at 15.6 ka, 14.7 ka and 13.1 ka respectively. *G. glutinata* is also present during this period



showing higher abundances from 18 ka to 15 ka (~7 %), followed by a decrease to 2 % at the end of the deglaciation (See **Figure 4.3**).

At 15.2 ka there is a drastic temperature increase (17.2° C) where a higher contribution of *N. incompta* (31 %) and *G. bulloides* (45 %) in the total planktonic foraminifera assemblage is observed. After this drastic increase in temperature, a cold period was observed (SSTs of ~9° C) during the interval 14.3-13.1 ka coincident with an increase in the percentage of *N. pachyderma* (left) (See **Figure 4.3-D**). This period marked the Antarctic Cold Reversal (ACR) event in the eastern South Pacific sector of the Southern Ocean.

Since then, SSSTs progressively rose to reach 13° C at the onset of the Holocene (11.5 ka) before experiencing a slight decrease to ~11° C that persisted throughout the Holocene until the core-top. In this period foraminiferal assemblage is dominated by *G. bulloides* with percentages up to 88 % at 5.3 ka along with *N. incompta* which shows the highest abundance (up to 27 %) at the Early Holocene before gradually decreasing and settling at constant values around 4% from 9 ka onwards (See **Figure 4.3-E**). A similar trend concerns *G. inflata* with a progressive increase between 11 ka and 8.7 ka (17 %) until decreasing during the middle Holocene. A final increase is still observed during the upper Holocene between 3.7 ka and 2.4 ka (13 %).



**Figure 4.3** A) Summer SSTs based on planktonic foraminiferal assemblage. B) Total Foraminifers and foraminiferal abundance in core MD07-3081 from the Last Glacial to the Holocene: C) *G. bulloides* (%), D) *N. pachyderma* (left) (%), E) *N. incompta* (%), F) *G. inflata* (%) and G) *G. glutinata* (%). Note the different Y axes for the relative percentage of the different planktic foraminifera species. Where we present relative abundance of the species in intervals with more than 300 individuals and/or less than 20 % error que reconstruyen los ultimos 19 ka. For total counts see Supplementary Material **Figure S1**.

#### IV.4. Diatom abundances and assemblages

Relative abundances of diatoms are presented with their respective standard errors in Supplementary material **Table S3**. Total Diatom concentration ranged from  $1.1 \times 10^6$  valves per gram to  $1.6 \times 10^8$  valves per gram of dry sediment (See Supplementary material **Fig S2-A**). Overall, total diatom abundances were low during the late glacial and until 16 ka when they increased steadily to reach higher abundances at ~13, 11.7, 10, 6-5 and 1 ka. Indeed, low values during the late deglacial and the Holocene were never as low as during the glacial period.

A total of 74 diatom taxa were identified of which 16 species represent 87.3 % of the assemblage. For the description of the results, we considered the levels where more than 150 diatom valves.

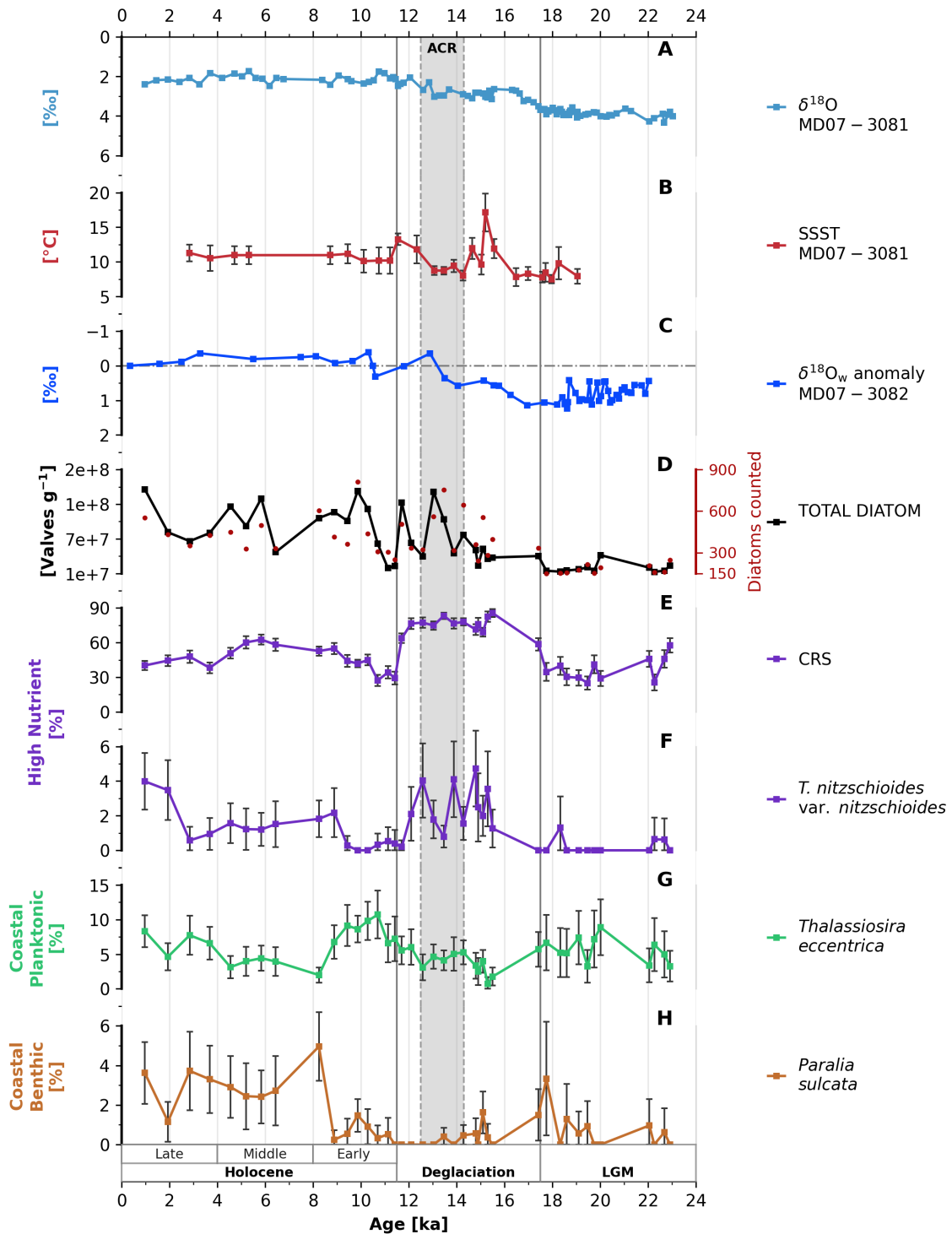
According to the published literature of diatom assemblages in surface sediments of the Atlantic, Indian and South Pacific sectors together with the literature published in the SEP, we group the 16 main taxa present in core MD07-3081 into five groups: **1) High Nutrients** represented by CRS taxa and *Thalassionema nitzschioides* var. *nitzschioides*; **2) Coastal-Planktonic** represented by *Thalassiosira eccentrica*; **3) Coastal-Benthic** represented by *Paralia sulcata*; **4) Subtropical group** represented by *Hemidiscus cuneiformis*, *Fragilariopsis doliolus*, *Azpeitia tabularis* group (*Azpeitia tabularis* var. *tabularis* + *Azpeitia tabularis* var. *egrearius*), *Roperia tessellata*, *Nitzschia bicapitata*, *Actinocyclus curvatulus* and *Shionodiscus oestrupii* and **5) Polar group** represented by *Thalassionema nitzschioides* group (*Thalassionema nitzschioides* var. *lanceolata* + *Thalassionema nitzschioides* var. *capitulata*), *Shionodiscus* group (*Shionodiscus trifultus* + *Shionodiscus frenguelli*), *Fragilariopsis kerguelensis*, *Eucampia antarctica* and *Thalassiosira antarctica*.

In the following paragraphs, we will describe each ecological group by time period. Focusing on the representative species of these groups.

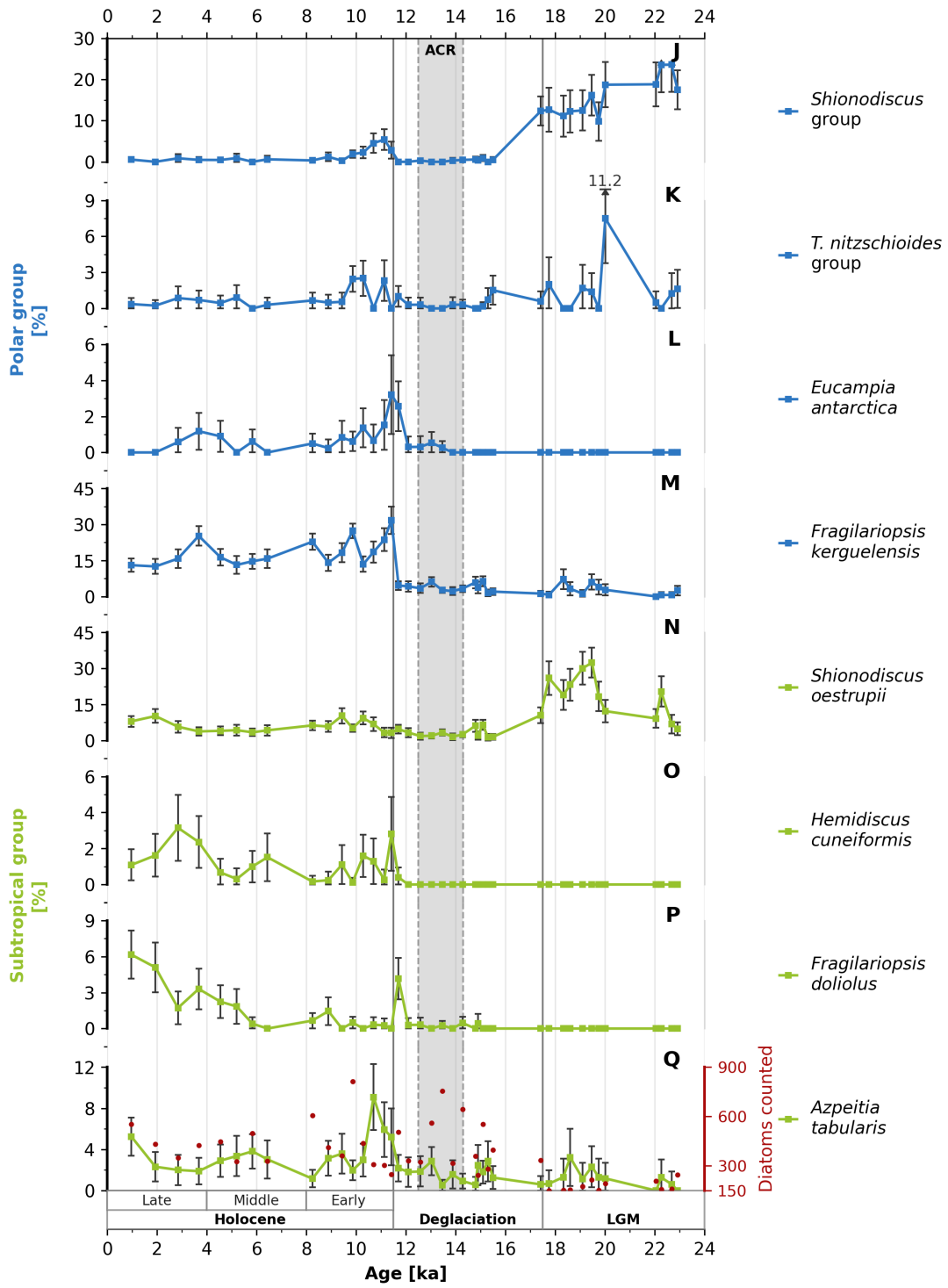
The groups dominating the late glacial period between ~23 ka to 18 ka are represented here by Subtropical (*S. oestrupii*), High nutrient (CRS) and Polar group (*Shionodiscus* group). *S. oestrupii* that presents higher abundances up to 32 %, the *Shionodiscus* group (12-24 %) and *T. eccentrica* (5-9 %). The CRS group also presents high relative abundances (~30 %), even though it corresponds to their lowest abundance in the core MD07-3081 (See **Figure 4.4** and **Figure 4.5**).

The dominant ecological group during the deglaciation was the High nutrients. Since the onset of the last deglaciation at ~18 ka, a decreasing trend of *S. oestrupii* and *Shionodiscus* group is accompanied by a significant CRS increase reaching the highest abundances between ~15 and 12 ka (~73 %). Other species found during the last deglaciation, although much less abundant, include *T. eccentrica* (~5 %) and *F. kerguelensis* (~6 %).

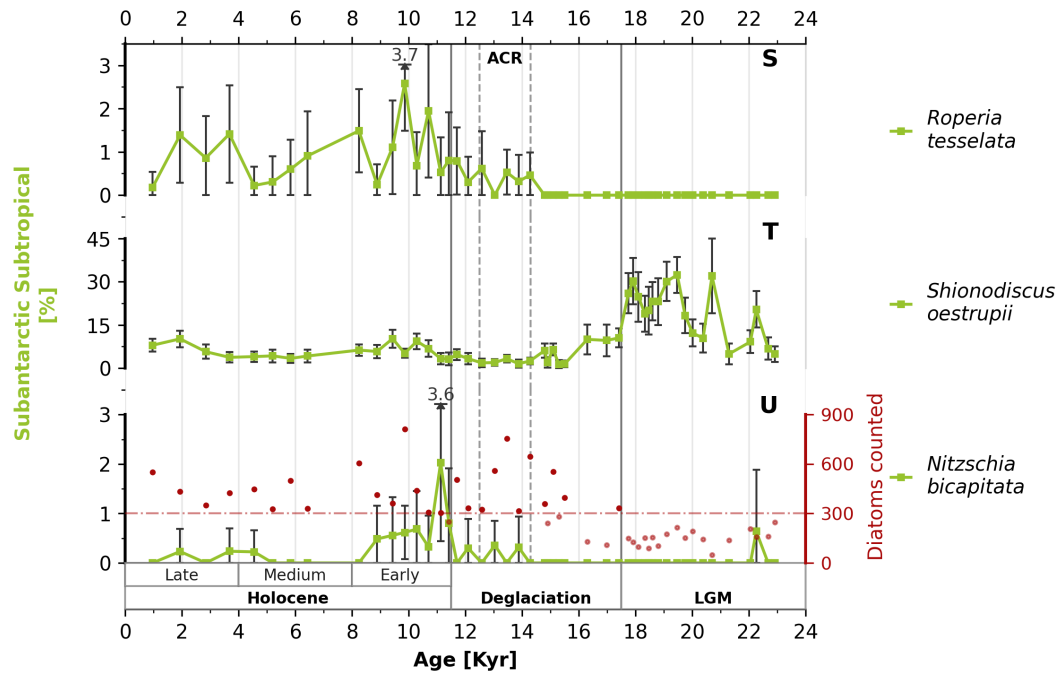
Throughout the Holocene, the greatest diversity of the diatom assemblage was observed, mainly represented by: High nutrients, Polar, Subtropical, Coastal planktonic and Coastal Benthic group. A short-term drop in CRS abundance (~45 %) is observed in the early Holocene between 11.7 to 10.7 ka concomitant with the increase of *F. kerguelensis* marked by three peaks between 11.4 ka (32 %) to 8.4 ka (23 %). Also, to be mentioned is the early Holocene increase of *S. oestrupii* (10 %) and *Shionodiscus* group (11 %) (See **Figure 4.5**). Other early Holocene species, although with small percentages, are represented by *A. tabularis* group (~9 %), *E. antarctica* (~3 %) and by a new increase of *T. eccentrica* (~10 %). However, between ~10.3 ka to 5.9 ka CRS dominate the diatom assemblage (~60 %) and stabilized at ~40 % during the middle to upper Holocene. Interestingly, beyond the dominance of CRS, the presence of the benthic taxa *P. sulcata* (5 %) is observed since the middle Holocene (~8 ka) as well as by *F. doliolus* (up to 6 %) since about 6.5 ka.



**Figure 4.4** **A)**  $\delta^{18}\text{O}$  *G. bulloides* records ; **B)** SSST ; **C)**  $\delta^{18}\text{O}_w$  anomaly in the core MD07-3082 (Haddam et al., 2018) ; **D)** Total Diatom diatom abundance in the core MD07-3081 from the Late Glacial to the Holocene: **E)** CRS (%), **F)** *T. nitzschioides* var. *nitzschioides*; **G)** *T. eccentrica* (%) and **H)** *P. sulcata* (%). In red dots are plotted the total number of diatom valves counts. This graph shows total counts greater than 150 diatoms. For total counts see supplementary material **Figure S2**.



(continued on next page)



**Figure 4.5** Diatoms of the Polar and Subtropical group in core MD07-3081 from the Late Glacial to the Holocene. Polar group species (blue curves) **J**) *Shionodiscus* group (%) **K**) *T. nitzchioides* group **L**) *Eucampia antarctica* **M**) *Fragilariopsis kerguelensis* and Subtropical group (green curves) **N**) *Shionodiscus oestrupii* **O**) *Hemidiscus cuneiformis* **P**) *Fragilariopsis doliolus* and **Q**) *Azpeitia tabularis*. This graph shows total counts greater than 150 diatoms. For total counts see supplementary material Fig. S2

## IV.5. PCA

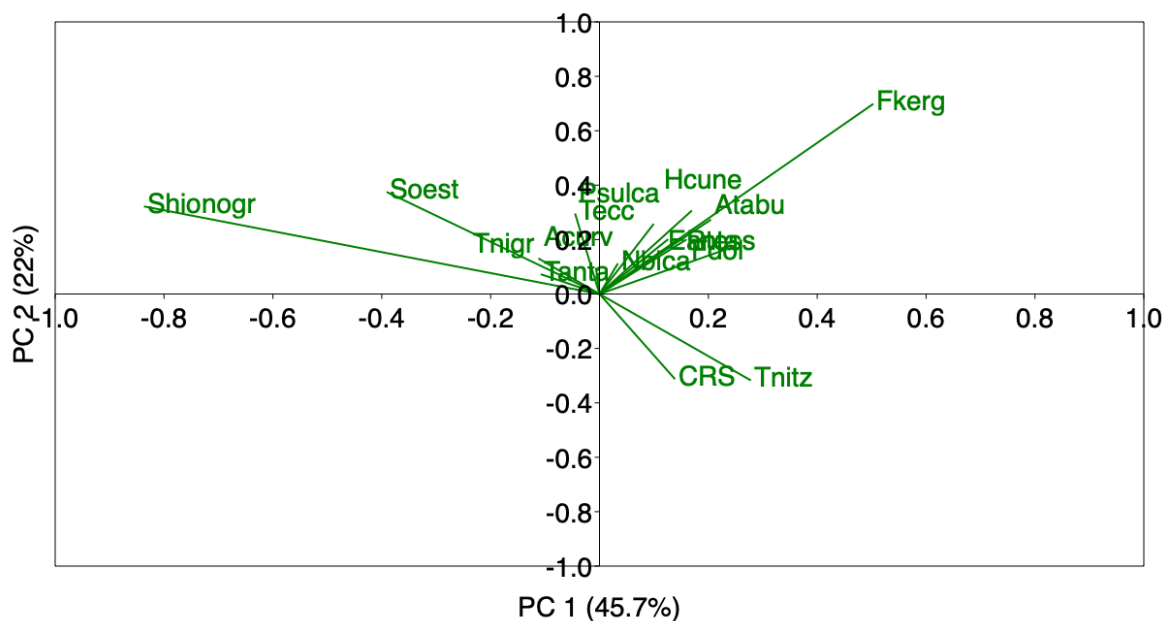
In order to identify the ecological group (s) that would covary together in the time, we performed a PCA on the 16 species that are present at least twice for more than 2 %. The first 2 components account for 67.7 % of the total variance of the diatom species (PC1: 45.7%, PC2: 22 %). Species with an absolute factor value  $>0.2$  were considered for the two principal components (See **Table 4.2**).

In PC1 (45.7 % of the variance) the positive values ( $>0.2$ ) are represented by *F. kerguelensis* and *T. nitzschioides* var. *nitzschioides* while *Shionodiscus* group and *S. oestrupii* present negative values ( $< -0.2$ ). The first two species were far more abundant in the Holocene than during the LGM and the deglaciation while the last two present percentage up to 20 and 30 % respectively that decrease greatly during the deglaciation and Holocene. With regard to the PC2 (22 % of the variance) the CRS taxa, more abundant in the deglaciation, present the only negative value in opposition to the other diatom species (See **Figure 4.6** and **Figure 4.7**).

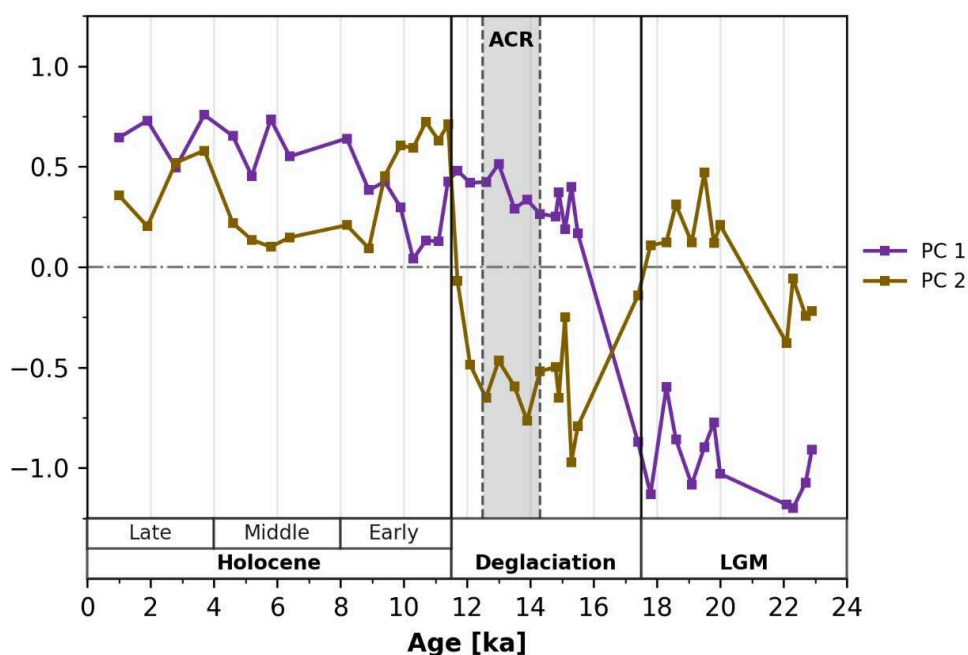
**Table 4.2** PCA results for core MD07-3081. Scores above  $|0.2|$  are in bold.

Diatom species	PC 1 [45.7 %]	Diatom species	PC 2 [22 %]
<i>Fragilariopsis kerguelensis</i>	<b>0.424</b>	<i>Fragilariopsis kerguelensis</i>	<b>0.59</b>
<i>T. nitzschioides</i> var. <i>nitzschioides</i>	<b>0.235</b>	<i>Shionodiscus oestrupii</i>	<b>0.32</b>
<i>Fragilariopsis doliolus</i>	0.196	<i>Shionodiscus</i> group	<b>0.27</b>
<i>Azpeitia tabularis</i>	0.173	<i>Hemidiscus cuneiformis</i>	<b>0.26</b>
<i>Hemidiscus cuneiformis</i>	0.143	<i>Thalassiosira eccentrica</i>	<b>0.25</b>
<i>Roperia tessellata</i>	0.135	<i>Azpeitia tabularis</i>	<b>0.23</b>
CRS	0.117	<i>Paralia sulcata</i>	<b>0.22</b>
<i>Eucampia antarctica</i>	0.106	<i>Eucampia antarctica</i>	0.17
<i>Paralia sulcata</i>	0.084	<i>Roperia tessellata</i>	0.17
<i>Nitzschia bicaipitata</i>	0.028	<i>Fragilariopsis doliolus</i>	0.14
<i>Actinocyclus curvatulus</i>	-0.006	<i>T. nitzschioides</i> group	0.11
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	-0.038	<i>Nitzschia bicaipitata</i>	0.09
<i>Thalassiosira antarctica</i>	-0.091	<i>Actinocyclus curvatulus</i>	0.08
<i>T. nitzschioides</i> group	-0.095	<i>Thalassiosira antarctica</i>	0.06
<i>Shionodiscus oestrupii</i>	<b>-0.330</b>	CRS	<b>-0.26</b>
<i>Shionodiscus</i> group	<b>-0.706</b>	<i>T. nitzschioides</i> var. <i>nitzschioides</i>	<b>-0.27</b>





**Figure 4.6** Principal Component Analysis (PCA) biplot showing the relationship between the diatom species present in core MD07-3081. Abbreviations of diatom species: **Acurv** (*A. curvatulus*); **Atabu** (*A. tabularis*); **CRS** (*Chaetoceros* spp resting spores); **Eanta** (*E. antarctica*); **Fdol** (*F. doliolus*); **Fkerg** (*F. kerguelensis*); **Hcune** (*H. cuneiformis*); **Nbica** (*N. bicapitata*); **Psulca** (*P. sultaca*); **Rtess** (*R. tessellata*); **Shionogr** (*Shionodisus* group); **Soest** (*S. oestrupii*); **Tnigr** (*T. nitzschioides* group); **Tnitz** (*T. nitzschioides* var *nitzschioides*); **Tanta** (*T. antarctica*) and **Tecc** (*T. eccentrica*).



**Figure 4.7** Graph of PC1 and PC2 versus age in core MD07-3081.

## V. Discussion

In the following sections, we discuss diatom and foraminiferal abundance according to the main climatic phases of the last 23 ka: late glacial, deglaciation, and the Holocene, and their implication for regional and global hydrography.

### V.1. Late Glacial

The late glacial SSST reconstructions from planktonic foraminifera assemblage, for 19 to 17.5 ka, indicate values at  $\sim 8^{\circ}$  C in agreement to those from the nearby core MD07-3082 (Haddam et al., 2018) with *N. pachyderma* (left) percentage between 30 to 45%. The glacial-interglacial temperature change thus do not exceed  $3^{\circ}$  C. The temperature has been reconstructed only for the late glacial because before  $\sim 19$  ka, there was not enough foraminifera to reach 300 individuals.

During the last glacial period, it is important to consider that diatom counts were similarly low, associated to a lower abundance of diatom valves, and did not exceed 300 valves. As indicated by the PC1 component, the diatom assemblage was represented by high percentages of *S. oestrupii* and *Shionodiscus* group (up to  $\sim 15 \pm 5$  and  $30 \pm 8$  % respectively), species associated with rather different temperatures but both are associated with high salinities. These percentages of *S. oestrupii* and *Shionodiscus* group observed at  $49^{\circ}$  S during the last glacial are much higher than the modern abundances observed in the South Ocean.

Actually, *S. oestrupii* are present in a much higher percentage in the North Atlantic associated with saline waters (Oksman et al., 2019). Similarly, Sancetta (1983) from deep-sea cores from the Bering Sea indicates a higher abundance of *S. trifultus* during the Last Glaciation (10-30 %) than at present. Recently, Rae et al., (2021) reported higher salinities in that area during the Last Glacial Maximum (LGM) than during the Holocene, which would suggest that glacial abundance of *S. trifultus* in the North Pacific would be associated with more saline waters.

Considering the small amplitude of change in SST over the past 19 ka, temperature did not play a regulatory role in diatom assemblages. Therefore, we suggest that salinity could be the main factor regulating the diatom assemblage in core MD07-3081.

During the late glacial and deglaciation, the influence of the large PIS led to even lower salinities than Holocene ones along the Chilean margin south to  $40^{\circ}$  S (Caniupán et al., 2011; Haddam et al., 2018). But as nowadays (See **Figure 1.1-B**, Dávila et al., 2002), the area around

49° S is not directly under the influence of fresh water from the continent during the last glacial. Haddam et al., (2018), reconstructing the surface water oxygen isotopic composition in the nearby core MD07-3082, indicated that the late glacial-Holocene salinity difference in that area was as high as for the mean ocean, thus probably reaching up to ~34.8 psu for a ~120 m lower sea level (Lambeck et al., 2014). We are thus confident that higher salinity permitted the high relative abundance of both *S. oestrupii* and the *Shionodiscus* group during the late glacial in core MD07-3081.

For the Last Glacial period, both Caniupán et al., (2011), reconstructing temperature from alkenones at 53° S, and Verleye and Louwye, 2010, from dinocysts study at 41° S, suggested a shift of the subantarctic and Polar fronts to the North. In this study, the diatoms observed during the Last Glacial are the same species than during the deglaciation and the Holocene and we did not observe an increase in diatom species characteristic of the PFZ (e.g. *Thalassiosira antarctica* or *Thalassiosira lentiginosa*) suggesting that during the Last Glacial, both the SAF and PF may have been maintained in the Drake Passage. This discrepancy with the studies of Verleye and Louwye, 2010 and Caniupán et al., (2011) who suggested a northward shift of the SAF and PF during the Last Glacial, may be related to the direct influence of meltwater from the PIS on diatom, dinocyst and alkenone assemblages.

## V.2. Deglaciation

During deglaciation, the dominant diatoms are the CRS taxa with a mean abundance of ~73 % during this period. PC2 indicates that this abundance of the CRS taxa contrasts with the abundance of all other species: no other specie indicates an increased percentage during the deglaciation.

In the SEP this group is favored by the high availability of nutrients present in the coastal upwelling zone (Romero & Hebbeln, 2003; Abrantes et al., 2007). Thus, the dominance of CRS indicates a high nutrient concentration during the deglaciation. The most opportunistic specie of the foraminifera assemblage, *G. glutinata*, also indicate his highest percentage, up to 8 %, during the deglaciation, confirming increased nutrient concentration. However, it should be emphasized that there is no coastal upwelling at 49° S as winds and the ACC are perpendicular to the coast. Siani et al., (2013) evidenced the resumption of the SO upwelling during the deglaciation in the SEP with the lowest difference between planktic and benthic foraminifera  $\delta^{13}\text{C}$  and  $^{14}\text{C}$  age for foraminifera living in SAAW and AAIW (See **Figure 4.8**). The

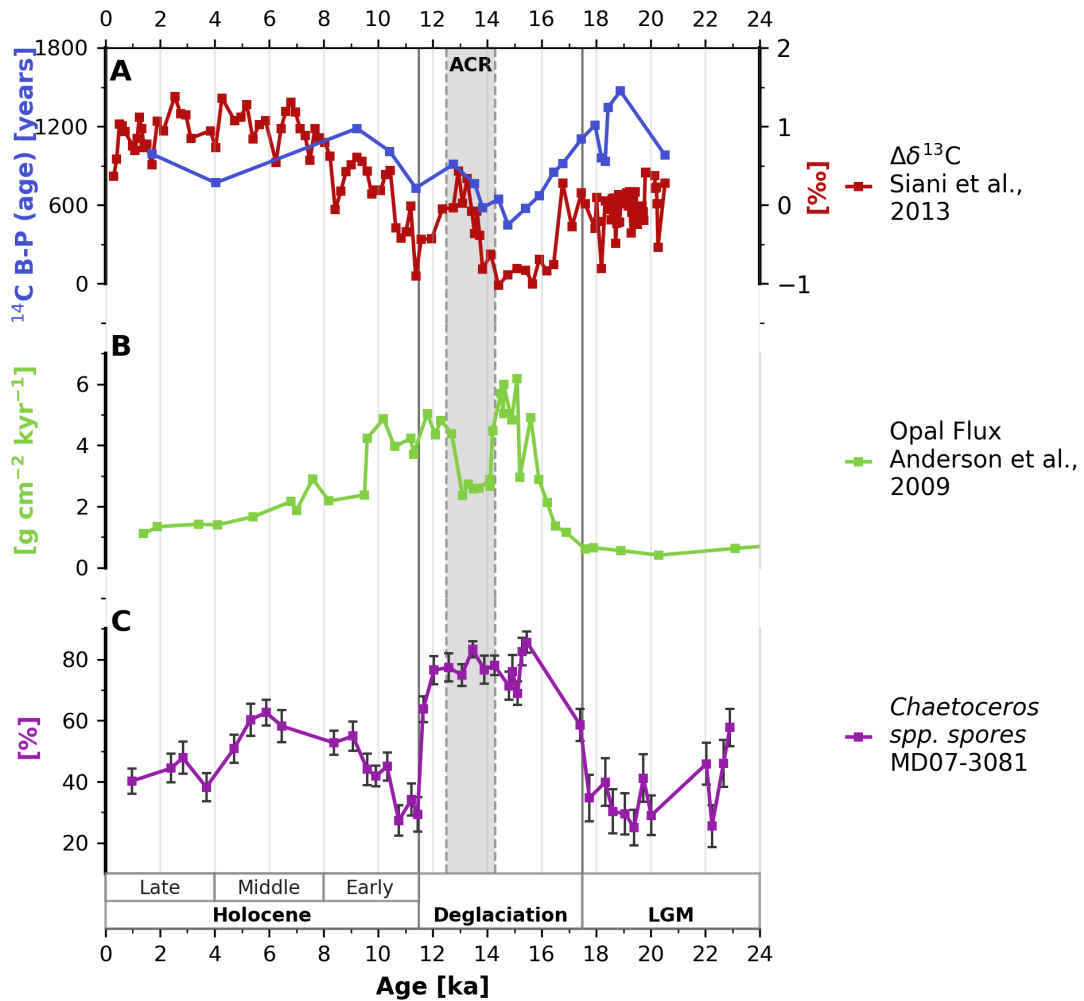
resumption of the Antarctic upwelling brought to the surface the nutrients stored in the deep ocean during the glacial period, thus promoting a strong recovery of productivity in the Antarctic zone (Anderson et al., 2009). This increased in productivity is also observed in the SEP further north (Duchamp-Alphonse et al., 2018), nutrients being transported north from the Antarctic zone with SAAW. While records at 46° S show a decrease in the SO upwelling intensity and the associated nutrient supply during the ACR, the percentage of CRS indicates high values along the whole deglaciation period (See **Fig. 8**). This difference might arise from the highly opportunistic behavior of *Chaetoceros* diatoms.

During the first part of deglaciation, a temperature of  $17.2^{\circ}\text{C} \pm 2.7^{\circ}\text{C}$  is reconstructed at 15.2 ka. While for all the period considered, the modern analog top cores selected by Paleoanalogs are located within the open Southern Ocean between 40-55° S, only for this level, the modern analog cores are located off Chile, in the area of the subtropical front, along the upwelling zone between 29° and 33° S, which is evidenced by a higher abundance of *G. bulloides* (45 %) and *N. incompta* (31 %), species associated with higher nutrient availability in upwelling zones (Schiebel et al., 2017). Thus, we consider this temperature reconstruction at 15.2 ka to be impacted by nutrient availability, nutrients being the second factor, after temperature, responsible for foraminifera species distribution (Feldberg & Mix 2002). The temperature reconstruction is therefore not robust for that level.

The temperature increase, from ~8 to ~12° C at ~16 ka, before a cooling down to ~9° C between ~14.5 and 13 ka (Fig. 4). This cooling is also observed in the nearby core MD07-3082 (Haddam et al., 2018) and can be associated to the ACR observed Antarctic ice core records (Pedro et al., 2015).

In the SSST record from MD07-3081, we observe two periods with higher temperatures (15.6-15.2 ka and 12.3 ka) within two Atlantic cold phases, Heinrich Stadial 1 (HS1) and the Younger Dryas (YD). The SSSTs observed during these periods (~12° C) are similar to those reported in the subantarctic South Atlantic zone and the SEP, where they have been proposed to indicate a southward shift of the STF (Barker et al., 2009). In the SEP the rapid southward shift of the STF would result from a weakening at millennial scale of the South Pacific split jet during Atlantic cold periods (Chiang et al., 2014; Haddam et al., 2018). During these periods the most abundant planktonic foraminifera were *G. bulloides* and *N. incompta*. Of these two species, *N. incompta* is often associated with the STF (Peeters et al., 2004; de Deckker et al., 2012). Thus,

foraminifera assemblages are in agreement with a rapid southward shift of the STF closer to our core location during HS1 and the YD in the SEP.



**Figure 4.8** Productivity and Circulation in the Southern Ocean. **A)** Paired benthic and planktic foraminifera radiocarbon age and  $^{13}\text{C}$  difference in core MD07-3088 located at  $46^\circ\text{S}$  (Siani et al., 2013). **B)** Southern Ocean Opal flux, a proxy for upwelling south of the Antarctic polar front from core TN057-13-4PC (Anderson et al., 2009) and **C)** Abundance (%) of *Chaetoceros* spp. resting spores of the core in study MD07-3081.

### V.3. Holocene

The transition to the early Holocene is marked by a rapid decrease in the percentage of CRS. This decrease is compensated by an increase in the number of diatoms of the Subtropical (*A. tabularis*), Polar (*F.kerguelensis* and *E. antarctica*) and Coastal Planktonic (*T. eccentrica*) groups. Some of these species show generally higher percentages in the north of the SAZ, e.g. *Azpeitia tabularis*, which reaches up to 9% and can live between  $10$  and  $22^\circ\text{C}$ . This diversity

and increase of polar and subtropical species at the beginning of the Holocene could be an indicator of a shift of the SWW further south of its present position (45° S) around 49° S.

In the early Holocene, the diatoms associated mainly with open ocean conditions and could indicate a higher influence of the ACC at the core site for that period (Kilian & Lamy., 2012). The ACC in this period would reach the coast at ~48° S, south to its modern position and its greater influence would explain the higher percentage of both warm and cold diatom species (e.g. *A. tabularis* and *F.kerguelensis* respectively), associated to the open ocean, transported from the SAZ.

An increase of up to 10 % of the Coastal Planktonic group represented by *T. eccentrica* is also observed during the early Holocene. In the SEP, Romero & Hebbeln, (2003) attributed its abundance in southern Chile to the combination of a greater amount of nutrients from the ACC (whose waters are limited in iron) and the contribution of iron from the continent. The greater influence of the ACC at 49° S suggested by Kilian & Lamy, (2012) at the beginning of the Holocene, would be induced by a greater strength of the SWW producing an increase in precipitation in the Chilean Patagonian region, and, as a result, a greater contribution of iron at this region. After 9 ka BP, the presence of *P. sulcata*, a representative species of the Coastal Benthic group, could be directly related to coastal influence and transport from the upper shelf by bottom currents and downward movements (Romero et al., 2001). Its abundance reaches 3-4 % in the mid to late Holocene, once rapid sea level rise finished reaching modern sea level by 2-3 m (Lambeck et al., 2014), which would have led to a stronger flow along the continental slope.

In the late Holocene, the increasing trend in the abundance of *F. doliolus* and *A. tabularis* group representatives of Subtropical group could indicate a greater influence of equatorial oligotrophic waters moving poleward along the Peru Chile Couter Current (PCCC) Romero & Hebbeln, 2003). Paleoenvironmental reconstructions with terrestrial proxies during this period indicate a lower SWW intensity and a reduction of precipitation at 53° S (Lamy et al., 2010), which could indicate the greater influence of warmer waters to this area from the PCCC.

## VI. Conclusions

Our multy-proxy study deals on the first qualitative composition of diatoms assemblages from a deep-sea core (MD07-3081) located off the south-chile margin at 49° S.

Pronounced changes in diatom assemblages are associated to the hydrological changes linked to the climate transition from the Last Glacial period to the Holocene as indicated by the PCA. Surprisingly, the main factor for the glacial period comes from the higher salinities of the global ocean in this area that is not under the influence of fresh water from the nearby PIS. These high salinities lead to high percentages of *Shionodiscus oestrupii* and *Shionodiscus* group, up to 30 and 25 % respectively, percentage that are only observed in the north Atlantic Ocean nowadays. During the deglaciation, the CRS reach 85 %, taking advantage of the resumption of the Southern Ocean upwelling that brings up nutrient stored in the deep ocean during the glacial period. At the transition to the early Holocene, percentages of diatoms both from the north of the SAZ and from the South of the SAZ increased indicating a higher influenced of the ACC shifted by ~3° to the South. At the Late Holocene increased percentage of warmer diatom specie, *F. doliolus*, possibly indicates an increased influence of the PCCC.

Concerning the hydrological fronts, during the late glacial, the diatom assemblage is represented by species from the SAZ. No diatoms from the PF zone have been observed, indicating that the area was located within the SAZ throughout the late glacial period. This study therefore confirms that the SAF did not reach 50° S during the late glacial in the SEP in agreement with the study of Haddam et al., 2018 and opposite to the studies based on coastal cores strongly influenced by fresh water flux from the PIS.

Interestingly, the deglaciation is marked by two rapid SSST increases during the north Atlantic Heinrich Stadial 1 (HS1) and the Younger Dryas, suggesting rapid southerward shift of the STF. This result is supported by the abundance of the planktonic foraminifer *N. incompta* often associated in the southern hemisphere with the subtropical front (de Deckker et al., 2012; Peeters et al., 2004).

## VII. Supplementary information

For supplementary information of Tables 4.S1, 4.S2 and 4.S3 please see **Annexes 2**.

For supplementary information of Figures 4. S1 and 4. S2 please see **Annexes 3**.

## VIII. References

- Abrantes, F., Lopes, C., Mix, A., & Pisias, N. (2007). Diatoms in Southeast Pacific surface sediments reflect environmental properties. *Quaternary Science Reviews*, 26(1–2), 155–169. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.02.022>
- Anderson, R. F., Ali, S., Bradtmiller, L. I., Nielsen, S. H. H., Fleisher, M. Q., Anderson, B. E., & Burckle, L. H. (2009). Wind-Driven upwelling and the Deglacial Rise in Atmospheric CO<sub>2</sub>. *Science*, 323(March), 1443–1448. <https://doi.org/10.1126/science.1167441>
- Barker, S., Diz, P., Vautravers, M. J., Pike, J., Knorr, G., Hall, I. R., & Broecker, W. S. (2009). Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation. *Nature*, 457(7233), 1097–1102. <https://doi.org/10.1038/nature07770>
- Benz, V., Esper, O., Gersonde, R., Lamy, F., & Tiedemann, R. (2016). Last Glacial Maximum sea surface temperature and sea-ice extent in the Pacific sector of the Southern Ocean. *Quaternary Science Reviews*, 146, 216–237. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.006>
- Bertrand, S., Huguen, K., Sepúlveda, J., & Pantoja, S. (2014). Late Holocene covariability of the southern westerlies and sea surface temperature in northern Chilean Patagonia. *Quaternary Science Reviews*, 105, 195–208. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.021>
- Blunier, T., & Brook, E. J. (2001). Timing of millennial-scale climate change in antarctica and greenland during the last glacial period. *Science*, 291(5501), 109–112. <https://doi.org/10.1126/science.291.5501.109>
- Broecker, W. S. (1998). Paleocean circulation during the last deglaciation: A bipolar seesaw? *Paleoceanography*, 13(2), 119–121. <https://doi.org/10.1029/97PA03707>
- Buizert, C., Sigl, M., Severi, M., Markle, B. R., Wettstein, J. J., McConnell, J. R., Pedro, J. B., Sodemann, H., Goto-Azuma, K., Kawamura, K., Fujita, S., Motoyama, H., Hirabayashi, M., Uemura, R., Stenni, B., Parrenin, F., He, F., Fudge, T. J., & Steig, E. J. (2018). Abrupt ice-age shifts in southern westerly winds and Antarctic climate forced from the north. *Nature*, 563(7733), 681–685. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0727-5>
- Caniupán, M., Lamy, F., Lange, C. B., Kaiser, J., Arz, H., Kilian, R., Baeza Urrea, O., Aracena, C., Hebbeln, D., Kissel, C., Laj, C., Mollenhauer, G., & Tiedemann, R. (2011). Millennial-scale sea surface temperature and Patagonian Ice Sheet changes off southernmost Chile (53 °s) over the past ~60 kyr. *Paleoceanography*, 26(3). <https://doi.org/10.1029/2010PA002049>
- Cárdenas, P., Lange, C. B., Vernet, M., Esper, O., Srain, B., Vorrath, M. E., Ehrhardt, S., Müller, J., Kuhn, G., Arz, H. W., Lembke-Jene, L., & Lamy, F. (2019). Biogeochemical proxies and diatoms in surface sediments across the Drake Passage reflect oceanic domains and frontal systems in the region. *Progress in Oceanography*, 174(October 2018), 72–88. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.10.004>
- Chiang, J. C. H., Lee, S. Y., Putnam, A. E., & Wang, X. (2014). South Pacific Split Jet, ITCZ shifts, and atmospheric North-South linkages during abrupt climate changes of the last glacial period. *Earth and Planetary Science Letters*, 406, 233–246. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.09.012>



- Crosta, X., & Koç, N. (2007). Chapter Eight Diatoms: From Micropaleontology to Isotope Geochemistry. *Developments in Marine Geology*, 1(07), 327–369. [https://doi.org/10.1016/S1572-5480\(07\)01013-5](https://doi.org/10.1016/S1572-5480(07)01013-5)
- Crosta, X., Romero, O., Armand, L. K., & Pichon, J. J. (2005). The biogeography of major diatom taxa in Southern Ocean sediments: 2. Open ocean related species. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 223(1–2), 66–92. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.03.028>
- Crosta, X., Shukla, S. K., Ther, O., Ikehara, M., Yamane, M., & Yokoyama, Y. (2020). Last Abundant Appearance Datum of *Hemidiscus karstenii* driven by climate change. *Marine Micropaleontology*, 157(March), 101861. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2020.101861>
- Davies, B. J., Darvill, C. M., Lovell, H., Bendle, J. M., Dowdeswell, J. A., Fabel, D., García, J. L., Geiger, A., Glasser, N. F., Gheorghiu, D. M., Harrison, S., Hein, A. S., Kaplan, M. R., Martin, J. R. V., Mendelova, M., Palmer, A., Pelto, M., Rodés, Á., Sagredo, E. A., ... Thorndycraft, V. R. (2020). The evolution of the Patagonian Ice Sheet from 35 ka to the present day (PATICE). In *Earth-Science Reviews* (Vol. 204). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103152>
- Dávila, P. M., Figueroa, D., & Müller, E. (2002). Freshwater input into the coastal ocean and its relation with the salinity distribution off austral Chile (35–55°S). *Continental Shelf Research*, 22(3), 521–534. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00072-3](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00072-3)
- de Deckker, P., Moros, M., Perner, K., & Jansen, E. (2012). Influence of the tropics and southern westerlies on glacial interhemispheric asymmetry. *Nature Geoscience*, 5(4), 266–269. <https://doi.org/10.1038/ngeo1431>
- Dumoulin, J.-P., Comby-Zerbino, C., Delqué-Količ, E., Moreau, C., Caffy, I., Hain, S., Perron, M., Thellier, B., Setti, V., Berthier, B., Comby-Zerbino, C., Delqué-Količ, E., Moreau, C., Caffy, I., Hain, S., Perron, M., Thellier, B., Setti, V., Berthier, B., & Beck, L. (2017). Status Report on Sample Preparation Protocols Developed at the LMC14 Laboratory, Saclay, France: From Sample Collection to 14 C AMS Measurement. *Radiocarbon*, 59(3), 713–726. <https://doi.org/10.1017/RDC.2016.116i>
- Esper, O., & Gersonde, R. (2014). Quaternary surface water temperature estimations: New diatom transfer functions for the Southern Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 414, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.08.008>
- Esper, O., Gersonde, R., & Kadagies, N. (2010). Diatom distribution in southeastern Pacific surface sediments and their relationship to modern environmental variables. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 287(1–4), 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.12.006>
- Feldberg, M. J., & Mix, A. C. (2002). Sea-surface temperature estimates in the Southeast Pacific based on planktonic foraminiferal species; modern calibration and Last Glacial Maximum. *Marine Micropaleontology*, 44(1–2), 1–29. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(01\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(01)00035-4)

- Garreaud, R., Lopez, P., Minvielle, M., & Rojas, M. (2013). Large-scale control on the Patagonian climate. *Journal of Climate*, *26*(1), 215–230. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1>
- Haddam, N. A., Michel, E., Siani, G., Cortese, G., Bostock, H. C., Duprat, J. M., & Isguder, G. (2016). Improving past sea surface temperature reconstructions from the Southern Hemisphere oceans using planktonic foraminiferal census data. *Paleoceanography*, *31*(6), 822–837. <https://doi.org/10.1002/2016PA002946>
- Haddam, N. A., Siani, G., Michel, E., Kaiser, J., Lamy, F., Duchamp-Alphonse, S., Hefter, J., Braconnot, P., Dewilde, F., Isgüder, G., Tisnerat-Laborde, N., Thil, F., Durand, N., & Kissel, C. (2018). Changes in latitudinal sea surface temperature gradients along the Southern Chilean margin since the last glacial. *Quaternary Science Reviews*, *194*, 62–76. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.06.023>
- Hammer, Ø. (2020). PAST: PAleontological STatistics Version 4.03 Reference manual. *Natural History Museum*, *1999*, 1–283.
- Hasle, G. R., & Syvertsen, E. E. (1996). Marine Diatoms. *Identifying Marine Phytoplankton*, 5–385. <https://doi.org/10.1016/b978-012693018-4/50004-5>
- Hogg, A. G., Heaton, T. J., Hua, Q., Palmer, J. G., Turney, C. S., Southon, J., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Boswijk, G., Bronk Ramsey, C., Pearson, C., Petchey, F., Reimer, P., Reimer, R., & Wacker, L. (2020). SHCal20 Southern Hemisphere Calibration, 0–55,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, *62*(4), 759–778. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.59>
- Hulton, N. R. J., Purves, R. S., McCulloch, R. D., Sugden, D. E., & Bentley, M. J. (2002). The Last Glacial Maximum and deglaciation in southern South America. *Quaternary Science Reviews*, *21*(1–3), 233–241. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00103-2)
- Johansen, J. R., Fryxell, G. A., Johansen, J. R., & Fryxell, G. A. (1985). The genus *Thalassiosira* (Bacillariophyceae): studies on species occurring south of the Antarctic Convergence Zone. In *Phycologia* (Vol. 24, Issue 2).
- Kissel, C. (2007). *MD159 – PACHIDERME IMAGES XV Data Report*. 1–84.
- Kohfeld, K. E., Graham, R. M., de Boer, A. M., Sime, L. C., Wolff, E. W., Le Quéré, C., & Bopp, L. (2013). Southern Hemisphere westerly wind changes during the Last Glacial Maximum: Paleo-data synthesis. *Quaternary Science Reviews*, *68*, 76–95. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.01.017>
- Lambeck, K., Rouby, H., Purcell, A., Sun, Y., & Sambridge, M. (2014). Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *111*(43), 15296–15303. <https://doi.org/10.1073/pnas.1411762111>
- Lamy, F., Kaiser, J., Ninnemann, U., Hebbeln, D., Arz, H. W., & Stoner, J. (2004). Antarctic timing of surface water changes off Chile and Patagonian ice sheet response. *Science*, *304*(5679), 1959–1962. <https://doi.org/10.1126/science.1097863>

- Lamy, F., Kilian, R., Arz, H. W., Francois, J. P., Kaiser, J., Prange, M., & Steinke, T. (2010). Holocene changes in the position and intensity of the southern westerly wind belt. *Nature Geoscience*, 3(10), 695–699. <https://doi.org/10.1038/ngeo959>
- Lamy, F., Arz, H. W., Kilian, R., Lange, C. B., Lembke-Jene, L., Wengler, M., Kaiser, J., Baeza-Urrea, O., Hall, I. R., Harada, N., & Tiedemann, R. (2015). Glacial reduction and millennial-scale variations in Drake Passage throughflow. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(44), 13496–13501. <https://doi.org/10.1073/pnas.1509203112>
- Levitus, S., Stephens, C., Antonov, J., Boyer, T. P., & Mineta, N. Y. (2000). *Yearly and year-season upper ocean temperature anomaly fields, 1948-1998*.
- Locarnini, R. A., Mishonov, A. v, Baranova, O. K., Boyer, T. P., Zweng, M. M., Garcia, H. E., Reagan, J. R., Seidov, D., Weathers, K. W., Paver, C. R., & Smolyar, I. v. (2019). *World Ocean Atlas* (Vol. 1). <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/indprod.html>
- Lougheed, B. C., & Obrochta, S. P. (2019). A Rapid, Deterministic Age-Depth Modeling Routine for Geological Sequences With Inherent Depth Uncertainty. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 34(1), 122–133. <https://doi.org/10.1029/2018PA003457>
- Martinez Fontaine, Consuelo (2021). Utilisation of radiocarbon and tephrochronology to constrain the oceanic circulation in the Southeast Pacific Ocean during the last 20,000 years. *Oceanography*. Université Paris-Saclay.
- Moreno, P. I., Francois, J. P., Moy, C. M., & Villa-Martínez, R. (2010). Covariability of the Southern Westerlies and atmospheric CO<sub>2</sub> during the Holocene. *Geology*, 38(8), 727–730. <https://doi.org/10.1130/G30962.1>
- Mortyn, P. G., & Charles, C. D. (2003). Planktonic foraminiferal depth habitat and  $\delta^{18}\text{O}$  calibrations: Plankton tow results from the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Paleoceanography*, 18(2). <https://doi.org/10.1029/2001pa000637>
- Orsi, A. H., Whitworth, T., & Nowlin, W. D. (1995). On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Research Part I*, 42(5), 641–673. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00021-W](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00021-W)
- Patterson, R. T., & Fishbein, E. (1989). Re-examination of the statistical methods used to determine the number of point counts needed for micropaleontological quantitative research. *Journal of Paleontology*, 63(2), 245–248. <https://doi.org/10.1017/S0022336000019272>
- Pedro, J. B., Bostock, H. C., Bitz, C. M., He, F., Vandergoes, M. J., Steig, E. J., Chase, B. M., Krause, C. E., Rasmussen, S. O., Markle, B. R., & Cortese, G. (2015). The spatial extent and dynamics of the Antarctic Cold Reversal. *Nature Geoscience*, 9(1), 51–55. <https://doi.org/10.1038/ngeo2580>
- Peeters, F., Acheson, R., Brummer, G.-J. A., de Ruijter, W., Schneider, R., Ganssen, G., Ufkes, E., & Kroon, D. (2004). Vigorous exchange between the Indian and Atlantic oceans at the end of the past five glacial periods. *Nature*, 430, 661–665.
- Prell, W. L. (1985). *The stability of low-latitude sea-surface temperatures: an evaluation of CLIMAP reconstruction with emphasis on the positive SST anomalies*. U.S. Dept. of Energy,

Office of Energy Research, Office of Basic Energy Sciences, Carbon Dioxide Research Division. //catalog.hathitrust.org/Record/007195294

Rae, J. W. B., Zhang, Y. G., Liu, X., Foster, G. L., Stoll, H. M., & Whiteford, R. D. M. (2021). Atmospheric CO<sub>2</sub> over the Past 66 Million Years from Marine Archives. *The Annual Review of Earth and Planetary Sciences Is Online at Earth.Annualreviews.Org*, 49, 609–650. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-082420>

Reyes-Macaya, D., Hoogakker, B., Martínez-Méndez, G., Llanillo, P. J., Grasse, P., Mohtadi, M., Mix, A., Leng, M. J., Struck, U., McCorkle, D. C., Troncoso, M., Gayo, E. M., Lange, C. B., Farias, L., Carhuapoma, W., Graco, M., Cornejo-D'Ottone, M., De Pol Holz, R., Fernandez, C., Hebbeln, D. (2022). Isotopic Characterization of Water Masses in the Southeast Pacific Region: Paleoceanographic Implications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(1). <https://doi.org/10.1029/2021JC017525>

Romero, O. E., Armand, L. K., Crosta, X., & Pichon, J. J. (2005). The biogeography of major diatom taxa in Southern Ocean surface sediments: 3. Tropical/Subtropical species. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 223(1–2), 49–65. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.03.027>

Romero, O. E., Hebbeln, D., & Wefer, G. (2001). Temporal and spatial variability in export production in the SE Pacific Ocean: Evidence from siliceous plankton fluxes and surface sediment assemblages. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 48(12), 2673–2697. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(01\)00037-1](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(01)00037-1)

Romero, O. E., & Hebbeln, D. (2003). Biogenic silica and diatom thanatocoenosis in surface sediments below the Peru-Chile Current: Controlling mechanisms and relationship with productivity of surface waters. *Marine Micropaleontology*, 48(1–2), 71–90. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(02\)00161-5](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(02)00161-5)

Sancetta, C. (1983). Effect of Pleistocene glaciation upon oceanographic characteristics of the North Pacific Ocean and Bering Sea. In *Deep-Sea Research* (Vol. 30, Issue 8A).

Schiebel, R., & Hemleben, C. (2017). Planktic foraminifers in the modern ocean. In *Planktic Foraminifers in the Modern Ocean*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-50297-6>

Schiebel, R., Spielhagen, R. F., Garnier, J., Hagemann, J., Howa, H., Jentzen, A., Martínez-García, A., Meilland, J., Michel, E., Repschläger, J., Salter, I., Yamasaki, M., & Haug, G. (2017). Modern planktic foraminifers in the high-latitude ocean. *Marine Micropaleontology*, 136, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2017.08.004>

Schlitzer, Reiner, Ocean Data View, [odv.awi.de](http://odv.awi.de), 2021

Siani, G., Michel, E., de Pol-Holz, R., Devries, T., Lamy, F., Carel, M., Isguder, G., Dewilde, F., & Lourantou, A. (2013). Carbon isotope records reveal precise timing of enhanced Southern Ocean upwelling during the last deglaciation. *Nature Communications*, 4(May), 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms3758>

Silva, N., Rojas, N., & Fedele, A. (2009). Water masses in the Humboldt Current System: Properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(16), 1004–1020. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.013>

- Strub, P. T., James, C., Montecino, V., Rutllant, J. A., & Blanco, J. L. (2019). Ocean circulation along the southern Chile transition region (38°–46°S): Mean, seasonal and interannual variability, with a focus on 2014–2016. *Progress in Oceanography*, 172, 159–198. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.01.004>
- Strub, P. T., Mesías, M. J., Montecino, V., Rutllant, J., & Salinas, S. (1998). Coastal ocean circulation off western South America coastal segment. In *The Sea* (Vol. 11, pp. 273–313).
- Stuiver, M., & Polach, H. A. (1977). Discussion Reporting of 14 C Data . *Radiocarbon*, 19(3), 355–363. <https://doi.org/10.1017/s0033822200003672>
- Sweng, M. M., Reagan, J. R., Seidov, D., Boyer, T. P., Locarni, R. A., Garcia, H. E., Mishonov, A. V., Baranova, O. K., Weathers, K. W., Paver, C. R., & Smolyar, I. V. (2019). *World Ocean Atlas 2018, Volume 2: Salinity* (A. Mishonov, Ed.). <http://www.nodc.noaa.gov/>
- Therón, R., Paillard, D., Cortijo, E., Flores, J.-A., Vaquero, M., Sierro, F. J., Waelbroeck, C., & Vaquero, M. (2004). *Rapid reconstruction of paleoenvironmental features using a new multiplatform program*. 50(4), 391–395. <https://doi.org/10.2113/50.4.391i>
- Toggweiler, J. R., Russell, J. L., & Carson, S. R. (2006). Midlatitude westerlies, atmospheric CO<sub>2</sub>, and climate change during the ice ages. *Paleoceanography*, 21(2), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2005PA001154>
- Tomas, C. (1998). Identifying marine phytoplankton. In *Choice Reviews Online* (Vol. 35, Issue 06). <https://doi.org/10.5860/choice.35-3284>
- Verleye, T. J., & Louwye, S. (2010). Late Quaternary environmental changes and latitudinal shifts of the Antarctic Circumpolar Current as recorded by dinoflagellate cysts from offshore Chile (41°S). *Quaternary Science Reviews*, 29(7–8), 1025–1039. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.01.009>
- Wilks, J. v., & Armand, L. K. (2017). Diversity and taxonomic identification of *Shionodiscus* spp. in the Australian sector of the Subantarctic Zone. *Diatom Research*, 32(3), 295–307. <https://doi.org/10.1080/0269249X.2017.1365015>
- Zielinski, U., & Gersonde, R. (1997). Diatom distribution in Southern Ocean surface sediments (Atlantic sector): Implications for paleoenvironmental reconstructions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 129(3–4), 213–250. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(96\)00130-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(96)00130-7)





## Chapitre 5: Reconstitution des conditions climatiques et hydrologiques dans les eaux de surface du SEP depuis la dernière période glaciaire à partir des assemblages de diatomées

### 5.1. Données nouvelles discutées dans le chapitre

Dans ce chapitre, je vais décrire les résultats de l'abondance des diatomées des 2 autres carottes étudiées au cours de ma thèse, MD07-3100 et MD07-3088 localisées plus au nord dans le SEP à 46° S et 41° S respectivement. Dans la première partie, je présenterai l'abondance totale des diatomées, puis je décrirai les principaux taxons de diatomées qui composent chaque groupe écologique selon les critères écologiques présentées au chapitre 3. Je présenterai également les résultats de l'analyse en composantes principales pour chaque carotte afin d'identifier les espèces ou groupes d'espèces qui varient conjointement dans chaque période climatique. Ces résultats complémentaires sur un transect nord-sud entre 41° S et 49° S me permettent de discriminer les influences locales et régionales sur l'évolution des assemblages de diatomées. Enfin, je discuterai les éventuels changements hydrologiques mis en évidence par les assemblages de diatomées.

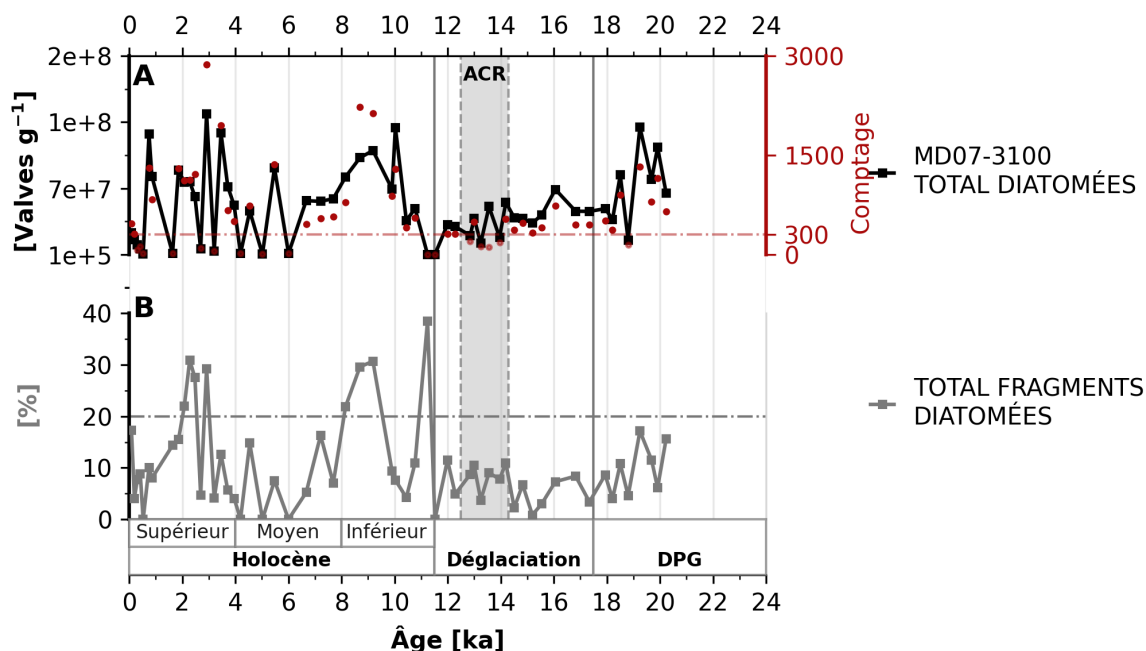
### 5.2. Abondance et assemblages des diatomées dans la carotte MD07-3100

Pour la carotte MD07-3100 j'ai analysé 58 échantillons, dont 51 d'entre eux présentent plus de 50 valves de diatomées (**Figure 5.1-A**). Le comptage de diatomées m'a permis d'en identifier de 2 à 2.874 valves par échantillon. Le plus faible nombre de diatomées est observés au début de l'Holocène à 11.5 ka (2 valves), 11.2 ka (2 valves), et à l'Holocène moyen après 6 ka (17 valves ; 5 ka, 6 valves ; 4.2 ka, 14 valves ; 1.6 ka, 13 valves et 0.5 ka, 12 valves) (**Figure 5.1-A**).

L'abondance totale des diatomées dans la carotte MD07-3100 a varié d'un minimum de  $1.1 \times 10^5$  (11.5 ka) à un maximum de  $1.4 \times 10^8$  (2.9 ka) valves  $g^{-1}$ . De la fin de la dernière période glaciaire au début de l'Holocène, on observe une abondance décroissante de  $1.3 \times 10^8$  à  $2.8 \times 10^7$  valves  $g^{-1}$ . De 11 à 6.5 ka l'abondance reste élevée, et ensuite, les abondances varient entre  $\sim 0$  et  $1.4 \times 10^8$  valves  $g^{-1}$  (**Figure 5.1-A**).

Le pourcentage total de fragments de diatomées présente des valeurs supérieures à 20 % au cours de l'Holocène inférieur à  $\sim 11.2$  ka et entre 9.9 et 8.2 ka et pendant l'Holocène supérieur entre 2.9 ka et 2.1 ka (**Figure 5.1-B**).





**Figure 5.1** A) Abondance totale (valves  $g^{-1}$ ) et comptage total des diatomées (points rouges) et B) pourcentage total des fragments de diatomées comptés dans la carotte MD07-3100. (Comprend les 58 échantillons analysés, Annexe 5-A).

Le nombre total de taxons de diatomées identifiés dans la carotte MD07-3100 était de 77 espèces. Par la suite, je ne montre les figures que pour les principaux taxons de diatomées qui présentent un pourcentage supérieur à 2 % et je décrirai uniquement les pourcentages et leurs variations dont l'erreur associée est inférieure au pourcentage. Les espèces qui présentent des pourcentages de plus de 10 % sont significatifs à partir d'un minimum de 50 valves déterminées (Patterson et Fishbein, 1989). Les figures comprennent donc les niveaux où j'ai pu compter plus de 50 valves. Les variations des pourcentages sont présentées sur la **Figure 5.2** pour les espèces ou groupes CRS, *Thalassionema nitzschioides* var. *nitzschioides*, *Skeletonema costatum*, *Paralia sulcata*, *Cocconeis* spp. group, Pennate spp. benthic, *Thalassiosira eccentrica*, *Thalassiosira pacifica*, *Thalassiosira angulata*, *Shionodiscus oestrupii*, *Nitzschia bicapitata* et *Shionodiscus* groupe (*Shionodiscus frenguelli* + *Shionodiscus trifultus*). Ces espèces seront regroupées en fonction des caractéristiques écologiques présentées au chapitre 3.

### 5.2.1. Groupe Nutriments abondants

Trois diatomées font partie du groupe nommé « Nutriments abondants ». *Chaetoceros* spp. **resting spores** est le taxon de diatomées le plus abondant dans la carotte MD07-3100 avec un pourcentage de ~75 %. Entre 14.8 et 12 ka, on observe une légère diminution des pourcentages

de CRS. A l'Holocène supérieur, un déclin marqué ( $\leq 40\%$ ) est observé à deux reprises et depuis  $\sim 0.4$  ka, périodes où les CRS sont remplacées par des *P. sulcata* (**Figure 5.2-F**).

*Thalassionema nitzschioides var. nitzschioides* est présent à partir de la déglaciation entre 15.5 et 14.8 ka, avec un pourcentage d'environ 16%. Une diminution drastique jusqu'à 1 % est observé depuis le début de l'ACR jusqu'à la fin de la déglaciation. Une nouvelle augmentation du pourcentage de *T. nitzschioides var. nitzschioides* est observé entre 9.2 et 8.2 ka ( $\sim 9\%$ ) avant de diminuer progressivement jusqu'à  $\sim 2\%$  à 7.7 ka. Enfin, au cours de l'Holocène supérieur des pourcentages de moins de  $\sim 3\%$  sont retrouvés à partir de 4 ka (**Figure 5.2-G**).

*Skeletonema costatum* est ponctuellement présente au cours de l'Holocène entre 10 et 7.5 ka, et à 4 ka ( $\leq 2\%$ ) (**Figure 5.2-H**).

### 5.2.2. Groupe Planctonique-côtier

Le taxon de diatomées appartenant au groupe planctonique-côtier est représenté dans la carotte MD07-3100 par *Thalassiosira eccentrica* et *Thalassiosira pacifica*.

*Thalassiosira eccentrica* présente des pourcentages  $>10\%$  entre 19 à 17.5 ka à la fin de la dernière période glaciaire et  $\sim 15\%$  de 14.2 à 10.4 ka entre l'ACR et l'Holocène inférieur. Enfin, depuis l'Holocène moyen et supérieur, les pourcentages voisinent 5 % (**Figure 5.2-I**).

*Thalassiosira pacifica* ne présente qu'un seul pourcentage  $>2\%$  significatif à 10.8 ka (**Figure 5.2-J**).

### 5.2.3. Groupe Benthique-côtier

Le groupe de diatomées ayant comme préférence écologique le milieu « benthique côtier » est représenté dans la carotte MD07-3100 par *Paralia sulcata*, *Cocconeis* spp. group et les Pennate spp. benthic.

*Paralia sulcata* est présente à partir de l'Holocène moyen,  $\sim 6.7$  ka, le pourcentage de cette espèce augmente progressivement jusqu'à  $\sim 7\%$ , puis, jusqu'à devenir majoritaire (50-70 %) à plusieurs reprises pendant l'Holocène supérieur (**Figure 5.2-L**).

*Cocconeis* spp group se caractérise par des pourcentages sensiblement plus faibles avec une brève apparition au début de la déglaciation. Ensuite, au cours de l'Holocène supérieur, elle est

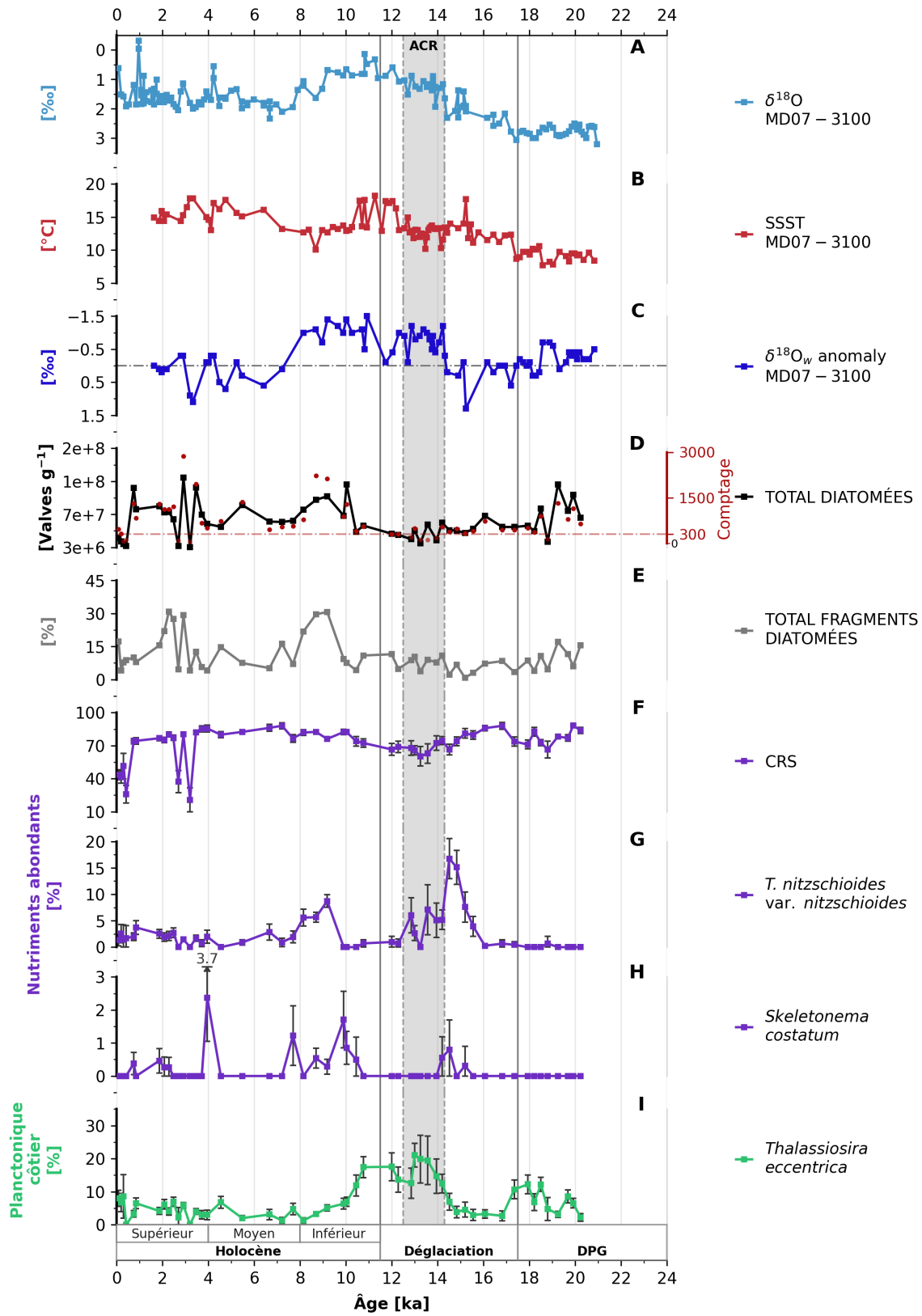
présente aux mêmes périodes que *P. sulcata* mais avec des pourcentages non significatifs (**Figure 5.2-M**).

Sont regroupées sous le terme de Pennates spp. benthic les espèces euryhalines. Elles présentent de même un faible pourcentage au début de la déglaciation à 17.3 ka et un autre pourcentage significatif vers la fin de l'Holocène supérieur (**Figure 5.2-N**).

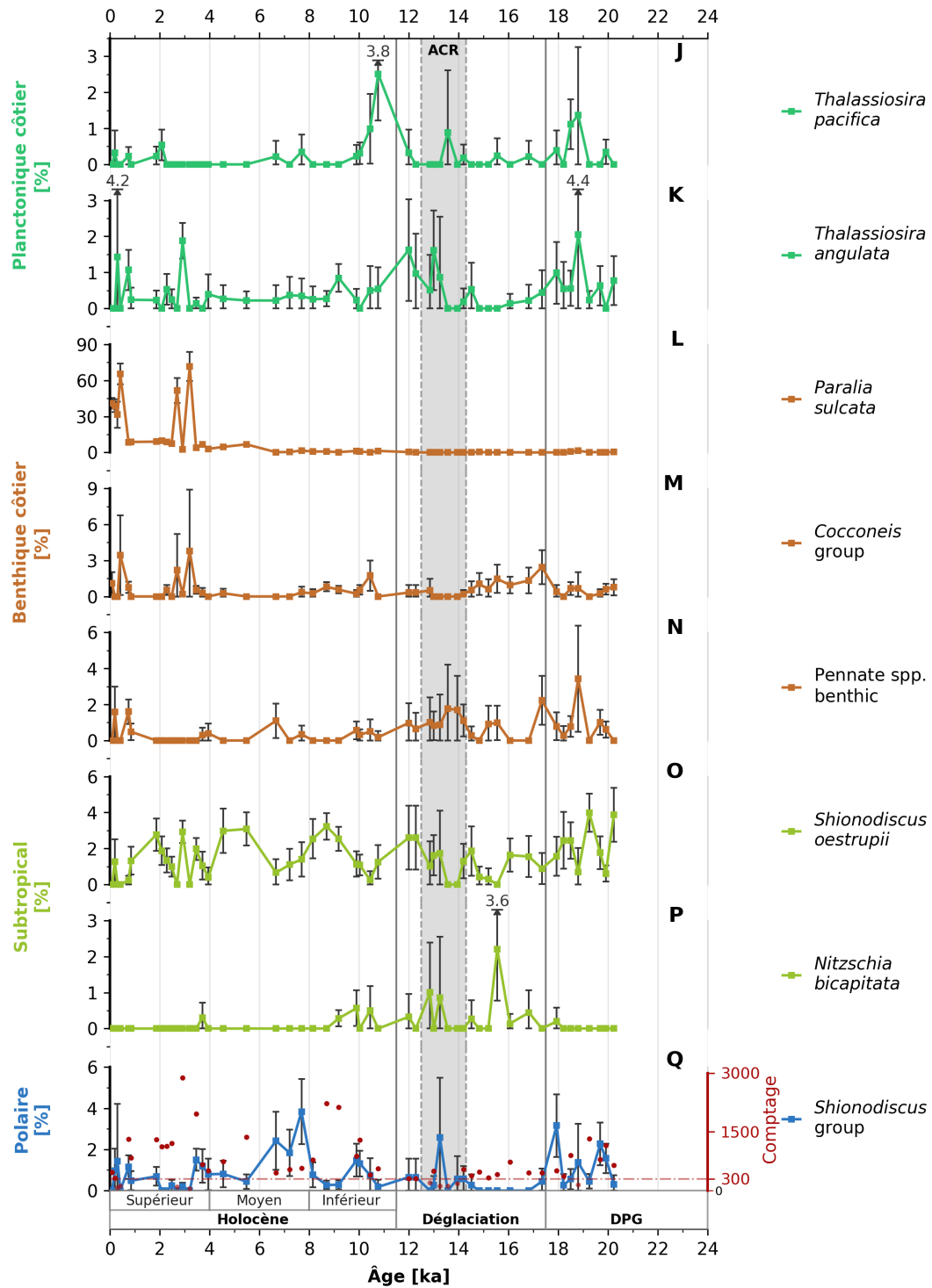
#### **5.2.4. Groupe Subtropical**

*Shionodiscus oestrupii* et *Shionodiscus group* regroupent les rares espèces du groupe Subantarctique dans la carotte MD07-3100 avec des pourcentages qui varient entre 0 et 4% au cours des derniers 20 ka. En moyenne, leur présence est plus importante lors de la dernière période glaciaire et de l'Holocène par rapport à la déglaciation entre 16 et 14 ka. A l'Holocène inférieur et moyen les pourcentages de *Shionodiscus group* alternent avec ceux de *Shionodiscus oestrupii* et atteignent 2 à 4% entre 6 et 8 ka (**Figure 5.2- O-Q**).

*Nitzschia bicapitata* ne présente qu'une seule fois un pourcentage de  $\geq 2$  % significatif à 15.6 ka (**Figure 5.2-P**).



(Suite à la page suivante)



**Figure 5.2** Enregistrements pour la carotte sédimentaire MD07-3100 depuis la dernière période glaciaire jusqu'à l'Holocène supérieur. **A)** Composition isotopique de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) mesurées sur *G. bulloides* d'après Haddam et al., (2018) ; **B)** Reconstruction des températures d'été des eaux de surface (SSST) d'après Haddam et al., (2018) ; **C)** Anomalie de la composition isotopique de l'oxygène de l'eau de surface ( $\delta^{18}\text{O}_w$ ) calculés à partir des SSST et du  $\delta^{18}\text{O}$  *G. bulloides* d'après Haddam et al, (2018) ; **D)** Abondance totale de diatomées (valves  $\text{g}^{-1}$ ), les cercles rouges indiquent le nombre total de diatomées comptées ; **E)** Pourcentage de fragments de diatomées; **F-Q)** Pourcentage des espèces de diatomées. Ce graphique montre les comptages au-dessus de 50 valves. Pour les comptages totaux, voir l'Annexe 6 Figure 6-A.

### 5.2.5. Résultats de l'analyse en composantes principales de l'assemblage des diatomées de la carotte MD07-3100

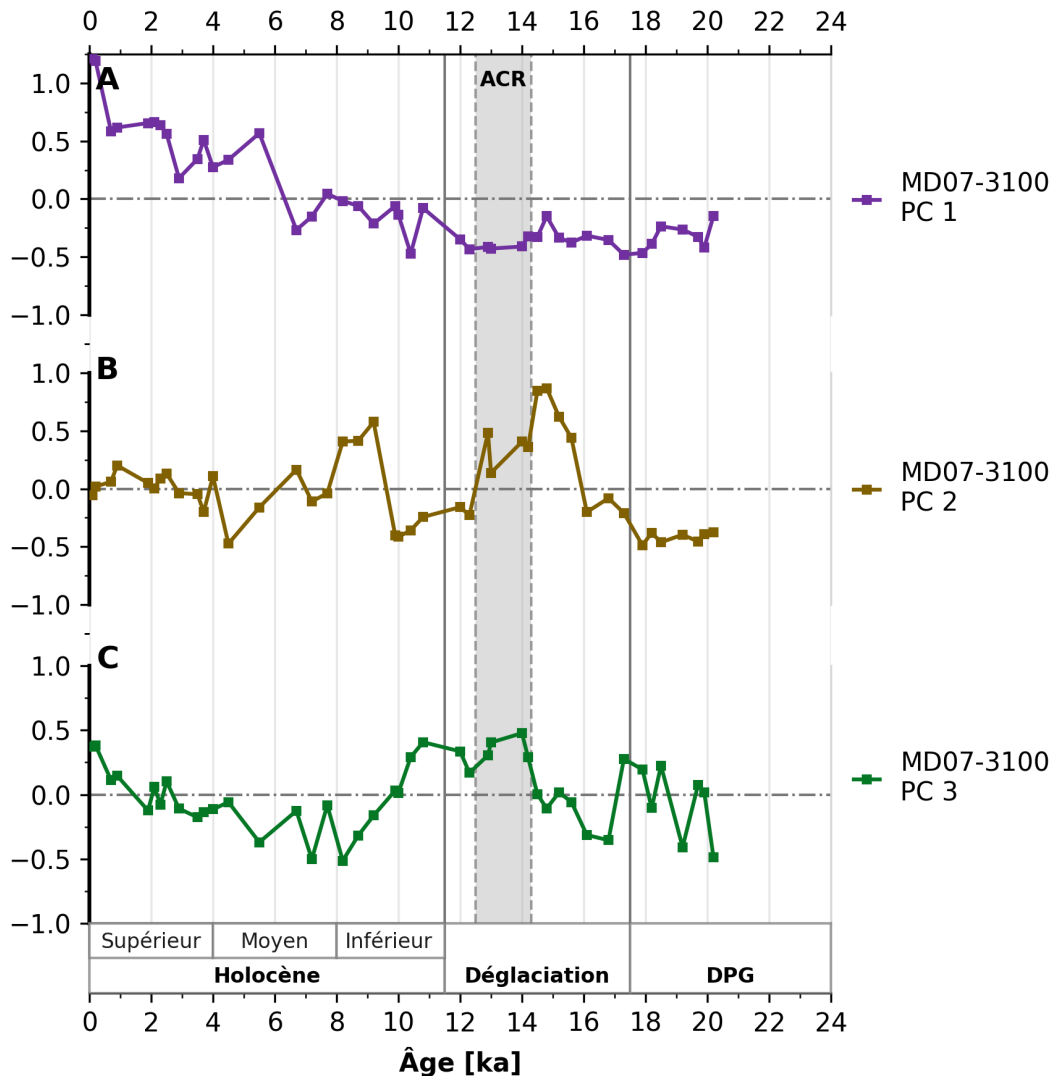
L'analyse en composantes principales a été réalisée à partir des 11 taxons de diatomées présents au moins une fois dans les assemblages avec des valeurs supérieures à 2 % s et dans les échantillons où plus de 150 valves ont été comptées.

Les résultats de l'ACP de la carotte MD07-3100 ont permis de mettre en lumière une organisation des assemblages en trois pôles majeurs. Ces 3 premières composantes (PC) expliquent 76.9 % de la variance totale des données (PC1 : 39.4 % ; PC2 : 24.2 % et PC3 : 13.1 %) (**Table 5.1** et **Figure 5.3**).

La première composante PC1 correspond à 39.4 % de la variance des données et est principalement représentée par l'espèce *P. sulcata*. La deuxième composante PC2 (24.4 % de la variance) est représentée par *T. nitzschioides* var. *nitzschioides* et la troisième composante PC3 (13.1 % de la variance) est représentée par *T. eccentrica* et Pennate spp. benthic dans sa composante positive et *S. oestrupii* dans sa composante négative.

**Table 5.1** Résultats de l'ACP pour la carotte MD07-3100. Les scores supérieurs à |0,2| sont indiqués en gras.

Species	PC 1 (39.4%)	PC 2 (24.4%)	PC 3 (13.1%)
<i>Chaetoceros</i> resting spores	-0.06	-0.02	-0.15
<i>Cocconeis</i> spp. group	-0.08	0.02	0.00
<i>Nitzschia bicapitata</i>	-0.06	0.05	0.03
<i>Paralia sulcata</i>	<b>0.98</b>	-0.08	0.15
Pennate spp. benthique	-0.09	0.01	<b>0.37</b>
<i>Shionodiscus</i> group	-0.03	-0.19	-0.03
<i>Shionodiscus oestrupii</i>	-0.01	-0.15	<b>-0.30</b>
<i>Skeletonema costatum</i>	0.02	0.04	-0.01
<i>T. nitzschioides</i> var. <i>nitzschioides</i>	0.06	<b>0.95</b>	0.05
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	-0.15	-0.10	<b>0.83</b>
<i>Thalassiosira pacifica</i>	-0.02	-0.09	0.16



**Figure 5.3** Graphique des composantes principales (PC1, PC2 et PC3) en fonction de l'âge dans la carotte MD07-3100.

### 5.2.6. Synthèse de principaux résultats de la carotte MD07-3100

L'assemblage de diatomées de la carotte MD07-3100 ne montre presque aucune présence d'espèces du groupe polaire, telles que *F. kerguelensis* (moins de 1 %), *E. antarctica* (0 %) et *A. tabularis* (0 %). De même, les espèces du groupe Subtropical, tels que *S. oestrupii*, ne dépassent pas 5 % de l'assemblage. En revanche, les espèces benthiques côtières telles que *P. sulcata*, *Cocconeis* spp. group et *Pennate* spp. benthic et les espèces planctoniques côtières telles que *T. eccentrica* ont une contribution plus élevée de la déglaciation à l'Holocène. Le PC1 (39,4 % de la variance des données) est représenté par l'espèce *P. sulcata*, dont le pourcentage augmente à partir de 6 ka suggérant la mise en place d'un fort courant la transportant depuis la marge continentale jusqu'à la zone océanique (Romero & Hebbeln, 2003). Par ailleurs, plusieurs événements de transport de cette espèce ont lieu pendant

l'Holocène supérieur, et particulièrement pour les niveaux les plus récents, qui pourraient être soit une conséquence d'accélération du courant sur la plateforme continentale, et/ou des événements, potentiellement conséquence de séismes ou éruptions, qui déstabiliserait les sédiments fins de la plateforme.

Les espèces caractéristiques de la PC2 (*T. nitzschioides* var. *nitzschioides*) et de la PC3 (*T. eccentrica*) sont associés à la présence de nutriments (Romero & Hebbeln, 2003; Abrantes et al., 2007). CRS est le taxon majoritaire sur presque l'ensemble de l'enregistrement de la carotte MD07-3100 indiquant sur toute la période étudiée une forte concentration d'éléments nutritifs.

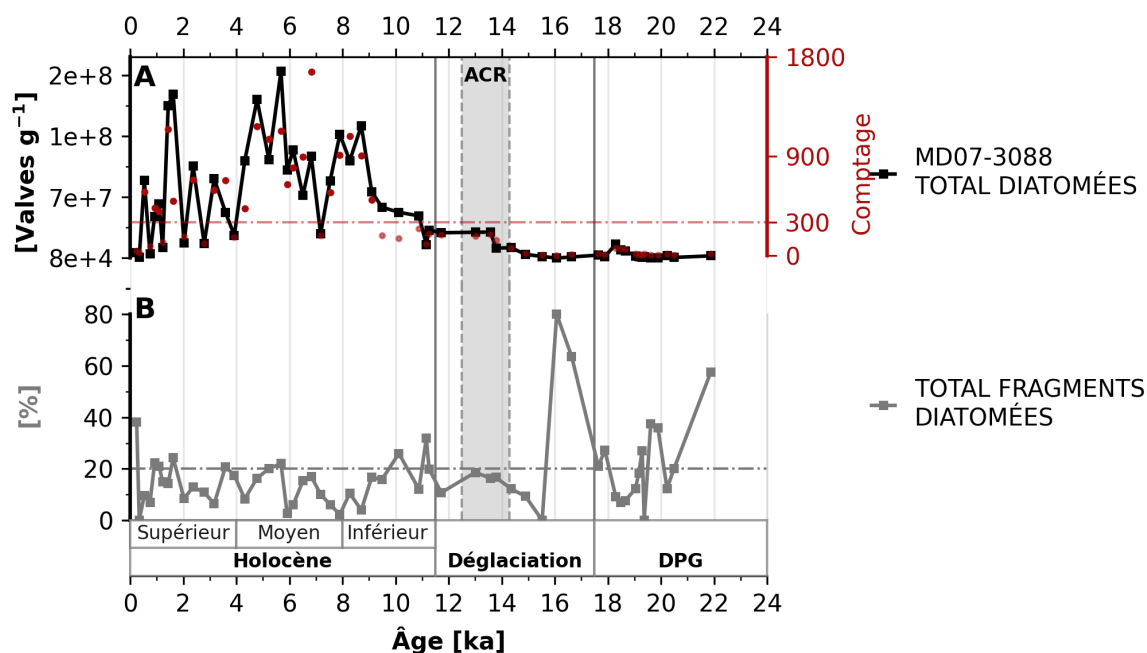
Au cours de la déglaciation, de 16 ka et jusqu'au début de l'ACR, la présence de *T. nitzschioides* var. *nitzschioides* et *S. costatum* indique une plus forte concentration de macronutriments comme indiqué également par la PC2. A partir de l'ACR et jusqu'à environ 9 ka cette association ainsi que les CRS décroissent au profit de *T. eccentrica* comme souligné par la PC3. Une étude réalisée par Avaria et al., (2004) entre la zone des fjords, les chenaux et la zone océanique adjacente entre 43° et 46° S, montre que les abondances les plus élevées de *T. eccentrica* sont associées à une salinité de 32.9 psu, à des concentrations de phosphate plus élevées et de nitrate plus faible. Par conséquent, les salinités de 32.9 psu et l'apport de Fe du continent pourraient favoriser la croissance de *T. eccentrica* par rapport aux espèces du groupe des nutriments abondants. Ces changements d'espèces à partir de l'ACR sont synchrones des anomalies du  $\delta^{18}\text{O}_w$  qui indiquent un apport d'eau douce accru induisant une baisse en salinité des eaux de surface et de micronutriments depuis le continent (**Figure 5.2-C**).

Il est intéressant de signaler que pour 2 niveaux où très peu de valves sont présentes, j'ai pu identifier deux espèces de diatomées d'eau douce. A 11.5 ka, les deux valves observées correspondent aux espèces *A. granulata* et *Cyclostephanus* sp. Ces deux diatomées se développent dans l'eau douce, elles ont donc été transportées depuis les rivières Petrohué et/ou Cochamo qui se déversent dans l'estuaire Relocavi. Pour l'autre niveau, daté à 4.2 ka, les 14 valves observées sont des CRS (4), des *A. granulata* (4) qui est une diatomée d'eau douce, des *Cyclotella litoralis* (2), espèce côtière euryhaline. Le reste de l'assemblage est aussi représenté par des diatomées benthiques *Cocconeis* spp. group (2) et *P. sulcata* (2). Ces assemblages indiquent un événement de transport de diatomées depuis les rivières et l'estuaire Reloncavi.



### 5.3. Abondance des diatomées dans la carotte MD07-3088

57 échantillons ont été analysés dans la carotte MD07-3088, dont 40 présentent un comptage de plus de 50 valves. L'abondance des diatomées est faible pendant le glaciaire et la première moitié de la déglaciation avec une valeur de  $7.6 \times 10^4$  valves par gramme de sédiment sec. Les abondances sont plus élevées pendant l'Holocène, particulièrement entre 9 et 4.5 ka (**Figure 5.4**).



**Figure 5.4 A)** Abondance totale des diatomées (valves g<sup>-1</sup>) et comptage total des diatomées (points rouges) et **B)** pourcentage total des fragments de diatomées comptés dans la carotte MD07-3088 (inclut les 57 échantillons analysés, **Annexe 5-B**).

Un pourcentage élevé de fragments de diatomées a été observé pendant la dernière période glaciaire (entre 50 et 20 %) et le début de la déglaciation (80 %). Ces périodes correspondent aussi au plus petit nombre de diatomées comptées dans la carotte MD07-3088. Depuis 15 ka le pourcentage de fragments est souvent inférieur à 20 % (**Figure 5.4-B**).

Un total de 64 taxons de diatomées a été identifié, dont 13 espèces ont montré une abondance de plus de 2 % dans au moins un échantillon qui présente un comptage de plus de 150 valves. Seront décrits ci-dessous les taxons suivants : CRS, *T. nitzschioides* var. *nitzschioides*, *P. sulcata*, *Cocconeis* spp. group, *A. senarius*, *T. eccentrica*, *T. angulata*, *D. brightwellii*, *S. oestrupii*, *F. doliolus*, *A. tabularis*, *F. kerguelensis* et *Shionodiscus* group. Je n'ai pas pris en compte *Thalassiothrix* spp. bien qu'elle soit présente parfois à plus de 2 % parce que j'ai regroupé 2 espèces d'écologie différentes. *Thalassiothrix* spp. n'est jamais présent à plus de ~5

%. Ces espèces seront classées selon les informations présentées au chapitre 3 et décrivent la période entre la fin de la déglaciation et l'Holocène.

### 5.3.1. Groupe Nutriments abondants

CRS et *T. nitzschioides* var. *nitzschioides* font partie des taxons représentatifs du groupe « Nutriments abondants ».

CRS présente le plus grand pourcentage tout le long de la carotte MD07-3088. Dans la partie finale de la déglaciation, entre 13.6 et 11.7 ka, on observe une diminution graduelle de ~63 à ~40 %. Cette tendance est suivie par une augmentation de CRS de l'Holocène inférieur vers 9.1 ka avec des valeurs se stabilisant entre 70 et 80 % tout le long de l'Holocène moyen. A partir de l'Holocène supérieur les pourcentages diminuent à plusieurs reprises, au profit de l'espèce *P. sulcata*. (**Figure 5.5-F**).

*T. nitzschioides* var. *nitzschioides* montre les plus forts pourcentages juste avant l'ACR (~15 %) puis à l'Holocène inférieur entre 10.5 et 8 ka (~11 %). Des valeurs plus faibles ne dépassant pas ~7 % sont observés à la fin de la déglaciation (13-11.7 ka) et au cours de l'Holocène moyen et supérieur (**Figure 5.5-G**).

### 5.3.2. Groupe Planctonique-côtier

*Thalassiosira eccentrica* est le taxon représentant le groupe planctonique-côtier avec des pourcentages significatifs. A la fin de la déglaciation, *T. eccentrica* présente un pourcentage de ~20 % avec un maximum de 27 % à 13 ka. Par la suite, au cours de l'Holocène inférieur, entre 10.9 et 10.1 ka, les pourcentages augmentent jusqu'à ~32 %, avant de diminuer à 3 % entre 9.5 et 8.7 ka. Pendant l'Holocène moyen, son incidence varie entre 3 et 8 % avec un pourcentage maximal à 7.2 ka de ~16 %. A l'Holocène supérieur, les pourcentages de *T. eccentrica* varient autour de 10 % avec un pic à 28 % à 1.2 ka (**Figure 5.5-H**).

### 5.3.3. Groupe Benthique-côtier

*Paralia sulcata* est le seul taxon appartenant au groupe benthique-côtier et présentant des pourcentages significatifs dans la carotte MD07-3088. Depuis la fin de la déglaciation au début de l'Holocène, des pourcentages de moins de ~2 % ont été observés avec un maxima de ~7 % à 9.5 ka. Pendant l'Holocène moyen, les valeurs se stabilisent entre ~2 et ~5 % avec des pics d'abondance à 7.9 ka (6 %) et 7.2 ka (15 %). Enfin, à l'Holocène supérieur les pourcentages

augmentent à plusieurs reprises et l'espèce devient même majoritaire à ~0.8 ka (**Figure 5.5-K**).

#### **5.3.4. Groupe Subtropical**

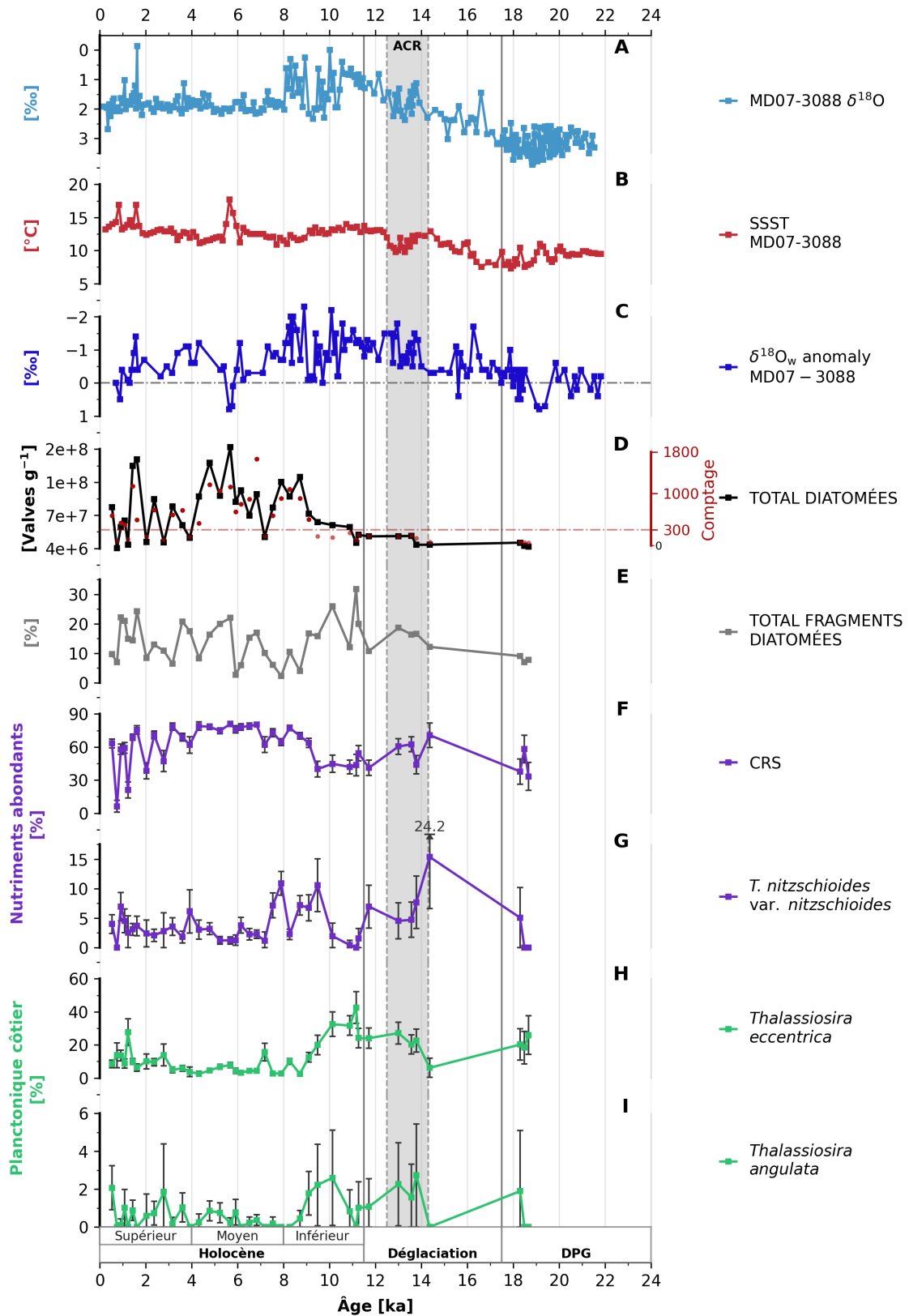
Trois taxons font partie du groupe Subtropical : *F. doliolus*, *S. oestrupii*, et *A. tabularis*.

*Fragilariopsis doliolus* : présente peu de pourcentages significatifs, avec une valeur maximale à la fin de la déglaciation à 11.7 ka de 4 %, à l'Holocène inférieur ~9 ka, 2 %, puis à l'Holocène moyen entre 6 et 5 ka (**Figure 5.5-O**).

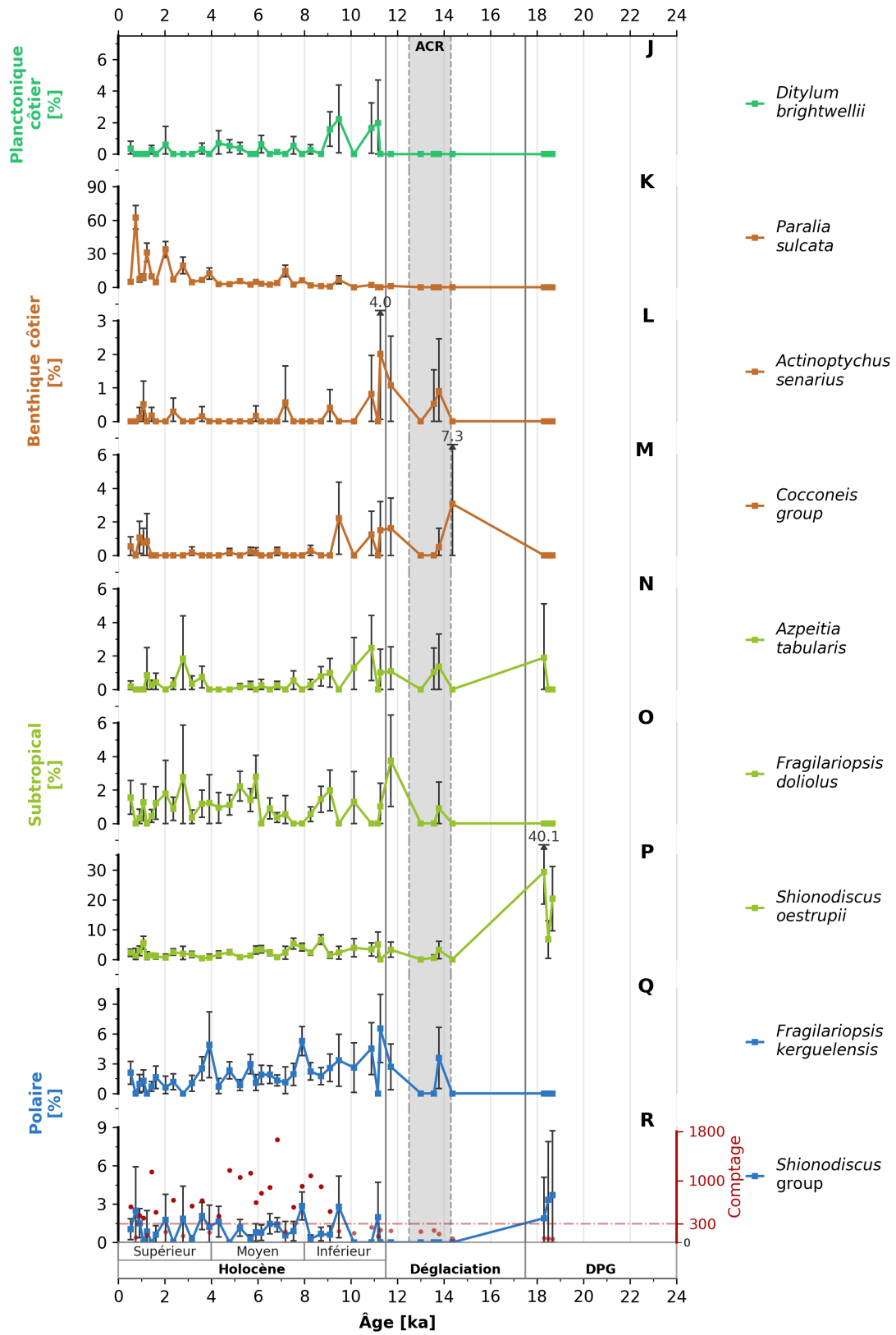
*Shionodiscus oestrupii* présente des pourcentages élevés pour l'océan austral pendant la dernière période glaciaire (20-30%). Ils oscillent ensuite entre 0 et 3 % sur la déglaciation et l'Holocène avec des valeurs maximales à l'Holocène inférieur à 10.1 et 8.7 ka de 4 et 7 %, au début de l'Holocène moyen à 7.9 ka (4 %) et 7.5 ka (5 %) et au cours de l'Holocène supérieur à 1.1 ka (6 %) (**Figure 5.5-P**).

#### **5.3.5. Groupe Polaire**

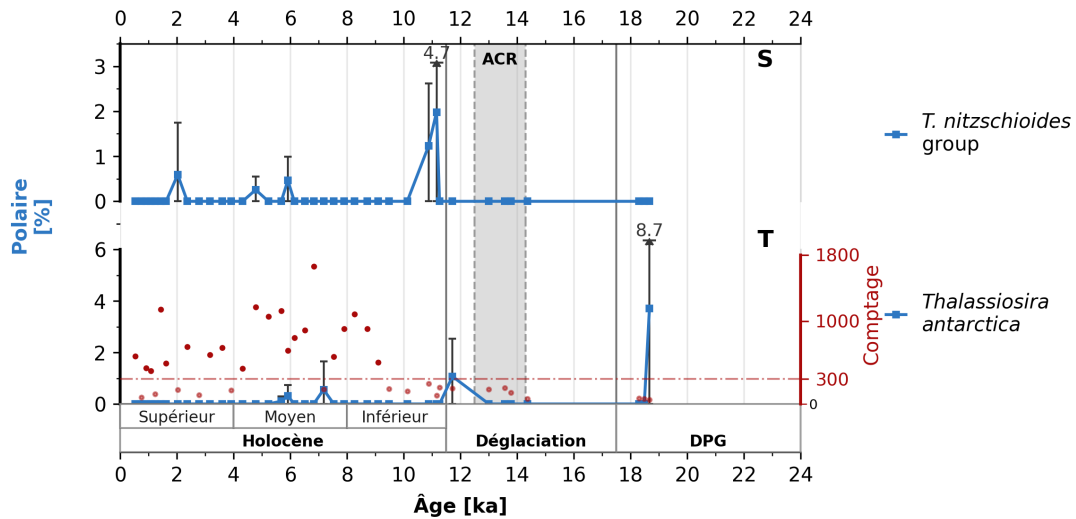
L'espèce *Fragilariopsis kerguelensis* est présente au début de l'Holocène jusqu'à ~8 ka avec un pourcentage maximum de 7 %. Un deuxième pic est observé à 4-3.5 ka (maximum à 5%) (**Figure 5.5-Q**). Les *Shionodiscus group* ne sont observés avec des pourcentages significatifs qu'à ~8 ka et autour de 4 ka (**Figure 5.5-R**).



(Suite à la page suivante)



(Suite à la page suivante)



**Figure 5.5.** Enregistrements pour la carotte sédimentaire MD07-3088 depuis la déglaciation jusqu'à l'Holocène supérieur. **A)** Composition isotopique de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) mesurées sur *G. bulloides* d'après Haddam et al., (2018) ; **B)** Reconstruction des températures d'été des eaux de surface (SSST) d'après Haddam et al., (2018) ; **C)** Anomalie de la composition isotopique de l'oxygène de l'eau de surface ( $\delta^{18}\text{O}_w$ ) calculés à partir des SSST et du  $\delta^{18}\text{O}_{G.bulloides}$  d'après Haddam et al, (2018) ; **D)** Abondance totale de diatomées (valves  $\text{g}^{-1}$ ), les cercles rouges indiquent le nombre total de diatomées comptées ; **E)** Pourcentage de fragments totaux de diatomées ; **F–T)** : Pourcentages des espèces de diatomées présentes dans la carotte MD07-3088. Ce graphique ne présente que les comptages effectués au-dessus de 50 valves. Pour les comptages totaux, voir l'Annexe 6 Figure 6-B.

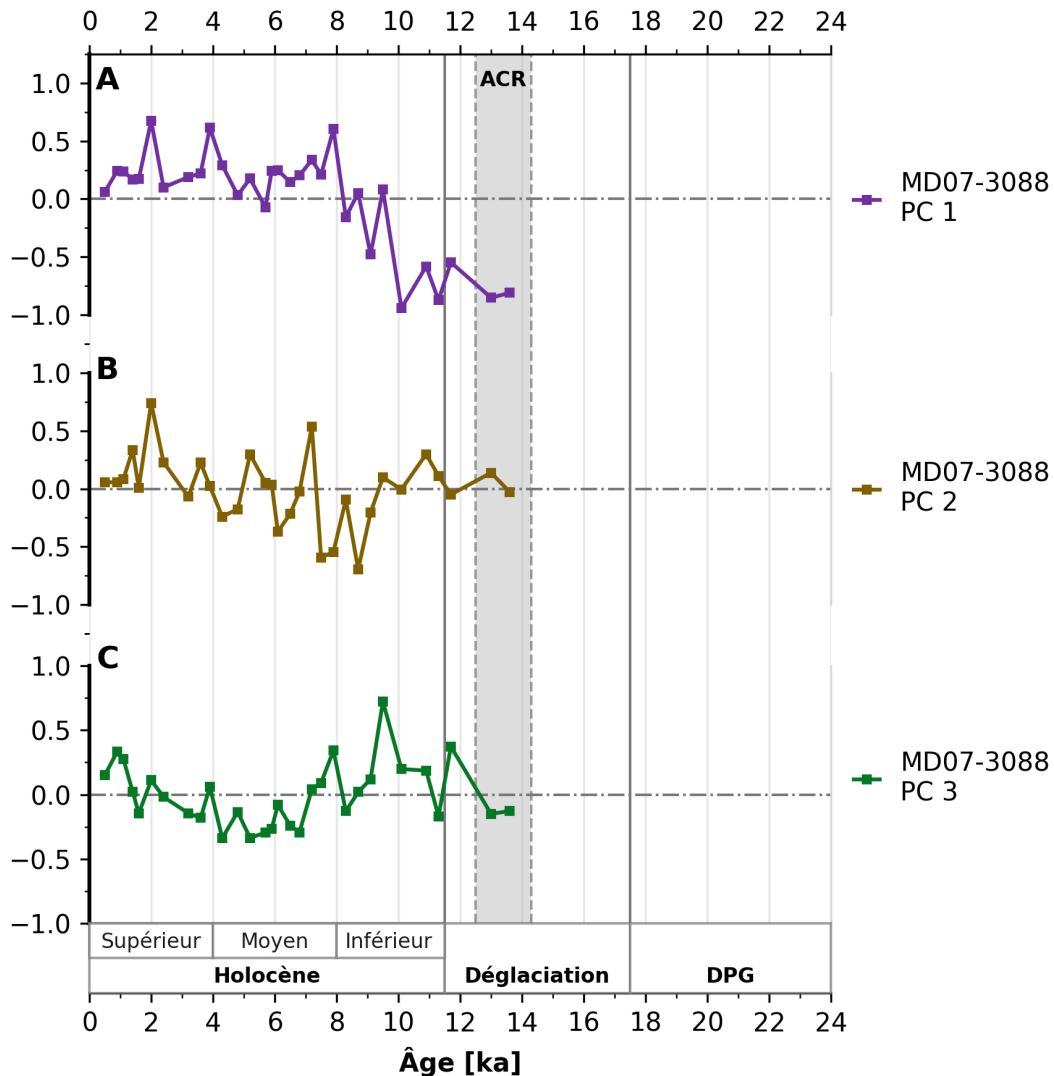
### 5.3.6. Résultats de l'analyse en composantes principales de l'assemblage des diatomées de la carotte MD07-3088

L'analyse en composantes principales des assemblages de diatomées de la carotte MD07-3088 porte sur la période entre la fin de la déglaciation et l'Holocène soit entre 13.2 et 0.5 ka. L'ACP comprend les espèces dont l'abondance est supérieure à 2 % soit CRS, *T. nitzschioides* var. *nitzschioides*, *P. sulcata*, *T. eccentrica*, *T. angulata*, *S. oestrupii*, *F. doliolus*, *A. tabularis*, *F. kerguelensis* et *Shionodiscus* group. Les résultats indiquent que les trois premières composantes de l'ACP correspondent à 68 % de la variance totale des espèces de diatomées (PC1 : 38.2 % ; PC2 : 17.9 % et PC3 : 11.9 %) (**Table 5.2**).

La PC1 (38.2 % de la variance) est représentée dans sa composante positive par l'espèce *P. sulcata* et par les espèces *T. eccentrica*, *T. angulata* et *A. tabularis* qui présentent les valeurs négatives les plus élevées. La PC2 (17.9 % de la variance) est représentée par les espèces *P. sulcata* et *T. eccentrica* dans sa composante positive et par *T. nitzschioides* var. *nitzschioides* et *S. oestrupii* dans la composante négative. Les valeurs positives de PC3 (11.9 %) correspondent aux espèces *T. nitzschioides* var. *nitzschioides*, *T. eccentrica*, *S. oestrupii*, *F. kerguelensis*, *P. sulcata* et *T. angulata* et la valeur négative la plus élevée est observée dans les taxons CRS.

**Table 5.2** Résultats de l'ACP pour la carotte MD07-3088. Les scores supérieurs à |0,2| sont indiqués en gras.

Espèce	PC1 (38.2 %)	PC2 (17.9 %)	PC3 (11.9 %)
<i>Azpeitia tabularis</i>	<b>-0.22</b>	-0.04	0.06
<i>Chaetoceros</i> resting spores	0.07	-0.13	<b>-0.28</b>
<i>Fragilariopsis doliolus</i>	0.01	0.11	-0.12
<i>Fragilariopsis kerguelensis</i>	-0.01	-0.17	<b>0.28</b>
<i>Paralia sulcata</i>	<b>0.73</b>	<b>0.55</b>	<b>0.28</b>
<i>Shionodiscus</i> group	0.28	-0.08	0.12
<i>Shionodiscus oestrupii</i>	0.10	<b>-0.38</b>	<b>0.42</b>
<i>T. nitzschioides</i> var. <i>nitzschioides</i>	0.08	<b>-0.42</b>	<b>0.55</b>
<i>Thalassiosira angulata</i>	<b>-0.25</b>	0.13	<b>0.20</b>
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	<b>-0.51</b>	<b>0.54</b>	<b>0.46</b>



**Figure 5.6** Graphique des composantes principales des assemblages de diatomées (PC1, PC2 et PC3) en fonction de l'âge de la carotte MD07-3088.

### 5.3.7. Synthèse des principaux résultats de la carotte MD07-3088

L'assemblage de diatomées de la carotte MD07-3088 montre la présence de quelques espèces du groupe polaire de l'océan ouvert qui présentent leur maximum de pourcentage au début de l'Holocène avec pour taxon principal *F. kerguelensis* (~6 %). Hors *S. oestrupii*, toutes les espèces du groupe subtropical sont surtout présentes à l'Holocène inférieur pendant lequel la somme de leur pourcentage atteint 10 à 13%. *S. oestrupii* montre des pourcentages significativement plus élevés pendant la période glaciaire pour 2 niveaux où plus de 50 valves ont été déterminées. Il a été proposé dans le chapitre 4 qu'un pourcentage de cette espèce plus élevé que ce qui est observé actuellement dans l'océan austral soit possible grâce aux salinités moyennes plus élevées de l'océan glaciaire. Ces 3 niveaux correspondent à des anomalies positives de  $\delta^{18}\text{O}_w$  et donc de salinité mais bien inférieures à celles observées au niveau de la



carotte MD07-3081, suggérant que d'autres paramètres ont pu favoriser un pourcentage plus important de cette espèce.

Les espèces Benthiques-côtières sont représenté principalement par *P. sulcata*, dont le pourcentage augmente à partir de ~8 ka et jusqu'à la fin de l'Holocène comme indiqué par la PC1 (38 % de la variance ; **Figure 5.6-A**) suggérant également la mise en place d'un fort courant depuis la marge continentale (Romero & Hebbeln, 2003). Pour l'Holocène supérieur, plusieurs évènements d'apport de *P. sulcata* suggèrent soit une augmentation ponctuelle du courant à la côte encore des évènements potentiellement d'origine sismique et/ou volcanique qui déstabiliserait les sédiments superficiels du plateau continental.

Avant l'augmentation des pourcentages du taxon *P. sulcata* à 8 ka, la PC2 souligne l'alternance des pourcentages entre l'espèce *T. nitzschioides* var. *nitzschioides* et l'espèce planctonique côtière *T. eccentrica*. En effet les pourcentages des espèces associées à l'abondance des macronutriments, *T. nitzschioides* var. *nitzschioides* et CRS, sont en miroir des pourcentages de *T. eccentrica* entre le début de l'ACR et ~8 ka. Les pourcentages les plus élevés de cette espèce, entre ~ 13.5 et 9 ka sont synchrones des anomalies de plus faibles salinité ( $\delta^{18}\text{O}_w$ ) observées (**Figure 5.5-C**). Sa présence a été favorisée par les faibles salinités et l'apport de micronutriments depuis le continent.

#### **5.4. Comparaison des assemblages de diatomées le long du transect latitudinal 41-49° S**

Nous présentons ici la comparaison des variations des pourcentages pour quelques espèces de diatomées des groupes définies plus haut qui sont présentes dans les 3 carottes étudiées.

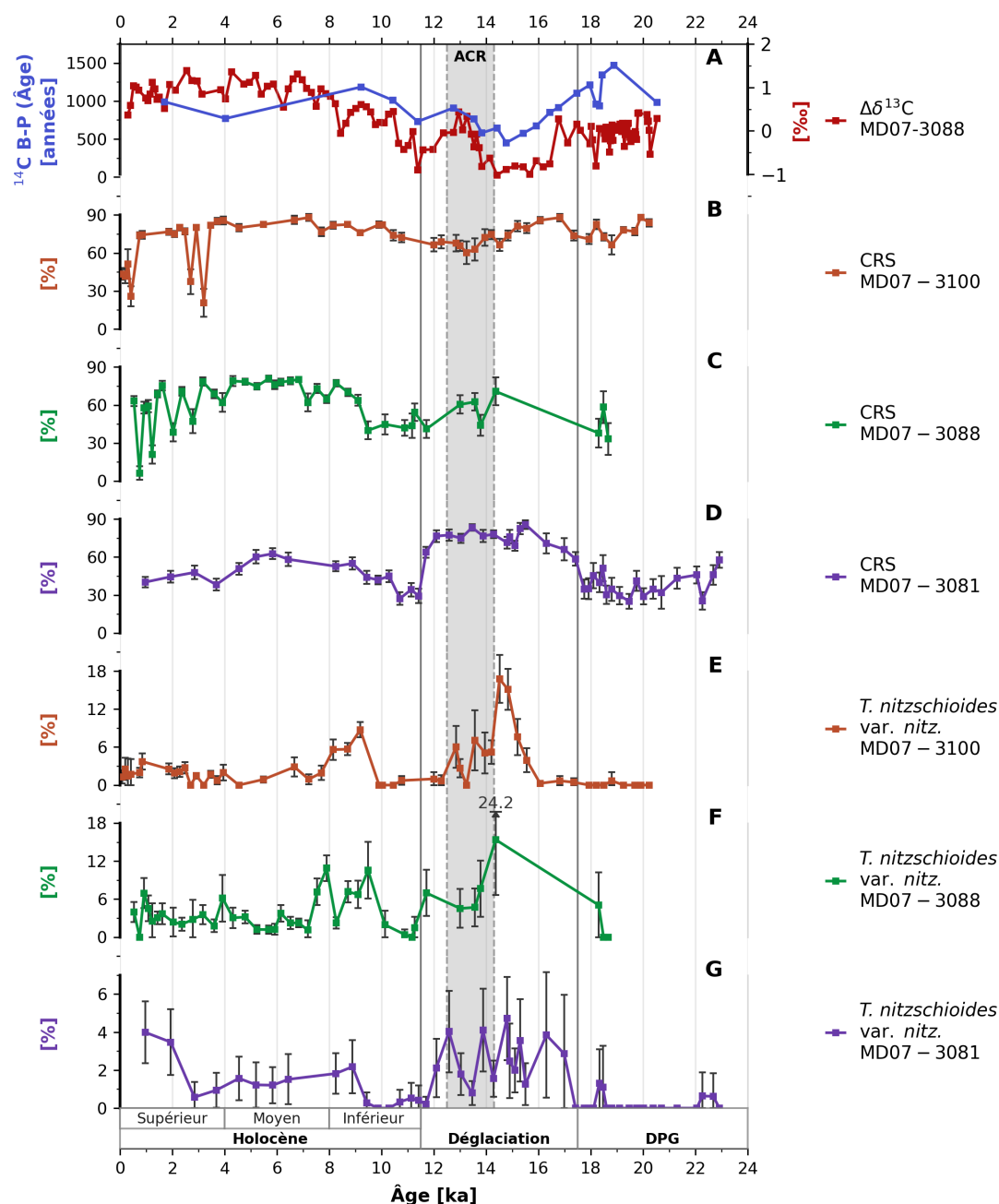
Le groupe des nutriments abondants est représenté principalement par les taxons CRS et en moindre abondance par l'espèce *T. nitzschioides* var. *nitzschioides*. Le pourcentage de CRS est très élevé dans les deux carottes les plus au Nord (75 %) tandis que les pourcentages dans la carotte MD07-3081 à 49° S n'atteignent ces valeurs que lors de la déglaciation. La présence de macronutriments plus importante dans les deux carottes à 41 et 46° S pourrait s'expliquer par l'influence de la masse d'eau d'origine équatoriale (ESSW) en subsurface, riche en éléments nutritifs, qui s'étend jusque vers 47° S (**Figure 1.5**). Les plus forts pourcentages de CRS observés à 49° S lors de la déglaciation peuvent être le résultat d'une influence accrue de ESSW à cette latitude, la masse d'eau intermédiaire AAIW étant alors à plus grande profondeur le long de la côte du Chili (Haddam et al., 2020) et/ou, particulièrement pour la première moitié

de la déglaciation, par la reprise du mélange vertical dans l'océan Austral qui apporte des éléments nutritifs stockés auparavant à grande profondeur dans l'océan stratifié glaciaire. La baisse du pourcentage des CRS à l'entrée de l'Holocène correspond à la présence moins profonde de AAIW (Haddam et al., 2020) qui limiterait l'influence de ESSW à cette latitude. De même les pourcentages les plus élevés de *T. nitzschioides* var. *nitzschioides* à 41° S et 46° S sont observés pendant la première partie de la déglaciation, avec un pic juste avant l'ACR (14.8-14.5 ka, 17 % et 15 % respectivement) indiquant la plus forte influence de ESSW. Pour le glaciaire et l'Holocène, un gradient décroissant du Nord au Sud de CRS est observé, coïncidant avec l'influence décroissante de ESSW (**Figure 5.7**). Ces espèces liées à l'abondance de macronutriments montrent une baisse de leur pourcentage au début de l'Holocène pour les 3 carottes marines et dès l'ACR pour les deux carottes au nord, 41 et 46° S. Ces espèces sont alors principalement remplacées par l'espèce *T. eccentrica* du groupe Planctonique-côtier, particulièrement à 41° et 46° S où des pourcentages de 18 et 30 % respectivement sont observés. A 49° S leur pourcentage atteint 10 % au début de l'Holocène.

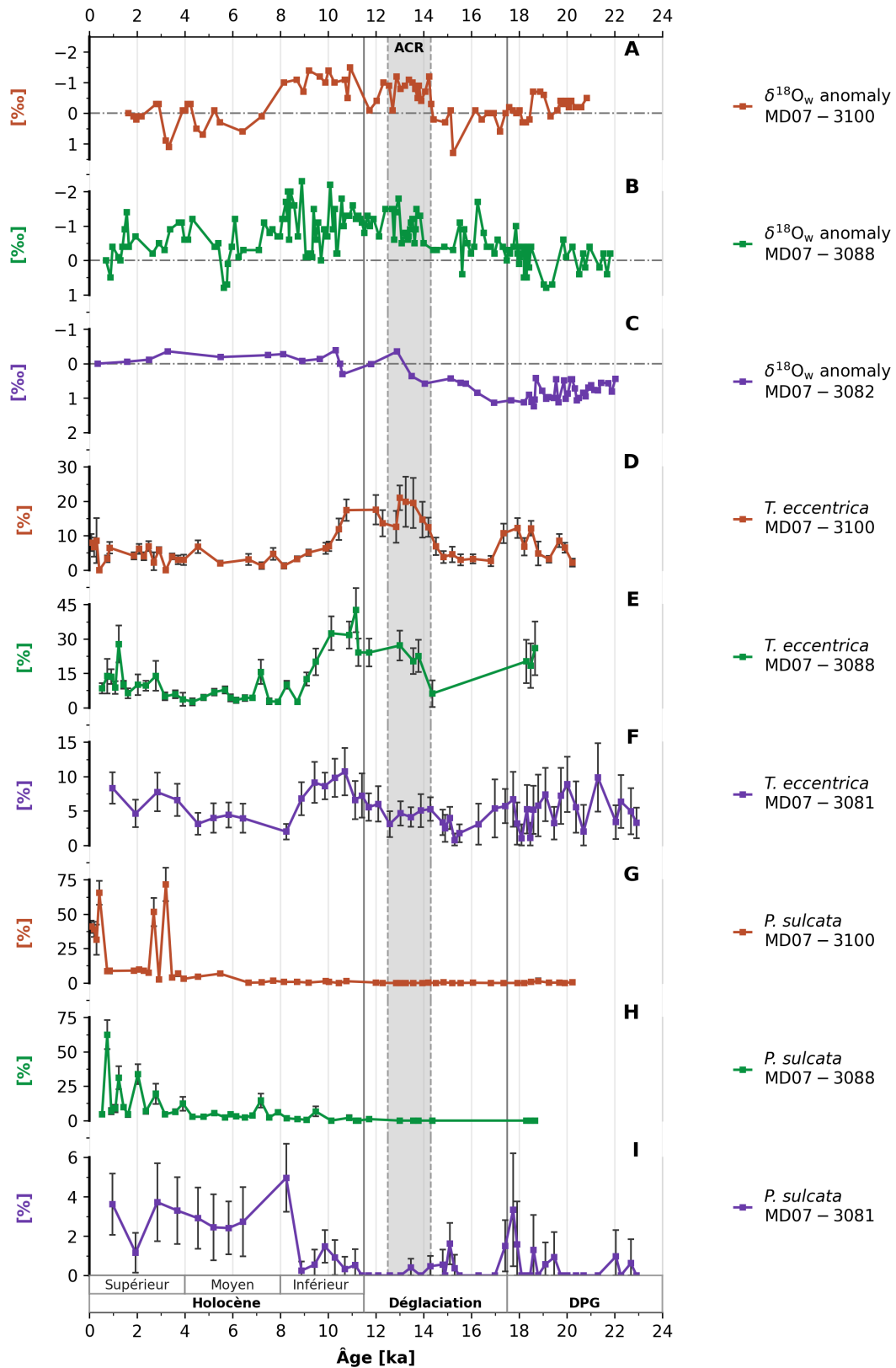
Comme expliqué dans les paragraphes précédents, ce remplacement coïncide avec les plus grandes anomalies de faibles salinités pour les carottes à 41° et 46° S (Haddam et al., 2018 et **Figure 5.8**). Les plus forts pourcentages sont enregistrés dans la carotte MD07-3088 qui est le plus soumise à l'influence de l'eau douce en provenance du continent (**Figure 1.1**) et qui montre les plus fortes anomalies de faibles salinités (**Figure 5.8 A-B-C**). Ces salinités plus faibles s'accompagnent d'une plus grande disponibilité en Fer et autres micronutriments (Cuivre, Zinc) provenant de la zone continentale, et ces deux effets, salinité et micronutriments, favoriseraient la croissance de *T. eccentrica* (Avaria et al., 2004; Romero & Hebbeln, 2003).

Ces baisses de salinité/apports accrus d'eau douce du continent ont deux causes potentielles : la fonte de la calotte Patagonienne et l'augmentation des précipitations dues à l'intensité des vents d'Ouest. Pour les deux carottes au Sud et plus particulièrement celle à 49° S, qui est peu influencée par l'eau douce en provenance du continent, la baisse des taxons liés à la forte présence de nutriments au début de l'Holocène est liée à l'augmentation des taxons du groupe Polaire et Subtropical, particulièrement d'océan ouvert, tels que *F. kerguelensis* (**Figure 5.10**) et *A. tabularis* (**Figure 5.8**) qui atteignent des pourcentages de 30 et 9 % respectivement à 49° S. Kilian & Lamy, (2012) ont indiqué que le début de l'Holocène était marqué par une période de fortes précipitations qu'ils associent à une intensification des vents d'Ouest. Cette intensification des SWW aura entraîné une intensification du courant ACC à la côte qui

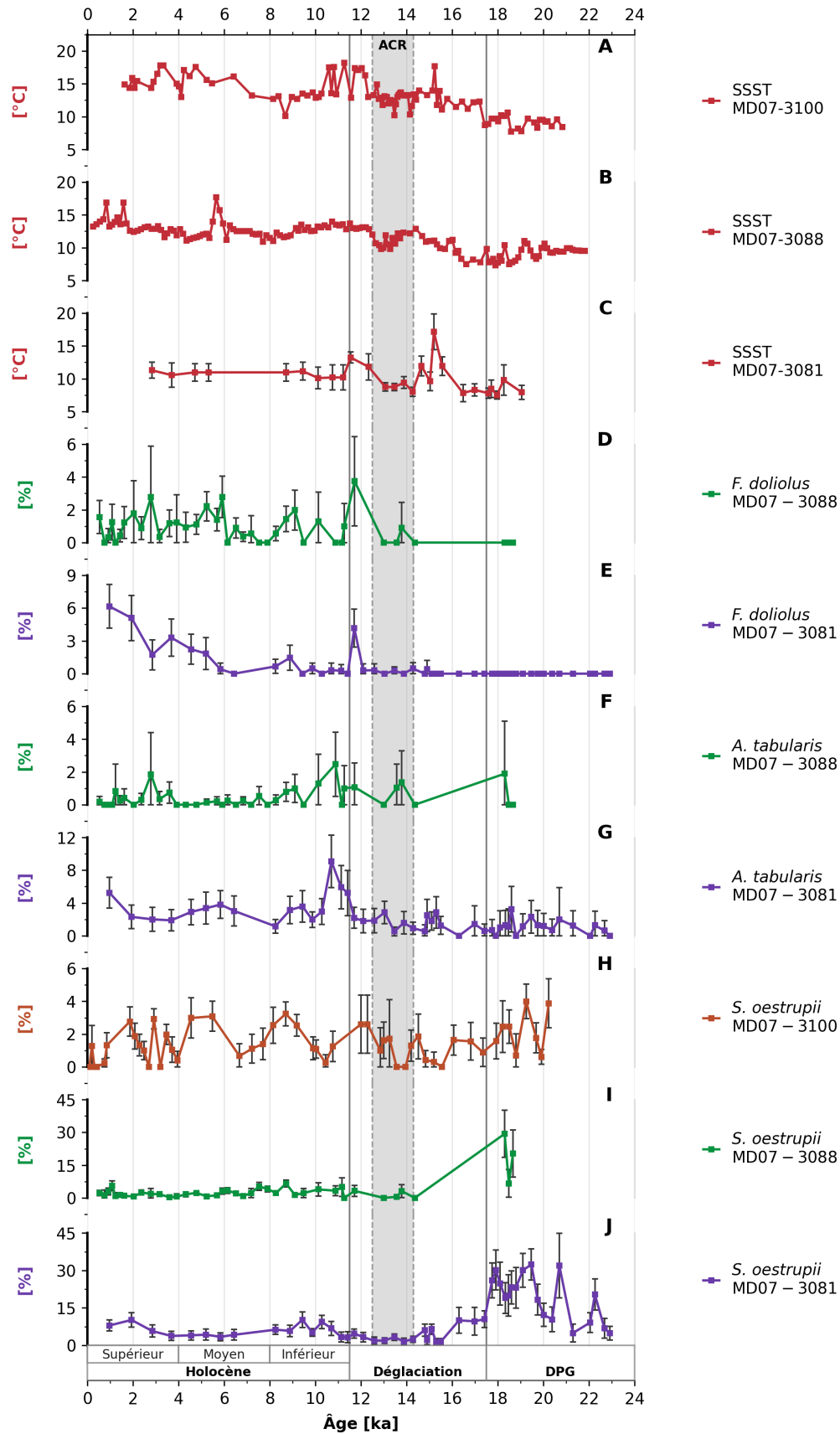
explique la présence d'espèces d'océan ouvert, tant en provenance des eaux polaire que des eaux subtropicales, particulièrement à 49° S, zone peu influencée par l'eau douce en provenance du continent et où l'ACC convergeait potentiellement au début de l'Holocène ayant migré plus au Sud comme les SWW (Gray et al., submitted).



**Figure 5.7** A) Différence de la composition isotopique du carbone entre foraminifère benthique et planctonique pour la carotte MD07-3088 (Siani et al., 2013) ; B, C et D) Pourcentages des CRS ; E, F et G) Pourcentage des *T. nitzschioides* var. *nitzschioides* sur les 3 carottes étudiées : MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081.

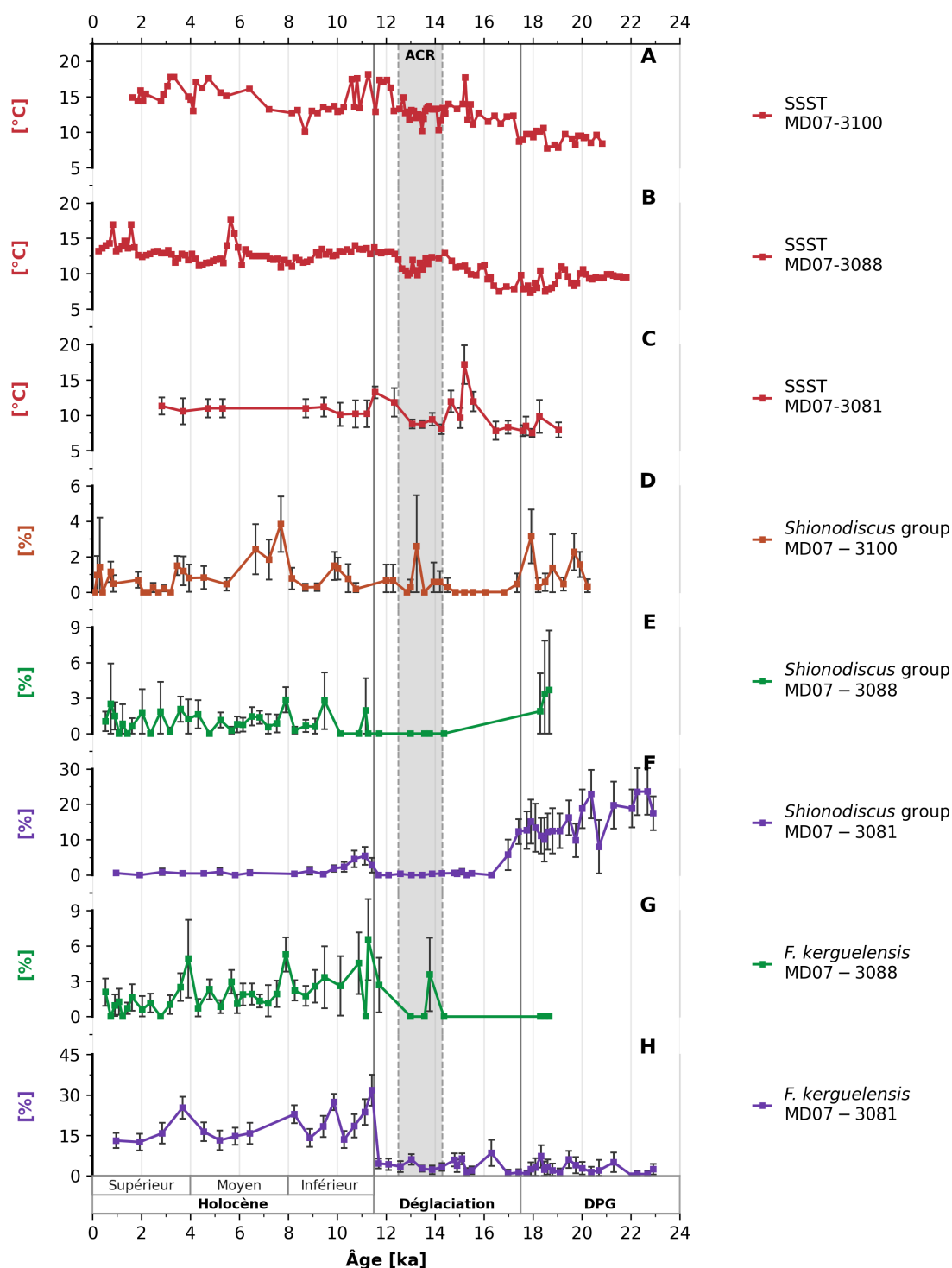


**Figure 5.8** A, B et C) Anomalies de la composition isotopique de l’oxygène de l’eau ( $\delta^{18}O_w$ ) pour les carottes marines MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3082 respectivement (Haddam et al., 2018). D, E et F) Pourcentages de *T. eccentrica* et G, H et I) Pourcentage de *P. sulcata* sur les 3 carottes étudiées : MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081.



**Figure 5.9 A, B et C)** Reconstruction des températures d'été des eaux de surface (SSST) d'après Haddam et al., (2018) ; **D et E)** Pourcentage de *F. doliolus* pour les carottes marines MD07-3088 et MD07-3081 ; **F et G)**

Pourcentage de *A. tabularis* pour les carottes marines MD07-3088 et MD07-3081 ; et **H, I et J**) Pourcentage de *S. oestrupi* pour les 3 carottes étudiées : MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081.



**Figure 5.10** A, B et C) Reconstruction des températures d'été des eaux de surface (SSST) d'après Haddam et al., (2018) ; D, E et F) Pourcentage de *Shionodiscus* group sur les 3 carottes étudiées, MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081 ; et G et H) Pourcentage de *F. kerguelensis* pour les carottes MD07-3088 et MD07-3081.

Parmi les espèces du groupe Subtropical, *F. doliolus* montre également une augmentation significative dans la carotte à 49° S à la fin de l'Holocène supérieur (Figure 5.9). Dans le

chapitre 4 il est suggéré que cette augmentation soit liée à une influence plus importante du courant Pérou-Chili (PCCC). Cette influence ne serait pas significative au niveau des carottes à 41° et 46° S qui sont plus côtière et donc davantage sous l'influence du courant Pérou-Chili côtier (PCC-C, **Figure 1.4**).

Pour l'espèce *P. sulcata*, le principal représentant du groupe Benthique-côtier, les pourcentages augmentent à partir du début de l'Holocène moyen (8 ka) pour les deux carottes au Sud, 49° et 41° S, puis à partir de 6 ka pour la carotte prélevée à 41° S. Cette augmentation suggère un fort courant à la côte qui s'établirait, favorisé par le haut niveau marin, d'abord au Sud, puis dont l'influence s'étendrait plus au nord à 6 ka. Les pourcentages sont plus élevés dans la carotte la plus au Nord, MD07-3100 et plus faibles dans la carotte MD07-3081. Dans les carottes MD07-3100 et MD07-3088, des événements de forts pourcentages sont observés à l'Holocène supérieur indiquant des événements rapides de transport important depuis le plateau continental.

Tout au long de la période étudiée, les pourcentages des espèces côtières et benthiques diminuent du Nord-Sud tandis que ceux des espèces océaniques du groupe Polaire, inexistants au nord, augmentent vers le sud. L'assemblage de diatomées indique donc clairement un environnement plus côtier pour la carotte MD07-3100 suivie par la carotte MD07-3088, qui montre une influence des espèces associées à la côte et au benthos ainsi qu'une augmentation de la contribution des espèces océaniques du groupe Polaire et Subtropical, et enfin un environnement plus océanique pour la carotte MD07-3081, qui montre une plus grande contribution des espèces subantarctiques d'eau froide et subantarctiques d'eau chaude et une plus faible représentation des espèces associées aux zones benthique et Planctonique-côtières.

Au-delà de l'influence très importante d'un environnement plus côtier pour les assemblages de diatomées, l'étude des 3 carottes sur un gradient Nord-Sud a permis de mettre en évidence des variations régionales liées aux changements des différents courants et de l'influence des différentes masses d'eau.







## Chapitre 6: Conclusions et perspectives

### Conclusions

L'objectif principal de ma thèse était de comprendre les paramètres environnementaux qui régissent les assemblages de diatomées dans le Sud-Est Pacifique et de reconstruire les variations hydrologiques des eaux de surface du SEP, de la dernière période glaciaire à nos jours, à partir de ces assemblages dans 3 carottes de sédiments marins situées entre 41° S et 49° S en comparant aux données des foraminifères planctoniques (assemblages et isotopes). Les données des foraminifères avaient été réalisées pour les 2 carottes à 41 et 46° S et j'ai déterminé les assemblages des foraminifères planctoniques et en ai déduit les variations des températures de surface pour la carotte à 49° S, MD07-3081.

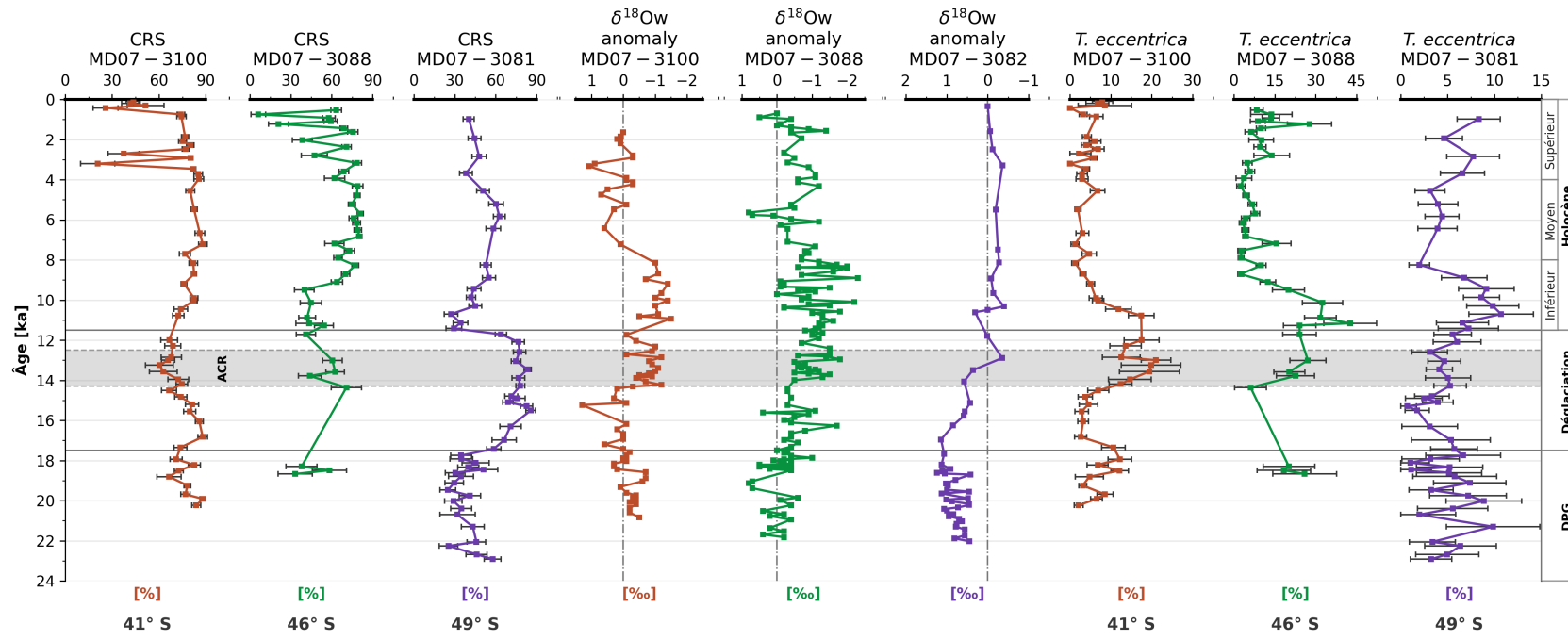
Cette étude m'a permis de faire les conclusions suivantes :

- Les assemblages de diatomées sont fortement influencées par la proximité de la côte sud-américaine. Cette influence est prépondérante dans la carotte située à 41° S et diminue le long du gradient N-S étudié. Ainsi, si les espèces dominantes des trois carottes sont les diatomées associées à une importante présence de macronutriments : CRS et secondairement *T. nitzschioides var. nitzschioides*, pour les deux carottes au Nord, les espèces les plus abondantes ensuite sont celles du groupe Benthique-côtier dominé par *P. sulcata* et du groupe Planctonique-côtier représenté par *T. eccentrica* tandis que pour la carotte plus océanique à 49° S, les groupes Polaires et Subtropical ont une représentation plus élevée.
- Pendant la dernière période glaciaire, les assemblages de diatomées des 3 carottes étudiées ne montrent pas une présence importante d'espèces associées au groupe Polaire, de sorte qu'aucun rapprochement du SAF de nos sites n'est observé pendant cette période.
- Dans la carotte MD07-3081, pendant la dernière période glaciaire, les espèces *Shionodiscus* group et *S. oestrupii* du groupe Polaire et Subtropical respectivement ont dominé. L'espèce *S. oestrupii* est tolérante aux variations de température et peut vivre entre 4.5 et 22.3° C, tandis que la présence du *Shionodiscus* group dans l'hémisphère Nord est associée à des températures basses (Oksman et al., 2019). Cependant, les deux espèces se développent dans des eaux à forte salinité. La

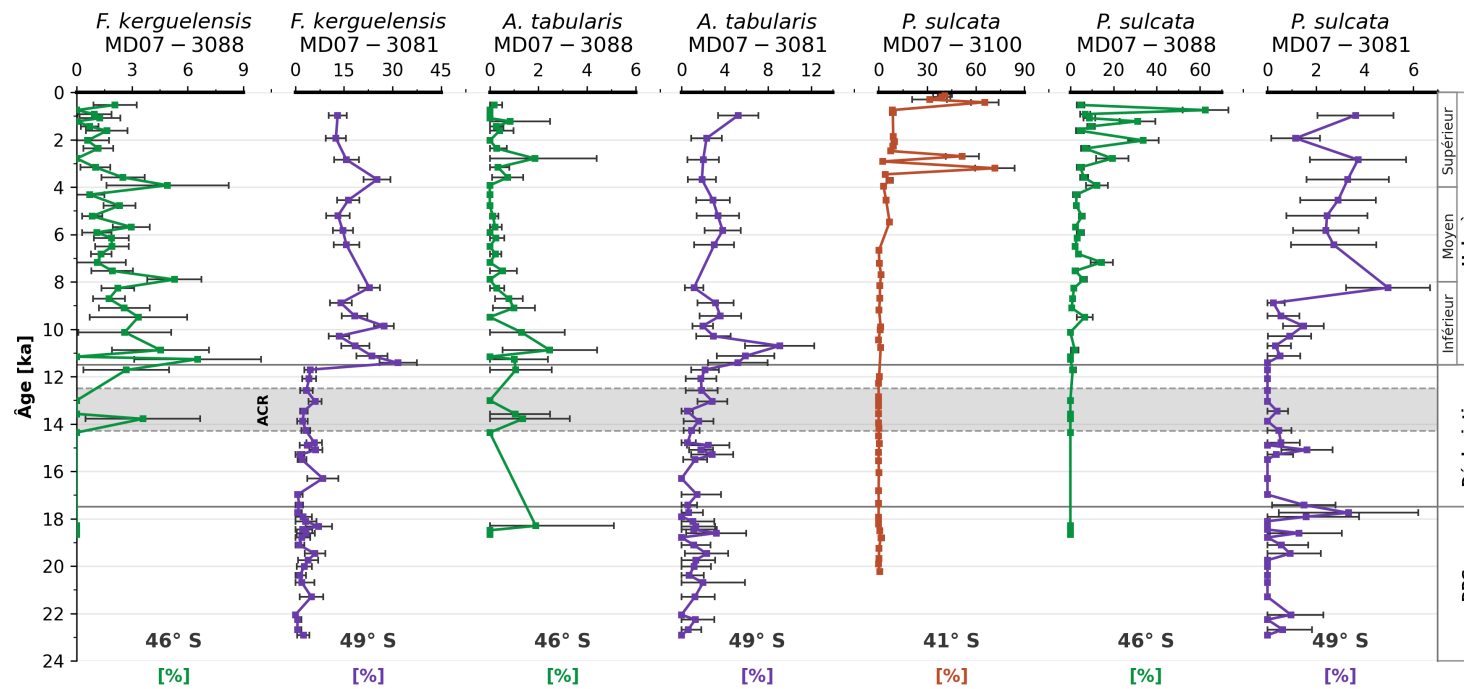
reconstruction de l'anomalie de  $\delta^{18}\text{O}_w$  dans la carotte MD07-3082 (Haddam et al., 2018), à côté de la carotte MD07-3081, indique que la salinité des eaux avait augmenté comme la moyenne océanique à 49° S, tandis qu'aux deux autres sites, l'eau en provenance du continent, fonte de la calotte Patagonienne et précipitations, avaient maintenu une faible salinité. Donc, les diatomées du genre *Shionodiscus* indique que la salinité est un facteur de régulation au cours de la dernière période glaciaire.

- Dans la carotte MD07-3100, le pourcentage de CRS baisse pendant la deuxième moitié de la déglaciation, alors que dans la carotte MD07-3081 le pourcentage de CRS ne baisse qu'au début de l'holocène. Cette baisse du pourcentage de CRS correspond à l'augmentation de *T. eccentrica* dans les 3 carottes. Dans les deux carottes du nord, l'augmentation de *T. eccentrica* correspond à une baisse de la salinité comme l'indique l'anomalie de  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau (**Figure 6.1**). La présence de *T. eccentrica* est favorisée par l'apport de micronutriment associé à l'eau douce qui vient du continent, de la fonte de la calotte glaciaire dans les carottes du nord et par les fortes précipitations dans la carotte à 49 degrés sud.
- Au cours de la déglaciation, le taxon CRS était dominant avec les plus forts pourcentages de la période étudiée dans les carottes MD07-3100 et MD07-3081. Cette augmentation des CRS est associée à l'influence de la reprise de l'upwelling Austral au Sud (Anderson et al., 2009; Siani et al., 2013), et à la plus grande influence de l'eau ESSW, riche en nutriments au nord.
- A 15 ka dans la carotte à 49 degrés sud, le plus fort pourcentage de *N. incompta* indique un déplacement rapide du front subtropical à cette latitude.
- Au début de l'Holocène l'étude conjointe de carottes soumises à l'influence côtière et d'une carotte plus océanique m'a permis de confirmer une augmentation des SWW. Pour la carotte plus océanique MD07-3081, cette période est marquée par une forte augmentation des espèces Polaire, Subtropical d'océan ouvert (*F. kerguelensis*, *A. tabularis*), apportées par une intensification de l'ACC (Kilian & Lamy, 2012) à 49° S (**Figure 6.2** et **Figure 6.3**).
- À partir de l'Holocène moyen, l'espèce *P. sulcata* indique un transport plus important du continent vers les sédiments de la carotte MD07-3100, avec un

gradient de plus grande influence côtière dans la carotte MD07-3100 vers la carotte océanique MD07-3081 (figure 6.2). Cette espèce tychoplanctonique associée aux sédiments, montre des événements importants et très bref dans les deux carottes plus au nord, qui indiquent un transport plus important de la côte vers cette zone, potentiellement associé à des tremblements du terre ou des événements d'arrivée massive d'eau douce lors de la rupture de glaces ou moraines retenant des lacs glaciaires (Glacial lake Outburst floods, GLOFS). Tandis qu'au sud, le fort courant côtier serait responsable du transport *P. sulcata*.



**Figure 6.1** Graphiques de CRS (%),  $\delta^{18}Ow$  (‰) (Haddam et al., 2018) et *T. eccentrica* pour les 3 carottes étudiées : MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081.



**Figure 6.2** Graphiques de *F. kerguelensis* (%), *A. tabularis* (%) observée sur les carottes MD07-3088 et MD07-3081 et *P. sulcata* (%) observée sur les 3 carottes étudiées : MD07-3100 (41° S), MD07-3088 (46° S) et MD07-3081 (49° S).

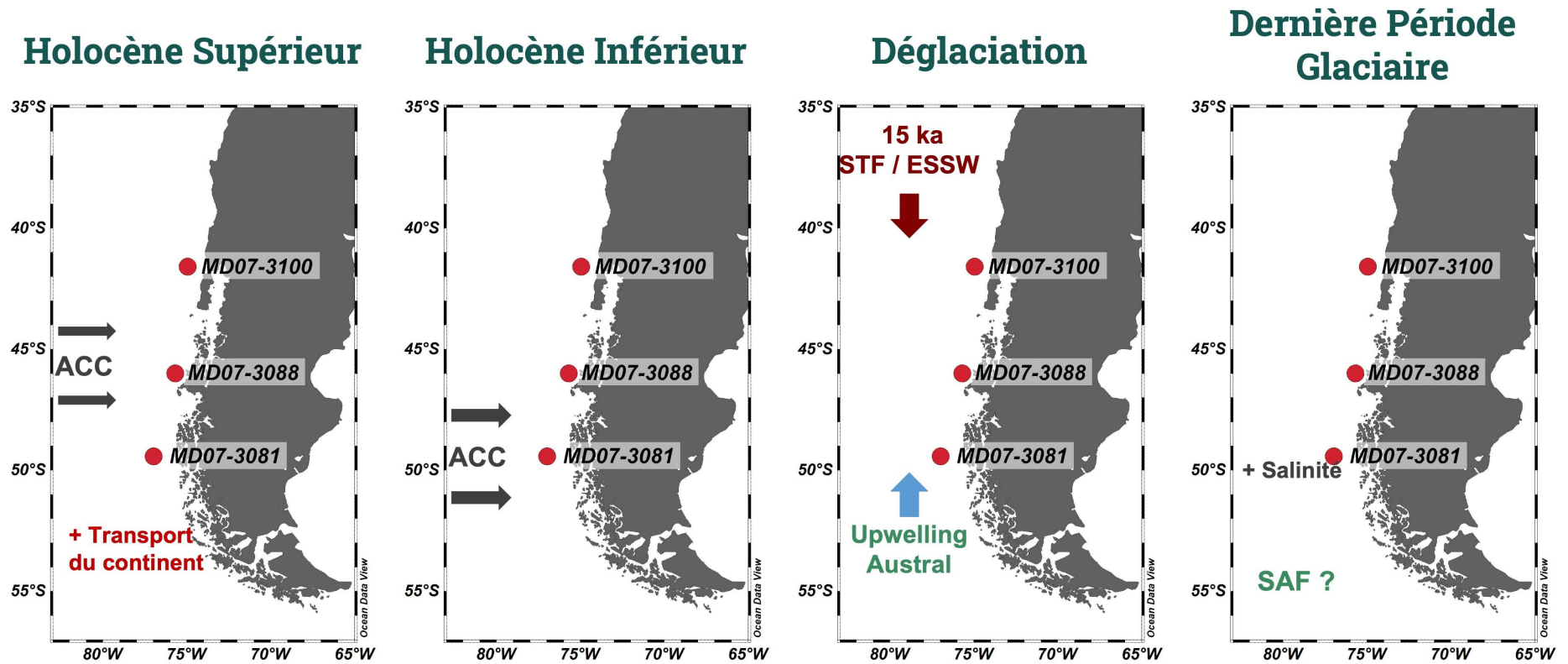


Figure 6.3 Schéma des principaux résultats de cette thèse pour les différentes périodes : Dernière Période Glaciaire, Déglaciation, Holocène Inférieur et Holocène Supérieur.

## 6.1. Perspectives

De plus, les informations obtenues, lors des comptages de diatomées, sur le spicules d'éponges, le silicoflagellés *D. speculum* et *D. fibula* et les radiolaires totaux ne sont pas encore exploitées. L'abondance de *D. speculum* entre 27° et 43° S dans les sédiments de surface du SEP est une indication d'un plus grand transport de nutriments et d'eau froide de l'ACC vers ces latitudes (Romero et al., 2001), il serait donc intéressant de contraster ces données avec les diatomées, afin de mettre en relation une plus grande intensité de l'ACC pendant l'Holocène inférieur.

De même, j'aimerais approfondir la taxonomie des taxons du CRS, que j'ai classés pendant les comptages dans le *Chaetoceros* spp. group. Étant le taxa le plus abondant dans les 3 carottes depuis la dernière période glaciaire, la déglaciation et l'holocène, il serait intéressant d'obtenir une bonne classification écologique pour ce taxa. Une publication comparative des images de microscopie électronique et de microscopie optique nous permettrait d'identifier les spores de chaetoceros et d'interpréter ensuite nos résultats. Cette comparaison taxonomique a déjà été effectuée dans d'autres régions comme la côte ouest du Japon (Ishii et al., 2011) et pourrait servir d'aide pour les futures classifications du CRS.

En complément, j'aimerais étudier une carotte océanique à 55° S qui me permettrait d'observer, à partir des assemblages de diatomées, s'il y a eu ou non une migration de SAF et PF au cours de la dernière glaciation.

Enfin, j'aimerais publier dans une revue scientifique toutes les informations générées dans cette thèse sur les assemblages de diatomées et faire une deuxième publication qui inclut les trois carottes situées à 41°, 46° et 49° S et ainsi reconstruire de manière plus complète la position des fronts et l'océanographie régionale et globale dans le SEP depuis le dernier glaciaire.





## Références bibliographiques

- Abrantes, F., Lopes, C., Mix, A., & Pisias, N. (2007). Diatoms in Southeast Pacific surface sediments reflect environmental properties. *Quaternary Science Reviews*, 26(1–2), 155–169. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.02.022>
- Al-Handal, A., Riaux-Gobin, C., Jahn, R., Katarina Wulff, A., & Minerovic, A. (2019). Two new marine species of *Cocconeis* (Bacillariophyceae) from the west coast of Sweden. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 497(497), 1–16. <https://doi.org/10.5852/ejt.2019.497i>
- Amigo, Á., Lara, L. E., & Smith, V. C. (2013). Holocene record of large explosive eruptions from Chaitén and Michinmahuida Volcanoes, Chile. *Andean Geology*, 40(2), 227–248. <https://doi.org/10.5027/andgeov40n2-a03>
- Anderson, R. F., Ali, S., Bradtmiller, L. I., Nielsen, S. H. H., Fleisher, M. Q., Anderson, B. E., & Burckle, L. H. (2009). Wind-Driven upwelling in the Rise in Atmospheric CO<sub>2</sub>. *Science*, 323(March), 1443–1448. <https://doi.org/10.1126/science.1167441>
- Armand, L. K., Crosta, X., Romero, O., & Pichon, J. J. (2005). The biogeography of major diatom taxa in Southern Ocean sediments: 1. Sea ice related species. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 223(1–2), 93–126. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.02.015>
- Avaria, S., Cáceres, C., & Muñoz, P. (2004). Distribución del microfitoplancton marino entre el Golfo Corcovado y el Estero Elefantes en la primavera de 1998 y en el verano de 1999 (Crucero CIMAR 4 Fiordos). *Revista Ciencia y Tecnología del Mar*, 27 (1), 17–47.
- Barker, S., Diz, P., Vautravers, M. J., Pike, J., Knorr, G., Hall, I. R., & Broecker, W. S. (2009). Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation. *Nature*, 457(7233), 1097–1102. <https://doi.org/10.1038/nature07770>
- Barun, K., & Gupta, S. (1999). Introduction to modern Foraminifera. In K. Barun & S. Gupta (Eds.), *Modern Foraminifera* (1999th ed., pp. 3–6).
- Bé, A.W.H., & Tolderlund, D.S. (1971). Distribution and ecology of living planktonic foraminifera in surface waters of the Atlantic and Indian Oceans. In Funnel, B.M., and Riedel, W.R. (Eds.), *The Micropaleontology of Oceans*: Cambridge (Cambridge Univ. Press), 105-149.
- Benz, V., Esper, O., Gersonde, R., Lamy, F., & Tiedemann, R. (2016). Last Glacial Maximum sea surface temperature and sea-ice extent in the Pacific sector of the Southern Ocean. *Quaternary Science Reviews*, 146, 216–237. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.006>
- Bertrand, S., Huguen, K., Sepúlveda, J., & Pantoja, S. (2014). Late Holocene covariability of the southern westerlies and sea surface temperature in northern Chilean Patagonia.

- Boyer, T.P., J.I. Antonov, O.K., Baranova, C., Coleman, H.E., Garcia, A., Grodsky, D.R., Johnson, R.A., Locarnini, A.V., Mishonov, T.D., O'Brien, C.R., Paver, J.R., Reagan, D., Seidov, I.V., Smolyar, M.M., & Zweng. (2013). World Ocean Database 2013. Sydney Levitus, Ed.; Alexey Mishonov, Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 72-209.
- Blunier, T., & Brook, E. J. (2001). Timing of millennial-scale climate change in antarctica and greenland during the last glacial period. *Science*, 291(5501), 109–112. <https://doi.org/10.1126/science.291.5501.109>
- Broecker, W. S. (1998). Paleocean circulation during the last deglaciation: A bipolar seesaw? *Paleoceanography*, 13(2), 119–121. <https://doi.org/10.1029/97PA03707>
- Buizert, C., Sigl, M., Severi, M., Markle, B. R., Wettstein, J. J., McConnell, J. R., Pedro, J. B., Sodemann, H., Goto-Azuma, K., Kawamura, K., Fujita, S., Motoyama, H., Hirabayashi, M., Uemura, R., Stenni, B., Parrenin, F., He, F., Fudge, T. J., & Steig, E. J. (2018). Abrupt ice-age shifts in southern westerly winds and Antarctic climate forced from the north. *Nature*, 563(7733), 681–685. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0727-5>
- Camus, P. (2001). Biogeografía marina de Chile continental. *Revista Chilena de Historia Natural*, 74(3), 587–617. <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2001000300008>
- Caniupán, M., Lamy, F., Lange, C. B., Kaiser, J., Arz, H., Kilian, R., Baeza Urrea, O., Aracena, C., Hebbeln, D., Kissel, C., Laj, C., Mollenhauer, G., & Tiedemann, R. (2011). Millennial-scale sea surface temperature and Patagonian Ice Sheet changes off southernmost Chile (53°S) over the past ~60 kyr. *Paleoceanography*, 26(3). <https://doi.org/10.1029/2010PA002049>
- Cárdenas, P., Lange, C. B., Vernet, M., Esper, O., Srain, B., Vorrath, M. E., Ehrhardt, S., Müller, J., Kuhn, G., Arz, H. W., Lembke-Jene, L., & Lamy, F. (2019). Biogeochemical proxies and diatoms in surface sediments across the Drake Passage reflect oceanic domains and frontal systems in the region. *Progress in Oceanography*, 174, 72–88. <https://doi.org/10.1016/j.pcean.2018.10.004>
- Chaigneau, A., & Pizarro, O. (2005). Surface circulation and fronts of the South Pacific Ocean, east of 120°W. *Geophysical Research Letters*, 32(8), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2004GL022070>
- Chiang, J. C. H., Lee, S. Y., Putnam, A. E., & Wang, X. (2014). South Pacific Split Jet, ITCZ shifts, and atmospheric North-South linkages during abrupt climate changes of the last glacial period. *Earth and Planetary Science Letters*, 406, 233–246. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.09.012>

- Crosta, X., Pichon, J.-J., & Labracherie, M. (1997). Distribution of Chaetoceros resting spores in modern peri-Antarctic sediments. *Marine Micropaleontology*, 29, 283–299.
- Crosta, X., & Koç, N. (2007). Chapter Eight Diatoms: From Micropaleontology to Isotope Geochemistry. *Developments in Marine Geology*, 1(07), 327–369. [https://doi.org/10.1016/S1572-5480\(07\)01013-5](https://doi.org/10.1016/S1572-5480(07)01013-5)
- Crosta, X., Romero, O., Armand, L. K., & Pichon, J. J. (2005). The biogeography of major diatom taxa in Southern Ocean sediments: 2. Open ocean related species. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 223, 66–92. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.03.028>
- Crosta, X., Shukla, S. K., Ther, O., Ikehara, M., Yamane, M., & Yokoyama, Y. (2020). Last Abundant Appearance Datum of Hemidiscus karstenii driven by climate change. *Marine Micropaleontology*, 157, 101861. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2020.101861>
- Cupp, E. E. (1943). Marine Plankton Diatoms of the west Coast of North America. *Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography*, 5(1), 199–207.
- Darling, K. F., & Wade, C. M. (2008). The genetic diversity of planktic foraminifera and the global distribution of ribosomal RNA genotypes. *Marine Micropaleontology*, 67(3–4), 216–238. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2008.01.009>
- Davies, B. J., Darvill, C. M., Lovell, H., Bendle, J. M., Dowdeswell, J. A., Fabel, D., García, J. L., Geiger, A., Glasser, N. F., Gheorghiu, D. M., Harrison, S., Hein, A. S., Kaplan, M. R., Martin, J. R. V., Mendelova, M., Palmer, A., Pelto, M., Rodés, Á., Sagredo, E. A., & Thorndycraft, V. R. (2020). The evolution of the Patagonian Ice Sheet from 35 ka to the present day (PATICE). *Earth-Science Reviews*, 204, 103152. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103152>
- Dávila, P. M., Figueroa, D., & Müller, E. (2002). Freshwater input into the coastal ocean and its relation with the salinity distribution off austral Chile (35–55°S). *Continental Shelf Research*, 22(3), 521–534. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00072-3](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00072-3)
- Davila, P. M., Figueroa, D., & Muller, E. M. (2002). Freshwater input into the coastal ocean and its relation with the salinity distribution off austral Chile (35–55°S). In *Continental Shelf Research* (Vol. 22).
- de Deckker, P., Moros, M., Perner, K., & Jansen, E. (2012). Influence of the tropics and southern westerlies on glacial interhemispheric asymmetry. *Nature Geoscience*, 5(4), 266–269. <https://doi.org/10.1038/ngeo1431>
- Denton, H., & Karlen, w. (1973). Holocene Climatic Variations; Their Pattern and Possible Cause. *Quaternary Research*, 205, 155–205.

- Diraison, M., Cobbold, P. R., Gapais, D., Rossello, E. A., & le Corre, C. (2000). Cenozoic crustal thickening, wrenching and rifting in the foothills of the southernmost Andes. *Tectonophysics*, 316(1–2), 91–119. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00255-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00255-3)
- Dumoulin, J. P., Comby-Zerbino, C., Delqué-Količ, E., Moreau, C., Caffy, I., Hain, S., Perron, M., Thellier, B., Setti, V., Berthier, B., Comby-Zerbino, C., Delqué-Količ, E., Moreau, C., Caffy, I., Hain, S., Perron, M., Thellier, B., Setti, V., Berthier, B., & Beck, L. (2017). Status Report on Sample Preparation Protocols Developed at the LMC14 Laboratory, Saclay, France: From Sample Collection to 14 C AMS Measurement. *Radiocarbon*, 59(3), 713–726. <https://doi.org/10.1017/RDC.2016.116i>
- Duplessy, J. C., Labeyrie, L., & Waelbroeck, C. (2002). Constraints on the ocean oxygen isotopic enrichment between the Last Glacial Maximum and the Holocene: Paleoceanographic implications. *Quaternary Science Reviews*, 21, 315–330.
- EPICA Community Members, 2004. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429: 623-628.
- Esper, O., & Gersonde, R. (2014). Quaternary surface water temperature estimations: New diatom transfer functions for the Southern Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 414, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.08.008>
- Esper, O., Gersonde, R., & Kadagies, N. (2010). Diatom distribution in southeastern Pacific surface sediments and their relationship to modern environmental variables. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 287, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.12.006>
- Eulin, A., Lefrançois, E., Delmas, F., Coste, M., Gueguen, J., & Rosebery, J. (2017). *Flore des diatomées des Antilles françaises: Vol. Introductif*.
- Ferrari, R., Jansen, M. F., Adkins, J. F., Burke, A., Stewart, A. L., & Thompson, A. F. (2014). Antarctic sea ice control on ocean circulation in present and glacial climates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(24), 8753–8758. <https://doi.org/10.1073/pnas.1323922111>
- Fryxell, G. A., & Hasle, G. R. (1980). The Marine Diatom *Thalassiosira Oestrupii*: Structure, Taxonomy and Distribution. *American Journal of Botany*, 67 (5). <http://www.jstor.orgURL:http://www.jstor.org/stable/>
- Futa, K., & Stern, C. R. (1988). Sr and Nd isotopic and trace element compositions of Quaternary volcanic centers of the Southern Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, 88(3–4), 253–262. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90082-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90082-9)
- Ganopolski, A., Calov, R., & Claussen, M. (2009). Simulation of the last glacial cycle Climate of the Past Discussions Simulation of the last glacial cycle with a coupled climate ice-

sheet model of intermediate complexity Simulation of the last glacial cycle. *Climate of the Past Discussions*, 5, 2269–2309.

Garcia H.E., K.W. Weathers, C.R. Paver, I.V. Smolyar, T.P. Boyer, R.A. Locarnini, M.M. Zweng, A.V. Mishonov, O.K. Baranova, J.R. Reagan. (2019a). World Ocean Atlas 2018, Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation. A. Mishonov Technical Editor, NOAA Atlas NESDIS 83.

Garcia H.E., K.W. Weathers, C.R. Paver, I.V. Smolyar, T.P. Boyer, R.A. Locarnini, M.M. Zweng, A.V. Mishonov, O.K. Baranova, J.R. Reagan. (2019b). World Ocean Atlas 2018, Volume 4: Dissolved Inorganic Nutrients (phosphate, nitrate, silicate). A. Mishonov Technical Editor, NOAA Atlas NESDIS 84.

Garreaud, R., Lopez, P., Minvielle, M., & Rojas, M. (2013). Large-scale control on the Patagonian climate. *Journal of Climate*, 26(1), 215–230. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1>

Gersonde, R., Crosta, X., Abelmann, A., & Armand, L. (2005). Sea-surface temperature and sea ice distribution of the Southern Ocean at the EPILOG Last Glacial Maximum - a circum-Antarctic view based on siliceous microfossil records. *Quaternary Science Reviews*, 24, 869–896. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.07.015>

Glasser, N. F., Harrison, S., Winchester, V., & Aniya, M. (2004). Late Pleistocene and Holocene palaeoclimate and glacier fluctuations in Patagonia. *Global and Planetary Change*, 43, 79–101. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.03.002>

Goldstein, S. T. (1999). *Foraminifera: A biological overview*.

Gómez, F., Claustre, H., Raimbault, P., Souissi, S., Claustre, H., Raimbault, P., & Souissi, S. (2007). Two High-Nutrient Low-Chlorophyll phytoplankton assemblages: the tropical central Pacific and the offshore Perú-Chile Current. *European Geosciences Union*, 4,(6). [www.biogeosciences.net/4/1101/2007/](http://www.biogeosciences.net/4/1101/2007/)

Haddam, N. A., Michel, E., Siani, G., Cortese, G., Bostock, H. C., Duprat, J. M., & Isguder, G. (2016). Improving past sea surface temperature reconstructions from the Southern Hemisphere oceans using planktonic foraminiferal census data. *Paleoceanography*, 31(6), 822–837. <https://doi.org/10.1002/2016PA002946>

Haddam, N. A., Michel, E., Siani, G., Licari, L., & Dewilde, F. (2020). Ventilation and Expansion of Intermediate and Deep Waters in the Southeast Pacific During the Last Termination. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35(7), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2019PA003743>

Haddam, N. A., Siani, G., Michel, E., Kaiser, J., Lamy, F., Duchamp-Alphonse, S., Hefter, J., Braconnot, P., Dewilde, F., Isgüder, G., Tisnerat-Laborde, N., Thil, F., Durand, N., & Kissel, C. (2018). Changes in latitudinal sea surface temperature gradients along the

- Southern Chilean margin since the last glacial. *Quaternary Science Reviews*, 194, 62–76. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.06.023>
- Hammer, Ø. (2020). PAST: PAleontological STatistics Version 4.03 Reference manual. *Natural History Museum, 1999*, 1–283.
- Harwood, D. M., & Gersonde, R. (1990). Lower Cretaceous diatoms from ODP Leg 113 Site 693 (Weddell Sea). Part 2: resting spores, chrysophycean cysts, an endoskeletal dinoflagellate, and notes on the origin of diatoms. *Proc., Scientific Results, ODP, Leg 113, Weddell Sea, Antarctica, 113*, 403–425.
- Hasle, G. (1976). The biogeography of some marine planktonic diatoms. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 23(4), 319-IN6. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(76\)90873-1](https://doi.org/10.1016/0011-7471(76)90873-1)
- Hasle, G. R., & Syvertsen, E. E. (1996). Marine Diatoms. *Identifying Marine Phytoplankton*, 5–385. <https://doi.org/10.1016/b978-012693018-4/50004-5>
- Hogg, A. G., Heaton, T. J., Hua, Q., Palmer, J. G., Turney, C. S., Southon, J., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Boswijk, G., Bronk Ramsey, C., Pearson, C., Petchey, F., Reimer, P., Reimer, R., & Wacker, L. (2020). SHCal20 Southern Hemisphere Calibration, 0–55,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 62(4), 759–778. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.59>
- Hulton, N. R. J., Purves, R. S., McCulloch, R. D., Sugden, D. E., & Bentley, M. J. (2002). The Last Glacial Maximum and deglaciation in southern South America. *Quaternary Science Reviews*, 21(1–3), 233–241. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00103-2)
- Imbrie, J., & Kipp, N. G. (1971). The late Cenozoic glacial ages. *Yale University Press, New Haven, Conn*, 71–182.
- Ishii, K. I., Iwataki, M., Matsuoka, K., & Imai, I. (2011). Proposal of identification criteria for resting spores of Chaetoceros species (Bacillariophyceae) from a temperate coastal sea. *Phycologia*, 50(4), 351–362. <https://doi.org/10.2216/10-36.1>
- Johansen, J. R., & Fryxell, G. A. (1985). The genus Thalassiosira (Bacillariophyceae): studies on species occurring south of the Antarctic Convergence Zone. *Phycologia*, 24(2), 155–179. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-24-2-155.1>
- Keeling, R. F., & Stephens, B. B. (2001). Antarctic sea ice and the control of Pleistocene climate instability. *Paleoceanography*, 16(1), 112–131. <https://doi.org/10.1029/2000PA000529>
- Kilian, R., & Lamy, F. (2012). A review of Glacial and Holocene paleoclimate records from southernmost Patagonia (49–55°S). *Quaternary Science Reviews*, 53, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.07.017>

- Kissel, C. (2007). *MD159 – PACHIDERME IMAGES XV Data Report*. 1–84.
- Kucera, M. (2007). Chapter Six Planktonic Foraminifera as Tracers of Past Oceanic Environments. In *Developments in Marine Geology*, 1, 213–262. [https://doi.org/10.1016/S1572-5480\(07\)01011-1](https://doi.org/10.1016/S1572-5480(07)01011-1)
- Kucera, M., Weinelt, M., Kiefer, T., Pflaumann, U., Hayes, A., Weinelt, M., Chen, M. te, Mix, A. C., Barrows, T. T., Cortijo, E., Duprat, J., Juggins, S., & Waelbroeck, C. (2005). Reconstruction of sea-surface temperatures from assemblages of planktonic foraminifera: Multi-technique approach based on geographically constrained calibration data sets and its application to glacial Atlantic and Pacific Oceans. *Quaternary Science Reviews*, 24, 951–998. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.07.014>
- Lagerloef, G., Schmitt, R., Schanze, J., & Kao, H. Y. (2010). The ocean and the global water cycle. *Oceanography*, 23(4), 82–93. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.07>
- Lambeck, K., Rouby, H., Purcell, A., Sun, Y., & Sambridge, M. (2014). Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(43), 15296–15303. <https://doi.org/10.1073/pnas.1411762111>
- Lamy, F., Arz, H. W., Kilian, R., Lange, C. B., Lembke-Jene, L., Wengler, M., Kaiser, J., Baeza-Urrea, O., Hall, I. R., Harada, N., & Tiedemann, R. (2015). Glacial reduction and millennial-scale variations in Drake Passage throughflow. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(44), 13496–13501. <https://doi.org/10.1073/pnas.1509203112>
- Lamy, F., Kilian, R., Arz, H. W., Francois, J. P., Kaiser, J., Prange, M., & Steinke, T. (2010). Holocene changes in the position and intensity of the southern westerly wind belt. *Nature Geoscience*, 3(10), 695–699. <https://doi.org/10.1038/ngeo959>
- Locarnini, R. A., Mishonov, A.V, Baranova, O. K., Boyer, T. P., Zweng, M. M., Garcia, H. E., Reagan, J. R., Seidov, D., Weathers, K. W., Paver, C. R., Smolyar, I. (2019). *World Ocean Atlas* (Vol. 1). <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/indprod.html>
- Loeblich, A.R., & Tappan, H. (1988). *Foraminiferal Genera and Their Classification*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5760-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5760-3_1)
- Lopez-Escobar, L., Kilian, R., Kempton, P. D., & Tagiri, M. (1993). Petrography and geochemistry of Quaternary rocks from the Southern Volcanic Zone of the Andes between 41°30' and 46°00'S, Chile. *Revista Geologica de Chile*, 20(1), 33–55. <https://doi.org/10.5027/andgeoV20n1-a04>
- Lougheed, B. C., & Obrochta, S. P. (2019). A Rapid, Deterministic Age-Depth Modeling Routine for Geological Sequences With Inherent Depth Uncertainty. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 34, 122–133. <https://doi.org/10.1029/2018PA003457>



- Malviya, S., Scalco, E., Audic, S., Vincent, F., Veluchamy, A., Poulain, J., Wincker, P., Iudicone, D., de Vargas, C., Bittner, L., Zingone, A., & Bowler, C. (2016). Insights into global diatom distribution and diversity in the world's ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *113*(11), 1516–1525. <https://doi.org/10.1073/pnas.1509523113>
- Marshall, J., & Speer, K. (2012). Closure of the meridional overturning circulation through Southern Ocean upwelling. *Nature Geoscience*, *5*(3), 171–180. <https://doi.org/10.1038/ngeo1391>
- McCulloch, R. D., & Sugden, D. E. (2000). Climatic inferences from glacial and palaeoecological evidence at the last glacial termination, Southern South America. *Journal of Quaternary Science*, *15*(4), 409–417. <https://doi.org/10.1002/jqs.608>
- McQuoid, M. R., & Nordberg, K. (2003). The diatom *Paralia sulcata* as an environmental indicator species in coastal sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *56*(2), 339–354. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00187-7](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00187-7)
- Naranjo, J. A., Singer, B. S., Jicha, B. R., Moreno, H., & Lara, L. E. (2017). Holocene tephra succession of Puyehue-Cordón Caulle and Antillanca/Casablanca volcanic complexes, southern Andes (40–41°S). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *332*, 109–128. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.11.017>
- Naranjo, J. A., & Stern, C. R. (2004). Holocene tephrochronology of the southernmost part (42°30'–45°S) of the Andean Southern Volcanic Zone. *Revista Geologica de Chile*, *31*(2), 225–240. <https://doi.org/10.4067/S0716-02082004000200003>
- Orsi, A. H., Whitworth, T., & Nowlin, W. D. (1995). On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Research Part I*, *42*(5), 641–673. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00021-W](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00021-W)
- Pantoja, S., Luis Iriarte, J., & Daneri, G. (2011). Oceanography of the Chilean Patagonia. *Continental Shelf Research*, *31*(3–4), 149–153. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.10.013>
- Park, J. S., Jung, S. W., Lee, S. D., Yun, S. M., & Lee, J. H. (2016). Species diversity of the genus *Thalassiosira* (Thalassiosirales, Bacillariophyta) in South Korea and its biogeographical distribution in the world. *Phycologia*, *55*(4), 403–423. <https://doi.org/10.2216/15-66.1>
- Park, Y. H., Park, T., Kim, T. W., Lee, S. H., Hong, C. S., Lee, J. H., Rio, M. H., Pujol, M. I., Ballarotta, M., Durand, I., & Provost, C. (2019). Observations of the Antarctic Circumpolar Current Over the Udintsev Fracture Zone, the Narrowest Choke Point in the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *124*(7), 4511–4528. <https://doi.org/10.1029/2019JC015024>

- Patterson, R. T., & Fishbein, E. (1989). Re-examination of the statistical methods used to determine the number of point counts needed for micropaleontological quantitative research. *Journal of Paleontology*, 63(2), 245–248. <https://doi.org/10.1017/S0022336000019272>
- Pawloxski, J., Holzmann, M., Berney, C., Fahrni, J., Godday, A. J., Cedhagen, T., Habura, A., & Bowser, S. S. (2003). The evolution of early Foraminifera. *PNAS*, 100(20), 11494–11498.
- Pedro, J. B., Bostock, H. C., Bitz, C. M., He, F., Vandergoes, M. J., Steig, E. J., Chase, B. M., Krause, C. E., Rasmussen, S. O., Markle, B. R., & Cortese, G. (2015). The spatial extent and dynamics of the Antarctic Cold Reversal. *Nature Geoscience*, 9(1), 51–55. <https://doi.org/10.1038/ngeo2580>
- Peeters, F., Acheson, R., Brummer, G.-J. A., de Ruijter, W., Schneider, R., Ganssen, G., Ufkes, E., & Kroon, D. (2004). Vigorous exchange between the Indian and Atlantic oceans at the end of the past five glacial periods. *Nature*, 430, 661–665.
- Prell, W. L. (1985). The stability of low-latitude sea-surface temperatures: an evaluation of CLIMAP reconstruction with emphasis on the positive SST anomalies. U.S. Dept. of Energy, Office of Energy Research, Office of Basic Energy Sciences, Carbon Dioxide Research Division. [//catalog.hathitrust.org/Record/007195294](https://catalog.hathitrust.org/Record/007195294)
- Rintoul, S. R., Donguy, J. R., & Roemmich, D. H. (1997). Seasonal evolution of upper ocean thermal structure between Tasmania and Antarctica. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 44(7), 1185–1202. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(96\)00125-2](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(96)00125-2)
- Rojas, M., Moreno, P., Kageyama, M., Crucifix, M., Hewitt, C., Abe-Ouchi, A., Ohgaito, R., Brady, E. C., & Hope, P. (2009). The Southern Westerlies during the last glacial maximum in PMIP2 simulations. *Climate Dynamics*, 32(4), 525–548. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0421-7>
- Romero, O. E., Armand, L. K., Crosta, X., & Pichon, J. J. (2005). The biogeography of major diatom taxa in Southern Ocean surface sediments: 3. Tropical/Subtropical species. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 223(1–2), 49–65. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.03.027>
- Romero, O. E., Hebbeln, D., & Wefer, G. (2001). Temporal and spatial variability in export production in the SE Pacific Ocean: Evidence from siliceous plankton fluxes and surface sediment assemblages. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 48(12), 2673–2697. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(01\)00037-1](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(01)00037-1)
- Romero, O.E., & Hebbeln, D. (2003). Biogenic silica and diatom thanatocoenosis in surface sediments below the Peru-Chile Current: Controlling mechanisms and relationship with

- productivity of surface waters. *Marine Micropaleontology*, 48(1–2), 71–90.  
[https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(02\)00161-5](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(02)00161-5)
- Scharader, H., & Gersonde S. (1978). Diatoms and silicoflagellates. In: WJ, Zachariasse et al. (eds) *Micropaleontological counting methods and techniques an exercise on an eight meter section of the Lower Pliocene of Capo Rosello, Sicily*. *Micropaleontology Bulletin* Utrecht 17, 129-176
- Schiebel, R., & Hemleben, C. (2017). Planktic foraminifers in the modern ocean. *Planktic Foraminifers in the Modern Ocean*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-50297-6>
- Schiebel, R., Spielhagen, R. F., Garnier, J., Hagemann, J., Howa, H., Jentzen, A., Martínez-García, A., Meilland, J., Michel, E., Repschläger, J., Salter, I., Yamasaki, M., & Haug, G. (2017). Modern planktic foraminifers in the high-latitude ocean. *Marine Micropaleontology*, 136, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2017.08.004>
- Schlitzer, Reiner, Ocean Data View, [odv.awi.de](http://odv.awi.de), 2021
- Shackleton, N. J. (1974). Attainment of isotopic equilibrium between ocean water and the benthonic foraminifera genus *Uvigerina*: isotopic changes in the ocean during the Last Glacial.
- Siani, G., Michel, E., de Pol-Holz, R., Devries, T., Lamy, F., Carel, M., Isguder, G., Dewilde, F., & Laurantou, A. (2013). Carbon isotope records reveal precise timing of enhanced Southern Ocean upwelling during the last deglaciation. *Nature Communications*, 4, 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms3758>
- Sievers, H. A., & Silva, N. (2006). Masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes. *Cona*, 53–58.
- Silva, N., Rojas, N., & Fedele, A. (2009). Water masses in the Humboldt Current System: Properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(16), 1004–1020. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.013>
- Sims, P. A., Fryxell, G. A., Baldauf, J. G., Fryxell, G. A., & Baldauf, J. G. (1989). Critical Examination of the Diatom Genus *Azpeitia*: Species Useful as Stratigraphic Markers for the Oligocene and Miocene Epochs. *Micropaleontology*. 35,(4), 293–307.
- Skinner, L. C., Fallon, S., Waelbroeck, C., Michel, E., & Barker, S. (2010). Ventilation of the deep southern ocean and deglacial CO<sub>2</sub> rise. *Science*, 328(5982), 1147–1151. <https://doi.org/10.1126/science.1183627>
- Steig, E. J., Hart, C. H., White, J. W. C., Cunningham, W. L., Davis, M. D., & Man, E. S. S. (1998). Changes in climate, ocean and ice-sheet conditions in the Ross embayment, Antarctica, at 6 ka. *Annals of Glaciology*, 27, 305–310.

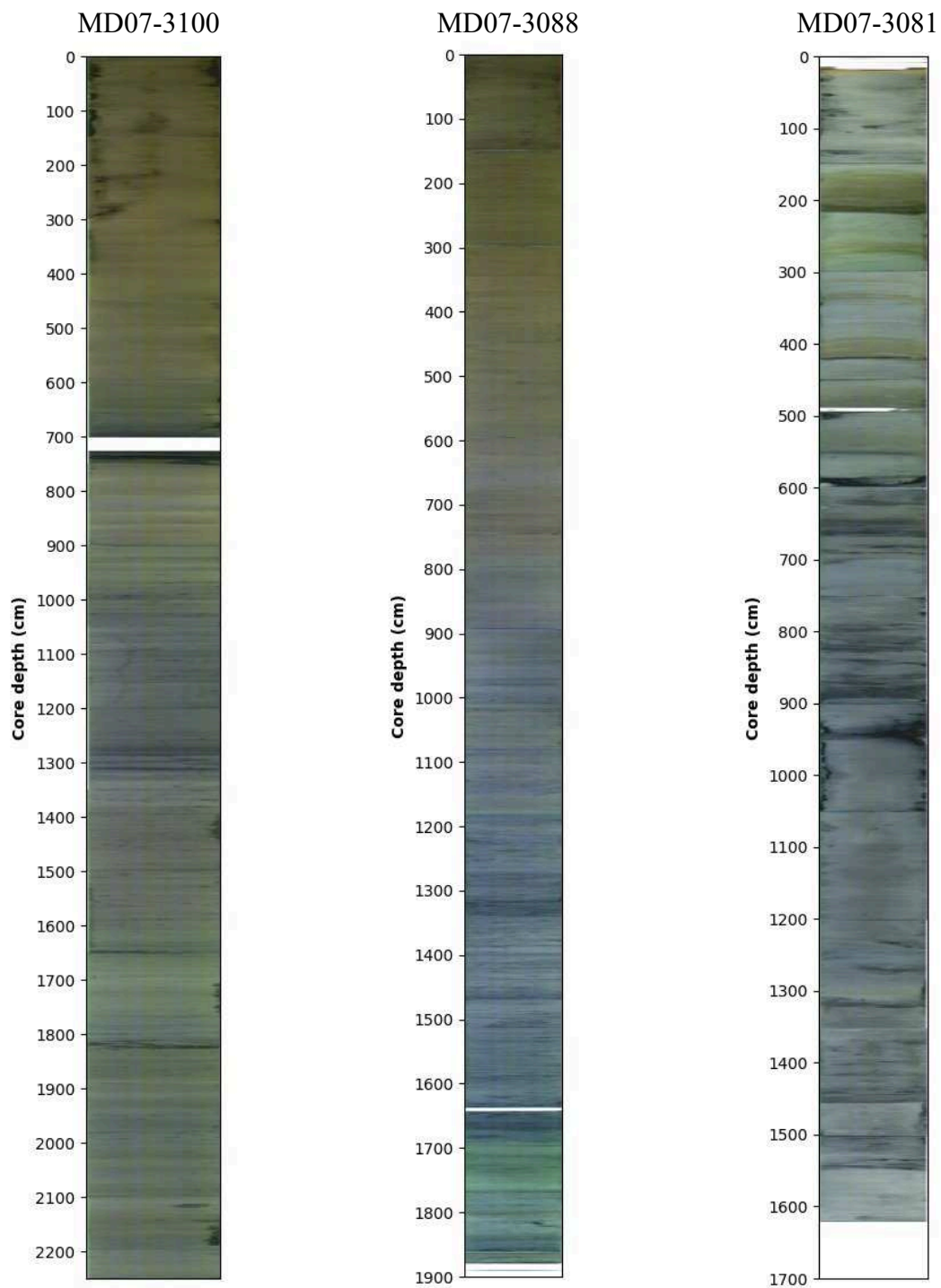
- Strub, P. T., James, C., Montecino, V., Rutllant, J. A., & Blanco, J. L. (2019). Ocean circulation along the southern Chile transition region (38°–46°S): Mean, seasonal and interannual variability, with a focus on 2014–2016. *Progress in Oceanography*, *172*, 159–198. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.01.004>
- Strub, P. T., Mesías, M. J., Montecino, V., Rutllant, J., & Salinas, S. (1998). Coastal ocean circulation off western South America coastal segment. *The Sea*, *11*, 273–313.
- Stuiver, M., & Polach, H. A. (1977). Discussion Reporting of 14 C Data . *Radiocarbon*, *19*(3), 355–363. <https://doi.org/10.1017/s0033822200003672>
- Sweng, M. M., Reagan, J. R., Seidov, D., Boyer, T. P., Locarni, R. A., Garcia, H. E., Mishonov, A. V., Baranova, O. K., Weathers, K. W., Paver, C. R., & Smolyar, I. V. (2019). *World Ocean Atlas 2018, Volume 2: Salinity* (A. Mishonov, Ed.). <http://www.nodc.noaa.gov/>
- Therón, R., Paillard, D., Cortijo, E., Flores, J.A., Vaquero, M., Sierro, F. J., Waelbroeck, C., & Vaquero, M. (2004). *Rapid reconstruction of paleoenvironmental features using a new multiplatform program*. *50*(4), 391–395. <https://doi.org/10.2113/50.4.391i>
- Toggweiler, J. R., Russell, J. L., & Carson, S. R. (2006). Midlatitude westerlies, atmospheric CO<sub>2</sub>, and climate change during the ice ages. *Paleoceanography*, *21*(2), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2005PA001154>
- Tomas, C. (1998). Identifying marine phytoplankton. <https://doi.org/10.5860/choice.35-3284>
- Tréguer, P., Bowler, C., Moriceau, B., Dutkiewicz, S., Gehlen, M., Aumont, O., Bittner, L., Dugdale, R., Finkel, Z., Iudicone, D., Jahn, O., Guidi, L., Lasbleiz, M., Leblanc, K., Levy, M., & Pondaven, P. (2018). Influence of diatom diversity on the ocean biological carbon pump. *Nature Geoscience*, *11*(1), 27–37. <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0028-x>
- Tsuchiya, M., & Talley, L. D. (1998). A Pacific hydrographic section at 88°W: Water-property distribution. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *103*(3336), 12899–12918. <https://doi.org/10.1029/97jc03415>
- Verleye, T. J., & Louwye, S. (2010). Late Quaternary environmental changes and latitudinal shifts of the Antarctic Circumpolar Current as recorded by dinoflagellate cysts from offshore Chile (41°S). *Quaternary Science Reviews*, *29*(7–8), 1025–1039. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.01.009>
- Vickerman, K. (1992). The diversity and ecological significance of Protozoa. *Biodiversity and Conservation* (Vol. 1).
- Wilks, J. v., & Armand, L. K. (2017). Diversity and taxonomic identification of *Shionodiscus* spp. in the Australian sector of the Subantarctic Zone. *Diatom Research*, *32*(3), 295–307. <https://doi.org/10.1080/0269249X.2017.1365015>

Zielinski, U., & Gersonde, R. (1997). Diatom distribution in Southern Ocean surface sediments (Atlantic sector): Implications for paleoenvironmental reconstructions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 129(3–4), 213–250. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(96\)00130-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(96)00130-7)



## Annexes

### Annexe 1. Photo des sédiments des carottes MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3100



**Annexe 2. Tableau de classification des espèces des 3 carottes étudiées, incluant les espèces les plus représentatives (plus de 2 % au moins à une profondeur).**

<b>Espèce</b>	<b>Groupe</b>	<b>Littérature</b>	<b>Intervalle de SST</b>	<b>Nutriments</b>
<i>Actinocyclus curvatulus</i>	Subtropical	Cárdenas et al., 2019		
<i>Actinoptychus senarius</i>	Benthic-côtier	Romero & Hebbeln., 2003		
<i>Aulacoseira granulata</i>	Eau douce	O'farrel & Tell., 2001 Rebolledo et al., 2005 Romero & Hebbeln., 2003		Moyen
<i>Azpeitia tabularis</i>	Subtropical	Romero et al., 2005 Romero & Hebbeln., 2002 Esper et al., 2014		Faible
<i>Chaetoceros</i> spp. resting spores	Nutriments abondants	Abrantes et al., 2007 Rebolledo et al, 2005 Romero & Hebbeln., 2003 Crosta et al., 1997		Abondants
<i>Cocconeis</i> spp. group	Benthic-côtier	Romero & Hebbeln., 2003 Rebolledo et al, 2005		
<i>Coscinodiscus radiatus</i>	Planctonique-côtier	Romero & Hebbeln., 2003 Rebolledo et al, 2005		
<i>Cyclostephanos</i> spp.	Eau douce	Pinto et al., 2016		
<i>Ditylum brightwellii</i>	Planctonique-côtier	Rebolledo et al, 2005		
<i>Eucampia antarctica</i>	Polaire	Zielinski & Gersonde., 1997	-2 a 12° C	
<i>Fragilariopsis doliolus</i>	Subtropical	Zielinski & Gersonde., 1997 Romero et al., 2005 Romero & Hebbeln., 2003 Esper et al., 2014	8 - 20° C 10.5 - 22.3° C	



## Annexe 2

Espèce	Groupe	Littérature	Intervalle de SST	Nutriments
<i>Fragilariopsis kerguelensis</i>	Polaire	Zielinski & Gersonde., 1997 Romero et al., 2005 Esper et al., 2010 Crosta et al., 2005 Cárdenas et al., 2019	-1 à 18° C -1 à 22° C -1 à 10° C	
<i>Hemidiscus cuneiformis</i>	Subtropical	Zielinski & Gersonde., 1997 Romero et al., 2005 Esper et al., 2010 Romero & Hebbeln., 2003 Esper et al., 2014	7.5 à 20° C 8.5 à 22.3° C 8 à 10° C	Faible
<i>Nitzschia bicapitata</i>	Subtropical	Zielinski & Gersonde., 1997 Romero & Hebbeln., 2003	5 à 20° C	Faible
<i>Paralia sulcata</i>	Benthic-côtier	Romero & Hebbeln., 2003		
Pennate spp. benthic	Benthic-côtier			
<i>Roperia tessellata</i>	Subtropical	Zielinski & Gersonde., 1997 Romero et al., 2005	4 à 20° C 6.5 à 22.3° C	Faible
<i>Shionodiscus oestrupii</i>	Subtropical	Zielinski & Gersonde., 1997 Romero et al., 2005		Faible
<i>Shionodiscus</i> group	Polaire	Wilks & Armand., 2017 Romero & Hebbeln., 2003		
<i>Skeletonema costatum</i>	Nutriments abondants	Abrantes et al., 2007 Rebolledo et al, 2005 Romero & Hebbeln., 2003		Abondants

## Annexe 2

<b>Espèce</b>	<b>Groupe</b>	<b>Littérature</b>	<b>Intervalle de SST</b>	<b>Nutriments</b>
<i>Thalassionema nitzschioides</i> group	Polaire	Zielinski & Gersonde., 1997 Crosta et al., 2005	2 à 20° C 2 à 19° C	
<i>T. nitzschioides</i> var. <i>nitzschioides</i>	Nutriments abondants	Abrantes et al., 2007		Abondants
<i>Thalassiosira angulata</i>	Planctonique-côtier	Rebolledo et al, 2005		
<i>Thalassiosira antarctica</i>	Polaire	Armand et al., 2005	-1.3 à 3.5	
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	Planctonique-côtier	Romero & Hebbeln., 2003 Rebolledo et al, 2005		
<i>Thalassiosira</i> < 10um	Planctonique-côtier			
<i>Thalassiosira pacifica</i>	Planctonique-côtier	Romero et al., 2001		Abondants
<i>Thalassiosira simonsenii</i>	Planctonique-côtier			

### Annexe 3. Supplementary material Tables Chapter 4

**Table S1** Relative percentage in the core MD07-3081. In gray are shown the levels where less than 300 individuals were counted and/or presented more than 20% fragments.

Total count_MD07-3081	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)																
Depth	<i>G. bulloides</i>	<i>G. bulloides</i> [Error]	<i>G. glutinata</i>	<i>G. glutinata</i> [Error]	<i>G. ruber</i>	<i>G. ruber</i> [Error]	<i>Globorotalia inflata</i>	<i>G. scitula</i> [Error]	<i>G. scitula</i>	<i>G. scitula</i> [Error]	<i>G. truncatulinoides</i>	<i>G. truncatulinoides</i> [Error]	<i>N. incompta</i>	<i>N. incompta</i> [Error]	<i>N. pachyderma (left)</i>	<i>N. pachyderma (left)</i> [Error]	<i>Orbulina universa</i>	<i>O. universa</i> [Error]	Other	Other [Error]	<i>T. hexagona</i>	<i>T. hexagona</i> [Error]	<i>T. quinqueloba</i>	<i>T. quinqueloba</i> [Error]				
[n°]	[cm]	[ka]	[Ind. g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]				
70	20	1.0	5	21	37	11.3	0	0.0	14	8.2	24	10.0	0	0.0	0	0.0	10	7.0	6	5.4	1	2.8	6	5.4	1	2.8	0	0.0
307	40	1.9	18	42	63	5.4	0	0.0	0	0.0	22	4.7	0	0.0	2	1.4	9	3.2	1	1.1	0	0.6	1	1.3	0	0.6	1	1.1
448	60	2.8	69	18	74	4.1	3	1.6	0	0.0	13	3.2	0	0.0	2	1.1	4	1.7	2	1.4	0	0.6	0	0.6	0	0.6	1	1.0
916	80	3.7	420	6	85	2.3	2	0.8	0	0.2	4	1.2	0	0.0	1	0.7	4	1.2	2	0.9	0	0.0	1	0.6	0	0.2	1	0.7
1364	100	4.7	426	16	83	2.0	1	0.5	0	0.1	6	1.2	0	0.2	2	0.7	4	1.1	2	0.8	0	0.3	0	0.3	0	0.0	1	0.6
1422	120	5.3	616	4	88	1.7	1	0.4	0	0.0	3	0.8	0	0.0	1	0.5	4	1.1	3	0.9	0	0.2	0	0.3	0	0.2	0	0.3
314	140	5.9	23	48	16	4.1	1	0.9	0	0.6	72	5.0	0	0.0	1	1.1	3	1.8	4	2.2	1	1.2	1	1.1	0	0.0	0	0.6
585	230	8.7	112	15	67	3.8	2	1.1	0	0.0	17	3.0	0	0.0	2	1.2	5	1.7	4	1.5	1	0.9	1	0.8	0	0.5	2	1.0
974	250	9.4	235	6	78	2.6	2	0.9	0	0.0	7	1.6	0	0.2	1	0.6	7	1.6	3	1.0	1	0.5	0	0.3	0	0.2	1	0.7
1427	290	10.1	291	7	80	2.1	2	0.7	0	0.1	8	1.4	0	0.2	1	0.5	5	1.2	3	0.9	0	0.1	0	0.3	0	0.1	0	0.3
1177	320	10.8	214	4	78	2.4	1	0.7	0	0.2	2	0.8	0	0.2	1	0.5	12	1.8	5	1.2	0	0.0	0	0.3	0	0.2	1	0.4
953	340	11.2	134	1	80	2.6	2	0.9	0	0.0	1	0.5	0	0.0	0	0.4	12	2.0	4	1.3	0	0.0	1	0.5	0	0.4	1	0.6
605	370	11.5	87	12	55	4.0	3	1.4	0	0.0	7	2.1	0	0.3	2	1.0	27	3.5	4	1.5	0	0.5	1	0.7	0	0.3	1	0.6
310	410	12.3	13	3	57	5.5	2	1.7	0	0.0	4	2.2	0	0.0	1	0.9	20	4.5	11	3.5	0	0.6	2	1.5	0	0.0	2	1.7
820	440	13.1	102	20	58	3.4	5	1.4	0	0.2	16	2.5	0	0.2	2	0.9	6	1.6	12	2.2	0	0.3	0	0.3	0	0.0	1	0.8
1238	460	13.5	343	0	68	2.6	4	1.0	0	0.0	6	1.3	0	0.0	2	0.8	7	1.4	13	1.9	0	0.3	0	0.4	0	0.0	1	0.4
404	480	13.9	42	2	50	4.9	3	1.8	0	0.5	4	1.8	0	0.0	0	0.7	16	3.6	23	4.1	0	0.0	0	0.7	0	0.0	3	1.7
563	500	14.3	158	14	60	4.0	5	1.8	0	0.0	9	2.3	1	0.7	0	0.0	9	2.4	15	3.0	0	0.3	1	0.7	0	0.0	0	0.3
415	520	14.7	41	9	48	4.8	5	2.0	0	0.0	17	3.6	0	0.0	1	1.1	19	3.8	7	2.5	1	1.0	0	0.7	0	0.5	1	0.9
763	550	15.0	77	1	74	3.1	1	0.8	0	0.0	2	1.0	0	0.0	0	0.4	11	2.2	9	2.1	0	0.3	1	0.7	0	0.0	1	0.7
680	570	15.2	138	10	45	3.7	6	1.8	0	0.0	6	1.8	0	0.5	1	0.8	31	3.5	10	2.3	0	0.5	0	0.5	0	0.0	0	0.0
378	610	15.6	40	4	25	4.4	8	2.7	0	0.0	18	3.9	0	0.5	1	0.7	23	4.2	22	4.2	0	0.5	1	1.0	0	0.0	2	1.5
545	650	16.5	38	1	23	3.5	5	1.9	0	0.0	1	1.0	0	0.0	0	0.4	20	3.4	44	4.2	0	0.0	1	0.7	0	0.0	5	1.9
389	680	17.0	41	7	32	4.6	8	2.7	0	0.0	11	3.1	1	1.0	2	1.4	13	3.3	31	4.6	0	0.5	1	0.7	0	0.0	2	1.4

Total count_MD07-3081	Depth	Age	TOTAL FORAM	TOTAL FRAGMENTS FORAMS	<i>G. bulloides</i>	<i>G. bulloides</i> [Error]	<i>G. glutinata</i>	<i>G. glutinata</i> [Error]	<i>G. ruber</i>	<i>G. ruber</i> [Error]	<i>Globorotalia inflata</i>	<i>G. scitula</i> [Error]	<i>G. scitula</i>	<i>G. scitula</i> [Error]	<i>G. truncatulinoides</i>	<i>G. truncatulinoides</i> [Error]	<i>N. incompta</i>	<i>N. incompta</i> [Error]	<i>N. pachyderma (left)</i>	<i>N. pachyderma (left)</i> [Error]	<i>Orbulina universa</i>	<i>O. universa</i> [Error]	Other	Other [Error]	<i>T. hexagona</i>	<i>T. hexagona</i> [Error]	<i>T. quinqueloba</i>	<i>T. quinqueloba</i> [Error]
[n°]	[cm]	[ka]	[Ind. g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
185	710	17.5	20	3	29	6.6	1	1.1	0	0.0	12	4.7	0	0.0	4	2.7	19	5.6	31	6.7	0	0.0	5	3.1	0	0.0	0	0.0
553	720	17.6	81	8	47	4.2	5	1.9	0	0.0	8	2.3	3	1.4	2	1.1	13	2.8	21	3.4	0	0.0	1	0.7	0	0.0	0	0.0
333	735	17.7	12	7	37	5.2	3	1.9	1	1.0	11	3.3	1	0.8	3	1.8	13	3.6	27	4.8	0	0.0	4	2.0	0	0.6	1	1.2
421	765	18.0	12	1	35	4.6	0	0.0	0	0.0	6	2.3	1	0.8	4	1.9	8	2.6	44	4.7	0	0.0	2	1.2	0	0.0	0	0.5
488	794	18.3	34	2	31	4.1	4	1.8	0	0.0	8	2.4	1	0.8	3	1.4	22	3.7	29	4.0	0	0.0	1	0.9	0	0.0	1	1.0
125	817	18.5	19	1	33	8.2	6	4.0	1	1.6	6	4.0	1	1.6	1	1.6	11	5.5	40	8.6	0	0.0	2	2.2	0	0.0	1	1.6
100	859	18.8	5	0	23	8.2	2	2.7	0	0.0	3	3.3	0	0.0	2	2.7	8	5.3	59	9.6	0	0.0	2	2.7	0	0.0	1	2.0
152	895	19.0	10	0	37	7.7	3	2.8	0	0.0	9	4.4	0	0.0	0	0.0	11	5.0	39	7.8	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	1.3
357	900	19.1	46	1	43	5.1	2	1.4	0	0.0	3	1.6	1	1.1	1	0.8	10	3.1	40	5.1	0	0.0	1	0.9	0	0.0	0	0.0
69	990	19.6	6	0	20	9.5	3	4.0	0	0.0	0	0.0	1	2.8	1	2.8	9	6.6	57	11.7	0	0.0	3	4.0	0	0.0	6	5.5
58	1140	20.3	2	2	43	12.7	3	4.7	0	0.0	2	3.4	0	0.0	5	5.7	3	4.7	43	12.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
64	1340	21.4	6	0	47	12.2	0	0.0	0	0.0	2	3.0	0	0.0	0	0.0	11	7.6	31	11.4	0	0.0	6	5.9	0	0.0	3	4.3
126	1490	22.3	6	0	32	8.1	4	3.4	0	0.0	4	3.4	2	2.2	3	3.1	12	5.7	41	8.6	0	0.0	2	2.2	0	0.0	1	1.5
275	1620	23.0	9	0	46	5.9	0	0.7	1	1.2	3	2.0	1	1.0	0	0.0	8	3.3	31	5.5	0	0.7	7	3.1	1	1.2	1	1.0

### Annexe 3. Supplementary material Tables Chapter 4

Table S2 SSST reconstruction of MD07-3081 core with associated error.

Depth [cm]	Age [ka]	SSST [°C]	erreur [°C]
60	2.8	11.3	1.2
80	3.7	10.6	1.8
100	4.7	11.0	1.3
120	5.3	11.0	1.3
230	8.7	11.0	1.3
250	9.4	11.2	1.4
290	10.1	10.1	1.6
320	10.8	10.2	1.9
340	11.2	10.2	1.9
370	11.5	13.3	0.8
410	12.3	11.8	2.0
440	13.1	8.8	0.6
460	13.5	8.7	0.6
480	13.9	9.4	0.9
500	14.3	8.0	0.7
520	14.7	11.9	1.5
550	15.0	9.6	1.4
570	15.2	17.2	2.7
610	15.6	11.9	1.4
650	16.5	7.8	1.3
680	17.0	8.3	0.9
720	17.6	7.8	0.8
735	17.7	8.5	1.3
765	18.0	7.5	0.6
794	18.3	9.8	2.3
900	19.1	7.9	1.1

### Annexe 3. Supplementary material Tables Chapter 4

**Table S3** Total relative percentage of diatoms in core MD07-3081 with associated error. Includes all 51 levels analyzed. Numbers less than 150 valves are shown in gray.

Total count MD07-3081	Depth	Age	TOTAL DIATOM	TOTAL FRAGMENTS DIATOM	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)		(6)		(7)		(8)		(9)		(10)	
					<i>Actinocyclus actinochilus</i>	<i>Actinocyclus actinochilus</i> [error]	<i>Actinocyclus curvatus</i>	<i>Actinocyclus curvatus</i> [error]	<i>Actinocyclus senarius</i>	<i>Actinocyclus senarius</i> [error]	<i>Actinocyclus vulgaris</i>	<i>Actinocyclus vulgaris</i> [error]	<i>Asteromphalus parvulus</i>	<i>Asteromphalus parvulus</i> [error]	<i>Asteromphalus</i> spp.	<i>Asteromphalus</i> spp. [error]	<i>Azpeitia tabularis</i>	<i>Azpeitia tabularis</i> [error]	Centric spp.	Centric spp. [error]	CRS	CRS [error]	<i>Cocconeis</i> spp. group	<i>Cocconeis</i> spp. group [error]
[n°]	[cm]	[kyr]	[Valves g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
552	20	1.0	1.6E+08	22.4	0.0	0.0	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	1.9	0.0	0.0	40.2	4.1	0.0	0.0
432	40	1.9	8.5E+07	28.2	0.0	0.0	0.7	0.8	0.2	0.5	0.7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	1.4	1.6	1.2	44.4	4.7	0.0	0.0
349	60	2.8	6.9E+07	24.3	0.3	0.6	0.3	0.6	0.0	0.0	0.9	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.5	1.7	1.4	47.9	5.2	0.0	0.0
424	80	3.7	8.4E+07	30.4	0.2	0.5	0.0	0.0	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	1.3	2.4	1.4	38.2	4.6	0.2	0.5
447	100	4.6	1.3E+08	18.4	0.0	0.0	0.9	0.9	0.0	0.0	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	2.9	1.6	0.7	0.8	50.8	4.6	0.0	0.0
327	120	5.2	9.7E+07	24.3	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	3.4	2.0	0.0	0.0	60.2	5.3	0.0	0.0
498	140	5.8	1.5E+08	19.4	0.0	0.0	0.4	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	3.8	1.7	0.0	0.0	62.7	4.2	0.0	0.0
330	160	6.4	4.9E+07	24.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.8	0.6	0.8	58.2	5.3	0.0	0.0
605	220	8.2	1.1E+08	20.4	0.0	0.0	0.2	0.3	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.9	1.0	0.8	52.7	4.0	0.0	0.0
413	240	8.9	1.2E+08	24.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.0	0.0	3.1	1.7	0.7	0.8	55.0	4.8	0.2	0.5
361	260	9.4	1.1E+08	29.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	1.9	1.4	1.2	44.1	5.1	0.3	0.5
812	280	9.9	1.6E+08	24.7	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.0	1.1	0.7	41.9	3.4	0.4	0.4
438	300	10.3	1.3E+08	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.0	0.0	3.0	1.6	1.6	1.2	45.0	4.7	0.2	0.4
308	320	10.7	6.4E+07	27.5	0.0	0.0	0.6	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	9.1	3.2	1.3	1.3	27.3	5.0	0.3	0.6
304	340	11.1	2.0E+07	26.7	0.0	0.0	1.3	1.3	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	2.7	3.3	2.0	34.2	5.3	0.0	0.0
249	360	11.4	2.4E+07	25.0	0.0	0.0	2.0	1.7	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.8	0.0	0.0	5.2	2.8	1.2	1.4	29.3	5.7	0.8	1.1
505	380	11.7	1.4E+08	24.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.9	0.2	0.4	0.4	0.5	0.0	0.0	2.2	1.3	1.2	0.9	63.8	4.2	0.2	0.4
332	400	12.1	6.6E+07	25.6	0.0	0.0	0.3	0.6	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	1.4	1.5	1.3	76.5	4.6	0.9	1.0
323	420	12.6	4.1E+07	22.7	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.3	0.6	0.3	0.6	0.0	0.0	1.9	1.5	1.5	1.3	77.4	4.6	0.3	0.6
560	440	13.0	1.6E+08	16.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	0.0	0.0	2.9	1.4	0.0	0.0	74.8	3.6	0.0	0.0
754	460	13.5	1.1E+08	16.7	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	0.0	0.5	0.5	0.1	0.3	83.3	2.7	0.7	0.6
317	480	13.9	4.7E+07	14.8	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.3	0.6	1.6	1.4	0.3	0.6	76.7	4.7	0.9	1.1
645	500	14.3	8.0E+07	18.1	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.9	0.7	0.9	0.7	78.0	3.2	0.2	0.3
360	530	14.8	5.3E+07	19.1	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	0.0	0.0	71.4	4.7	1.1	1.1
242	540	14.9	2.4E+07	18.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	2.5	2.0	0.8	1.1	76.0	5.4	0.8	1.1
554	560	15.1	5.5E+07	19.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.4	0.5	0.2	0.4	0.2	0.4	0.0	0.0	1.8	1.1	1.8	1.1	69.0	3.9	0.7	0.7
281	580	15.3	3.7E+07	23.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.7	1.1	1.2	0.4	0.7	0.0	0.0	2.8	1.9	0.4	0.7	82.6	4.4	0.7	1.0
396	600	15.5	3.9E+07	14.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	1.3	1.1	1.3	1.1	85.6	3.5	0.5	0.7
23	620	15.9	1.9E+06	36.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	56.5	20.3	0.0	0.0
130	640	16.3	6.2E+06	30.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	70.8	7.8	0.0	0.0
110	680	17.0	9.2E+06	22.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	2.2	0.0	0.0	66.1	8.8	0.0	0.0
333	700	17.4	4.2E+07	15.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	3.3	1.9	58.6	5.3	0.9	1.0
150	740	17.8	1.5E+07	20.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.3	1.3	1.8	34.7	7.6	0.0	0.0
126	760	17.9	1.1E+07	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	4.0	34.9	8.3	0.0	0.0
97	780	18.1	9.6E+06	21.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	3.1	3.4	45.4	9.9	0.0	0.0
153	801	18.3	1.3E+07	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.8	5.2	3.5	39.9	7.8	0.0	0.0
90	817	18.5	8.7E+06	37.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	2.2	2.2	3.0	51.1	10.3	0.0	0.0
155	835	18.6	1.5E+07	24.0	0.0	0.0	0.6	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	2.8	6.5	3.9	30.3	7.2	0.0	0.0
104	859	18.8	1.0E+07	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.6	5.7	34.6	9.1	0.0	0.0
11	890	19.0	1.1E+06	57.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.2	22.8	0.0	0.0
176	900	19.1	1.7E+07	20.4	0.0	0.0	1.1	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	1.6	2.8	2.5	29.5	6.7	0.6	1.1
216	960	19.5	2.1E+07	23.9	0.0	0.0	1.4	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	2.0	3.7	2.5	25.0	5.8	0.0	0.0
153	1020	19.8	1.5E+07	19.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.8	4.6	3.3	41.2	7.8	0.7	1.3
192	1080	20.0	4.3E+07	18.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.5	1.2	1.5	7.5	3.7	29.0	6.4	0.0	0.0
144	1170	20.4	1.4E+07	24.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	1.9	0.7	1.4	10.4	5.0	34.7	7.8	0.0	0.0
50	1230	20.7	4.8E+06	20.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.9	2.0	3.9	6.0	6.6	32.0	12.9	0.0	0.0
138	1330	21.3	7.9E+06	22.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.8	2.5	2.6	43.2	8.3	1.2	1.8
207	1456	22.1	2.0E+07	16.2	0.0	0.0	0.5	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.9	0.0	0.0	3.9	2.6	45.9	6.8	0.0	0.0
157	1490	22.3	1.3E+07	18.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	2.1	1.3	1.8	5.1	3.4	25.5	6.8	0.0	0.0
161	1560	22.7	1.5E+07	19.9	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	5.6	3.5	46.0	7.7	0.6	1.2
246	1600	22.9	2.4E+07	22.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	0.0	0.0	3.7	2.3	57.7	6.2	0.0	0.0

**Annexe 3. Supplementary material Tables Chapter 4**  
**Core MD07-3081**  
**Table S3 continued**

Total count_MD07-3081				(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)										
Depth	Age	TOTAL DIATOM	TOTAL FRAGMENTS DIATOM	<i>Coccolithus marginatus</i>	<i>Coccolithus marginatus</i> [error]	<i>Coccolithus radiatus</i>	<i>Coccolithus radiatus</i> [error]	<i>Coccolithus spp.</i>	<i>Coccolithus spp.</i> [error]	<i>Cyclotella litoralis</i>	<i>Cyclotella litoralis</i> [error]	<i>Cyclotella spp.</i>	<i>Cyclotella spp.</i> [error]	<i>Diplum brightwellii</i>	<i>Diplum brightwellii</i> [error]	<i>Eucampia antarctica</i>	<i>Eucampia antarctica</i> [error]	<i>Fragilaropsis dolohus</i>	<i>Fragilaropsis dolohus</i> [error]	<i>Fragilaropsis kerguelensis</i>	<i>Fragilaropsis kerguelensis</i> [error]	<i>Fragilaropsis pseudonana</i>	<i>Fragilaropsis pseudonana</i> [error]
[n°]	[cm]	[kyr]	[Valves g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
552	20	1.0	1.6E+08	22.4	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	2.0	13.0	2.8	0.0	0.0
432	40	1.9	8.5E+07	28.2	0.0	0.0	0.5	0.6	0.7	0.8	0.2	0.5	0.0	0.5	0.6	0.0	0.0	5.1	2.1	12.5	3.1	0.0	0.0
349	60	2.8	6.9E+07	24.3	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	1.7	1.4	15.8	3.8	0.0	0.0
424	80	3.7	8.4E+07	30.4	0.0	0.0	0.2	0.5	1.4	1.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	1.2	1.0	3.3	1.7	25.2	4.1	0.0	0.0
447	100	4.6	1.3E+08	18.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.9	2.2	1.4	16.3	3.4	0.0	0.0
327	120	5.2	9.7E+07	24.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	1.5	13.1	3.7	0.0	0.0
498	140	5.8	1.5E+08	19.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.7	0.4	0.6	14.7	3.1	0.0	0.0
330	160	6.4	4.9E+07	24.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	15.8	3.9	0.0	0.0
605	220	8.2	1.1E+08	20.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	0.7	0.6	22.8	3.3	0.0	0.0
413	240	8.9	1.2E+08	27.4	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	1.5	1.2	14.0	3.4	0.0	0.0
361	260	9.4	1.1E+08	29.5	0.3	0.5	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.8	0.9	0.0	0.0	18.3	4.0	0.0	0.0
812	280	9.9	1.6E+08	24.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.6	0.5	0.5	0.5	27.3	3.1	0.1	0.2
438	300	10.3	1.3E+08	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	1.4	1.1	0.0	0.0	13.5	3.2	0.0	0.0
308	320	10.7	6.4E+07	21.8	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.9	0.3	0.6	18.5	4.3	0.0	0.0
304	340	11.1	2.0E+07	26.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	1.4	0.3	0.6	23.6	4.8	0.0	0.0
249	360	11.4	2.4E+07	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.1	3.2	2.2	0.0	0.0	31.7	5.8	0.0	0.0
505	380	11.7	1.4E+08	24.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	1.4	4.2	1.7	4.6	1.8	0.0	0.0
332	400	12.1	6.6E+07	25.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.3	0.6	0.3	0.6	4.2	2.2	0.0	0.0
323	420	12.6	4.1E+07	22.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.3	0.6	3.4	2.0	0.0	0.0
560	440	13.0	1.6E+08	16.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	0.0	0.0	6.1	2.0	0.0	0.0
754	460	13.5	1.1E+08	16.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.3	0.4	2.7	1.1	0.0	0.0
317	480	13.9	4.7E+07	14.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	1.6	0.0	0.0
645	500	14.3	8.0E+07	18.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	3.3	1.4	0.0	0.0
360	530	14.8	5.3E+07	19.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	2.4	0.0	0.0
242	540	14.9	2.4E+07	18.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	3.7	2.4	0.0	0.0
554	560	15.1	5.5E+07	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	2.0	0.0	0.0
281	580	15.3	3.7E+07	23.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	1.4	0.0	0.0
396	600	15.5	3.9E+07	14.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.4	0.0	0.0
23	620	15.9	1.9E+06	36.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
130	640	16.3	6.2E+06	30.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.5	4.8	0.0	0.0
110	680	17.0	9.2E+06	22.7	2.1	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.6	0.0	0.0
333	700	17.4	4.2E+07	15.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.2	0.0	0.0
150	740	17.8	1.5E+07	20.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.3	0.0	0.0
126	760	17.9	1.1E+07	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	2.7	0.0	0.0
97	780	18.1	9.6E+06	21.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	3.4	0.0	0.0
153	801	18.3	1.3E+07	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.2	4.1	0.0	0.0
90	817	18.5	8.7E+06	37.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	3.0	0.0	0.0
155	835	18.6	1.5E+07	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	2.8	0.0	0.0
104	859	18.8	1.0E+07	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	2.6	0.0	0.0
11	890	19.0	1.1E+06	57.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
176	900	19.1	1.7E+07	20.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	1.6	0.0	0.0
216	960	19.5	2.1E+07	23.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	3.2	0.0	0.0
153	1020	19.8	1.5E+07	19.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	3.1	0.0	0.0
192	1080	20.0	4.3E+07	18.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	2.3	0.0	0.0
144	1170	20.4	1.4E+07	24.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	1.9	0.0	0.0
50	1230	20.7	4.8E+06	20.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.9	0.0	0.0
138	1330	21.3	7.9E+06	21.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9	3.6	0.0	0.0
207	1456	22.1	2.0E+07	16.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
157	1490	22.3	1.3E+07	18.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0
161	1560	22.7	1.5E+07	19.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0
246	1600	22.9	2.4E+07	22.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	1.9	0.0	0.0

**Annexe 3. Supplementary material Tables Chapter 4**  
**Core MD07-3081**  
**Table S3 continued**

Total count_MD07-3081						(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)								
Depth	Age	TOTAL DIATOM	TOTAL FRAGMENTS DIATOM	<i>Fragilariopsis rhombica</i>	<i>Fragilariopsis rhombica</i> [error]	<i>Gomphonema</i> spp.	<i>Gomphonema</i> spp. [error]	<i>Grammatophora</i> spp.	<i>Grammatophora</i> spp. [error]	<i>Hemidiscus cuneiformis</i>	<i>Hemidiscus cuneiformis</i> [error]	<i>Melosira</i> spp.	<i>Melosira</i> spp. [error]	<i>Navicula</i> spp.	<i>Navicula</i> spp. [error]	<i>Navicula capitata</i>	<i>Navicula capitata</i> [error]	<i>Navicula directa</i>	<i>Navicula directa</i> [error]	<i>Nitzschia bicapitata</i>	<i>Nitzschia bicapitata</i> [error]	<i>Nitzschia kolaczekii</i>	<i>Nitzschia kolaczekii</i> [error]
[n°]	[cm]	[kyr]	[Valves g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
552	20	1.0	1.6E+08	22.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
432	40	1.9	8.5E+07	28.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.2	0.5
349	60	2.8	6.9E+07	24.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6
424	80	3.7	8.4E+07	30.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.0	0.0
447	100	4.6	1.3E+08	18.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0
327	120	5.2	9.7E+07	24.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
498	140	5.8	1.5E+08	19.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
330	160	6.4	4.9E+07	24.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
605	220	8.2	1.1E+08	20.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
413	240	8.9	1.2E+08	27.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	0.5	0.7
361	260	9.4	1.1E+08	29.5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	1.1	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	0.0	0.0
812	280	9.9	1.6E+08	24.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.6	0.5	0.1	0.4	0.2
438	300	10.3	1.3E+08	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8	0.2	0.4
308	320	10.7	6.4E+07	21.8	0.3	0.6	0.0	1.3	1.3	1.3	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0
304	340	11.1	2.0E+07	26.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.6	0.0	0.0
249	360	11.4	2.4E+07	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.1	0.4	0.8
505	380	11.7	1.4E+08	24.6	0.0	0.0	0.0	0.8	0.8	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
332	400	12.1	6.6E+07	25.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0
323	420	12.6	4.1E+07	22.7	0.0	0.0	0.0	0.6	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
560	440	13.0	1.6E+08	16.9	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.0	0.0
754	460	13.5	1.1E+08	16.7	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
317	480	13.9	4.7E+07	14.8	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0
645	500	14.3	8.0E+07	18.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
360	530	14.8	5.3E+07	19.1	0.0	0.0	0.0	0.8	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
242	540	14.9	2.4E+07	18.8	0.0	0.0	0.0	1.2	1.4	0.0	0.0	0.8	1.1	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
554	560	15.1	5.5E+07	19.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
281	580	15.3	3.7E+07	23.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
396	600	15.5	3.9E+07	14.7	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	620	15.9	1.9E+06	36.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
130	640	16.3	6.2E+06	30.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
110	680	17.0	9.2E+06	22.7	0.0	0.0	0.0	1.1	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
333	700	17.4	4.2E+07	15.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
150	740	17.8	1.5E+07	20.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
126	760	17.9	1.1E+07	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
97	780	18.1	9.6E+06	21.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
153	801	18.3	1.3E+07	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90	817	18.5	8.7E+06	37.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	2.2	0.0	1.1	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
155	835	18.6	1.5E+07	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
104	859	18.8	1.0E+07	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	890	19.0	1.1E+06	57.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.1	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
176	900	19.1	1.7E+07	20.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
216	960	19.5	2.1E+07	23.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
153	1020	19.8	1.5E+07	19.5	0.0	0.0	0.0	0.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
192	1080	20.0	4.3E+07	18.6	0.0	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
144	1170	20.4	1.4E+07	24.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	1230	20.7	4.8E+06	20.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
138	1330	21.3	7.9E+06	22.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
207	1456	22.1	2.0E+07	16.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
157	1490	22.3	1.3E+07	18.7	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0
161	1560	22.7	1.5E+07	19.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
246	1600	22.9	2.4E+07	22.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	0.0



**Annexe 3. Supplementary material Tables Chapter 4**  
**Core MD07-3081**  
**Table S3 continued**

Total count_MD07-3081				(31)	(32)	(33)	(34)	(35)	(36)	(37)	(38)	(39)	(40)											
Depth	Age	TOTAL DIATOM	TOTAL FRAGMENTS DIATOM	<i>Nitzschia sicula</i>	<i>Nitzschia sicula</i> [error]	<i>Nitzschia</i> spp.	<i>Nitzschia</i> spp. [error]	<i>Paralia sulcata</i>	<i>Paralia sulcata</i> [error]	Pennate benthic	Pennate benthic [error]	Pennate spp.	Pennate spp. [error]	<i>Planktoniella sol</i>	<i>Planktoniella sol</i> [error]	<i>Proboscia alata</i>	<i>Proboscia alata</i> [error]	<i>Psammodyctyon panduriforme</i>	<i>Psammodyctyon panduriforme</i> [error]	<i>Psuedogomphonema kamischaticum</i>	<i>Psuedogomphonema kamischaticum</i> [error]	<i>Rhizosolenia antennata</i>	<i>Rhizosolenia antennata</i> [error]	
[n°]	[cm]	[kyr]	[Valves g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
552	20	1.0	1.6E+08	22.4	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
432	40	1.9	8.5E+07	28.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.0	0.0	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
349	60	2.8	6.9E+07	24.3	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
424	80	3.7	8.4E+07	30.4	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
447	100	4.6	1.3E+08	18.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
327	120	5.2	9.7E+07	24.3	0.0	0.0	0.3	0.6	2.4	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
498	140	5.8	1.5E+08	19.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
330	160	6.4	4.9E+07	24.8	0.0	0.0	0.3	0.6	2.7	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
605	220	8.2	1.1E+08	20.4	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	0.0
413	240	8.9	1.2E+08	27.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
361	260	9.4	1.1E+08	29.5	0.0	0.0	0.3	0.5	0.6	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
812	280	9.9	1.6E+08	24.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
438	300	10.3	1.3E+08	32.3	0.0	0.0	0.2	0.4	0.9	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
308	320	10.7	6.4E+07	21.8	0.0	0.0	0.3	0.6	0.3	0.6	0.6	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
304	340	11.1	2.0E+07	26.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.8	0.5	0.8	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
249	360	11.4	2.4E+07	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
505	380	11.7	1.4E+08	24.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
332	400	12.1	6.6E+07	25.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
323	420	12.6	4.1E+07	22.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
560	440	13.0	1.6E+08	16.9	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
754	460	13.5	1.1E+08	16.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4
317	480	13.9	4.7E+07	14.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
645	500	14.3	8.0E+07	18.1	0.0	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
360	530	14.8	5.3E+07	19.1	0.0	0.0	0.3	0.5	0.6	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
242	540	14.9	2.4E+07	18.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
554	560	15.1	5.5E+07	19.0	0.0	0.0	0.2	0.4	1.6	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
281	580	15.3	3.7E+07	23.4	0.0	0.0	0.4	0.7	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
396	600	15.5	3.9E+07	14.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	620	15.9	1.9E+06	36.1	0.0	0.0	0.0	0.0	8.7	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
130	640	16.3	6.2E+06	30.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
110	680	17.0	9.2E+06	22.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
333	700	17.4	4.2E+07	15.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6
150	740	17.8	1.5E+07	20.2	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
126	760	17.9	1.1E+07	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	2.2	0.0	0.0	0.8	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
97	780	18.1	9.6E+06	21.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
153	801	18.3	1.3E+07	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90	817	18.5	8.7E+06	37.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	2.2	0.0	0.0
155	835	18.6	1.5E+07	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
104	859	18.8	1.0E+07	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	890	19.0	1.1E+06	57.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
176	900	19.1	1.7E+07	20.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
216	960	19.5	2.1E+07	23.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
153	1020	19.8	1.5E+07	19.5	0.0	0.0	0.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
192	1080	20.0	4.3E+07	18.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
144	1170	20.4	1.4E+07	24.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	1230	20.7	4.8E+06	20.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
138	1330	21.3	7.9E+06	22.1	0.0	0.0	1.2	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
207	1456	22.1	2.0E+07	16.2	0.0	0.0	1.0	1.3	1.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
157	1490	22.3	1.3E+07	18.7	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
161	1560	22.7	1.5E+07	19.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
246	1600	22.9	2.4E+07	22.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	0.8	1.1	0.0	0.0	0.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



Annexe 3. Supplementary material Tables Chapter 4  
 Core MD07-3081  
 Table S3 continued

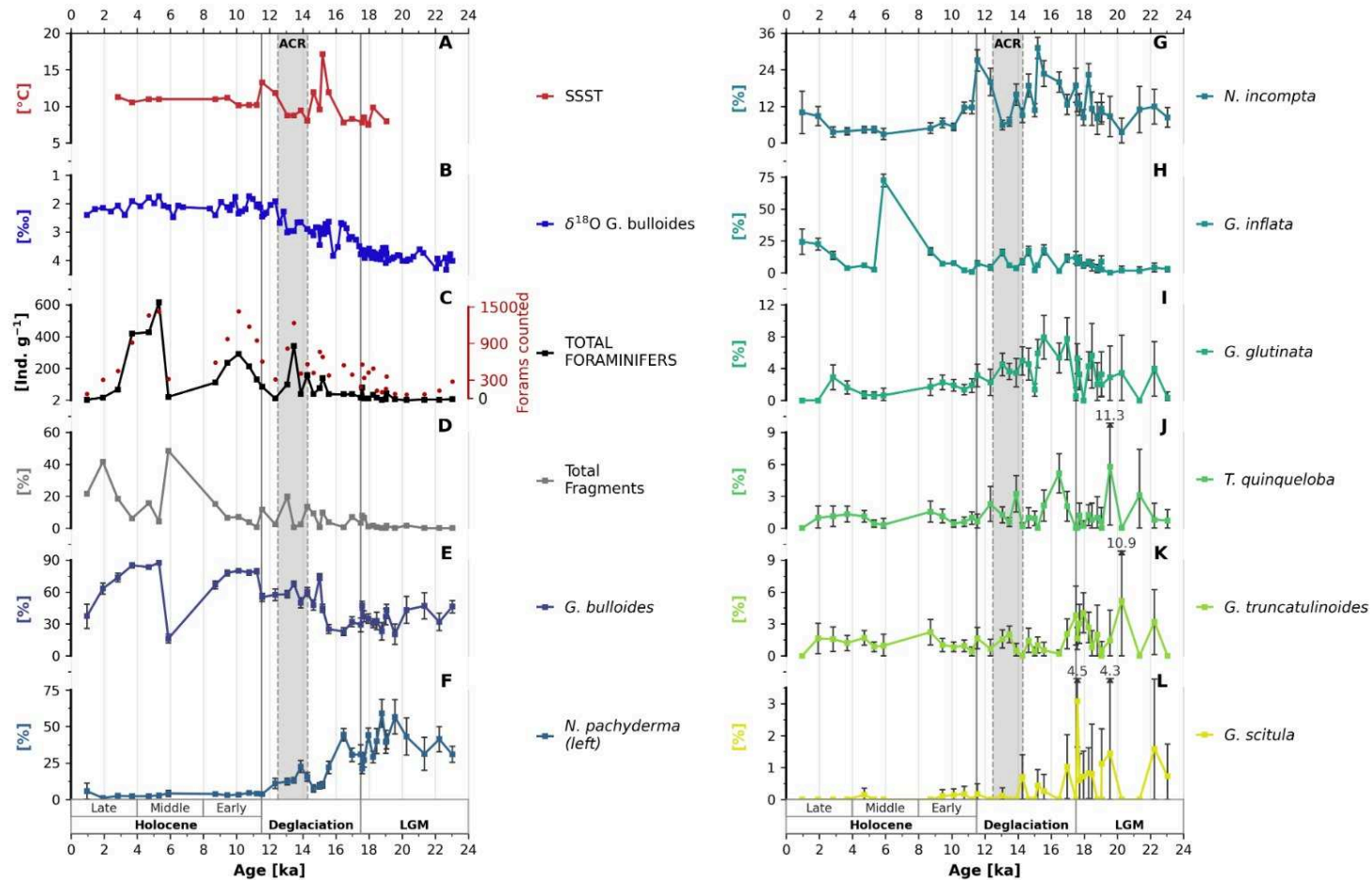
Total count_MD07-3081				(51)		(52)		(53)		(54)		(55)		(56)		(57)		(58)		(59)		(60)	
Depth	Age	TOTAL DIATOM	TOTAL FRAGMENTS DIATOM	<i>Staurastria</i> spp.	<i>Staurastria</i> spp. [error]	<i>Stellarima microtrias</i>	<i>Stellarima microtrias</i> [error]	<i>Stephanodiscus</i> spp.	<i>Stephanodiscus</i> spp. [error]	<i>Stephanopyxis</i> spp.	<i>Stephanopyxis</i> spp. [error]	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>capitata</i>	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>capitata</i> [error]	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>claviforme</i>	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>claviforme</i> [error]	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>inflatum</i>	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>inflatum</i> [error]	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>lancoletum</i>	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>lancoletum</i> [error]	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>nitzschioides</i>	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>nitzschioides</i> [error]	<i>Thalassionema</i> spp.	<i>Thalassionema</i> spp. [error]
[n°]	[cm]	[Valves g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
552	20	1.0	1.6E+08	22.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	4.0	1.6	0.5	0.6
432	40	1.9	8.5E+07	28.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	1.3	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	1.7	0.9	0.9
349	60	2.8	6.9E+07	24.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.6	0.8	0.0	0.0
424	80	3.7	8.4E+07	30.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.9	0.9	0.9	0.9
447	100	4.6	1.3E+08	18.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.1	0.4	0.6	1.6	1.2	0.7	0.8
327	120	5.2	9.7E+07	24.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	1.2	1.2	0.0	0.0
498	140	5.8	1.5E+08	19.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.0	0.2	0.4
330	160	6.4	4.9E+07	24.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	1.5	1.3	0.3	0.6
605	220	8.2	1.1E+08	20.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.6	1.8	1.1	0.0	0.0
413	240	8.9	1.2E+08	27.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.5	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	1.4	0.2	0.5
361	260	9.4	1.1E+08	29.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.3	0.5	0.0	0.0
812	280	9.9	1.6E+08	24.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
438	300	10.3	1.3E+08	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
308	320	10.7	6.4E+07	21.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	2.2	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0
304	340	11.1	2.0E+07	26.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.8	2.3	1.7	0.0	0.0	1.3	1.3	0.0	0.0	0.5	0.8	1.1	1.1
249	360	11.4	2.4E+07	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.4	0.0	0.0	0.4	0.8	0.0	0.0
505	380	11.7	1.4E+08	24.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.9	0.2	0.4	0.0	0.0
332	400	12.1	6.6E+07	25.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	2.1	1.5	0.3	0.6
323	420	12.6	4.1E+07	22.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	4.0	2.1	0.0	0.0
560	440	13.0	1.6E+08	16.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	1.1	0.0	0.0
754	460	13.5	1.1E+08	16.7	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.6	0.0	0.0
317	480	13.9	4.7E+07	14.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	4.1	2.2	0.0	0.0
645	500	14.3	8.0E+07	18.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	1.6	1.0	0.0	0.0
360	530	14.8	5.3E+07	19.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	2.2	0.0	0.0
242	540	14.9	2.4E+07	18.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	2.0	0.0	0.0
554	560	15.1	5.5E+07	19.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	2.0	1.2	0.2	0.4
281	580	15.3	3.7E+07	23.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.7	3.6	2.2	0.4	0.7
396	600	15.5	3.9E+07	14.7	0.5	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.1	1.3	1.1	0.0	0.0
23	620	15.9	1.9E+06	36.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
130	640	16.3	6.2E+06	30.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	3.3	0.0	0.0
110	680	17.0	9.2E+06	22.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	2.2	2.9	3.1	0.0	0.0
333	700	17.4	4.2E+07	15.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
150	740	17.8	1.5E+07	20.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0
126	760	17.9	1.1E+07	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0
97	780	18.1	9.6E+06	21.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0
153	801	18.3	1.3E+07	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.8	0.0	0.0
90	817	18.5	8.7E+06	37.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	2.2	1.1	2.2	0.0	0.0
155	835	18.6	1.5E+07	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
104	859	18.8	1.0E+07	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0
11	890	19.0	1.1E+06	57.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
176	900	19.1	1.7E+07	20.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0
216	960	19.5	2.1E+07	23.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
153	1020	19.8	1.5E+07	19.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
192	1080	20.0	4.3E+07	18.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0
144	1170	20.4	1.4E+07	24.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0
50	1230	20.7	4.8E+06	20.6	2.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
138	1330	21.3	7.9E+06	22.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0
207	1456	22.1	2.0E+07	16.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0
157	1490	22.3	1.3E+07	18.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0
161	1560	22.7	1.5E+07	19.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	0.6	1.2	0.6	1.2
246	1600	22.9	2.4E+07	22.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.8	1.2	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	0.0	0.0	0.8	1.1



**Annexe 3. Supplementary material Tables Chapter 4**  
**Core MD07-3081**  
**Table S3 continued**

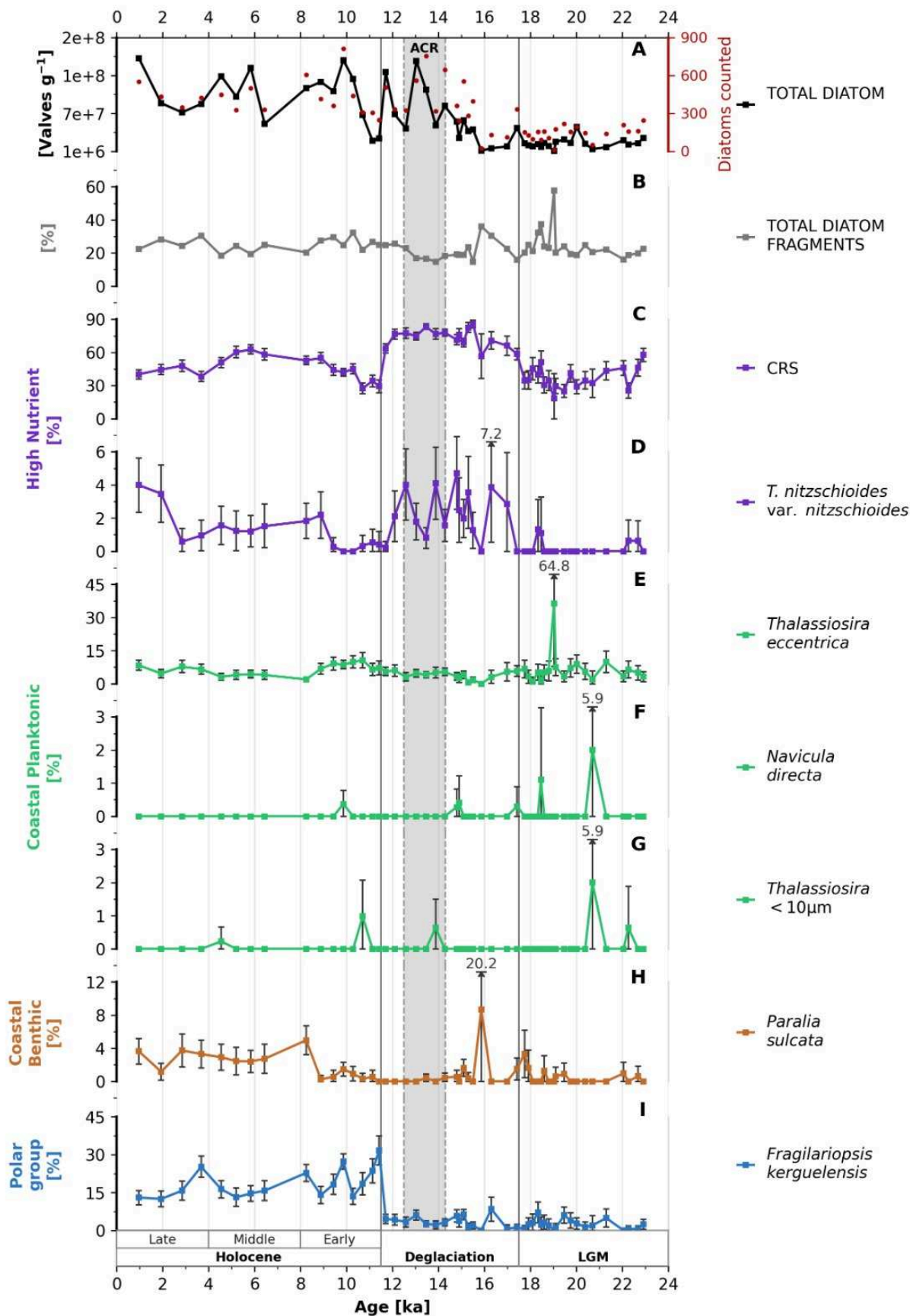
Total count_MD07-3081	Depth	Age	TOTAL DIATOM	TOTAL FRAGMENTS DIATOM	(71)		(72)		(73)		(74)	
					<i>Thalassiosira simonseni</i>	<i>Thalassiosira simonseni</i> [error]	<i>Thalassiosira</i> spp.	<i>Thalassiosira</i> spp. [error]	<i>Thalassiothrix</i> spp.	<i>Thalassiothrix</i> spp. [error]	<i>Trichotoxon</i> spp.	<i>Trichotoxon</i> spp. [error]
[n°]	[cm]	[kyr]	[Valves g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
552	20	1.0	1.6E+08	22.4	0.0	0.0	1.3	0.9	1.3	0.9	0.9	0.8
432	40	1.9	8.5E+07	28.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	1.3	0.2	0.5
349	60	2.8	6.9E+07	24.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	1.2	0.3	0.6
424	80	3.7	8.4E+07	30.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.0	0.5	0.7
447	100	4.6	1.3E+08	18.4	0.0	0.0	1.3	1.1	2.5	1.4	1.1	1.0
327	120	5.2	9.7E+07	24.3	0.0	0.0	1.2	1.2	1.8	1.5	1.8	1.5
498	140	5.8	1.5E+08	19.4	0.0	0.0	0.4	0.6	1.8	1.2	1.4	1.0
330	160	6.4	4.9E+07	24.8	0.3	0.6	2.7	1.8	2.1	1.6	0.0	0.0
605	220	8.2	1.1E+08	20.4	0.2	0.3	1.0	0.8	0.3	0.5	0.3	0.5
413	240	8.9	1.2E+08	27.4	0.0	0.0	1.9	1.3	1.5	1.2	1.9	1.3
361	260	9.4	1.1E+08	29.5	0.3	0.5	1.1	1.1	1.7	1.3	1.1	1.1
812	280	9.9	1.6E+08	24.7	0.0	0.0	0.1	0.2	1.0	0.7	0.2	0.3
438	300	10.3	1.3E+08	32.3	0.0	0.0	1.4	1.1	2.5	1.5	0.5	0.6
308	320	10.7	6.4E+07	21.8	0.0	0.0	0.6	0.9	2.9	1.9	0.3	0.6
304	340	11.1	2.0E+07	26.7	0.0	0.0	1.1	1.1	1.8	1.5	0.8	1.0
249	360	11.4	2.4E+07	25.0	0.0	0.0	1.2	1.4	1.2	1.4	0.4	0.8
505	380	11.7	1.4E+08	24.6	0.0	0.0	1.2	0.9	0.4	0.5	0.2	0.4
332	400	12.1	6.6E+07	25.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6
323	420	12.6	4.1E+07	22.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.9	0.0	0.0
560	440	13.0	1.6E+08	16.9	0.0	0.0	1.6	1.0	1.4	1.0	0.5	0.6
754	460	13.5	1.1E+08	16.7	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
317	480	13.9	4.7E+07	14.8	0.0	0.0	0.9	1.1	0.0	0.0	0.6	0.9
645	500	14.3	8.0E+07	18.1	0.0	0.0	1.1	0.8	0.3	0.4	0.0	0.0
360	530	14.8	5.3E+07	19.1	0.0	0.0	1.4	1.2	2.2	1.5	0.0	0.0
242	540	14.9	2.4E+07	18.8	0.0	0.0	1.2	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0
554	560	15.1	5.5E+07	19.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5	0.6
281	580	15.3	3.7E+07	23.4	0.0	0.0	0.4	0.7	1.4	1.4	0.0	0.0
396	600	15.5	3.9E+07	14.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	0.3	0.5
23	620	15.9	1.9E+06	36.1	0.0	0.0	21.7	16.9	0.0	0.0	0.0	0.0
130	640	16.3	6.2E+06	30.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
110	680	17.0	9.2E+06	22.7	1.1	1.9	0.7	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
333	700	17.4	4.2E+07	15.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
150	740	17.8	1.5E+07	20.2	0.0	0.0	6.0	3.8	1.3	1.8	0.0	0.0
126	760	17.9	1.1E+07	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
97	780	18.1	9.6E+06	21.1	0.0	0.0	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
153	801	18.3	1.3E+07	32.3	0.0	0.0	2.0	2.2	0.0	0.0	1.3	1.8
90	817	18.5	8.7E+06	37.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
155	835	18.6	1.5E+07	24.0	0.0	0.0	3.2	2.8	1.9	2.2	0.0	0.0
104	859	18.8	1.0E+07	23.0	0.0	0.0	2.9	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0
11	890	19.0	1.1E+06	57.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
176	900	19.1	1.7E+07	20.4	0.6	1.1	2.3	2.2	0.0	0.0	1.1	1.6
216	960	19.5	2.1E+07	23.9	0.0	0.0	2.3	2.0	0.9	1.3	0.0	0.0
153	1020	19.8	1.5E+07	19.5	0.0	0.0	5.9	3.7	0.7	1.3	0.7	1.3
192	1080	20.0	4.3E+07	18.6	0.0	0.0	2.2	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0
144	1170	20.4	1.4E+07	24.6	0.0	0.0	1.4	1.9	0.7	1.4	0.0	0.0
50	1230	20.7	4.8E+06	20.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.9
138	1330	21.3	7.9E+06	22.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
207	1456	22.1	2.0E+07	16.2	0.0	0.0	1.4	1.6	1.0	1.3	0.0	0.0
157	1490	22.3	1.3E+07	18.7	0.0	0.0	1.9	2.1	0.6	1.2	0.0	0.0
161	1560	22.7	1.5E+07	19.9	0.0	0.0	1.2	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0
246	1600	22.9	2.4E+07	22.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	0.0	0.0

Annexe 4. Supplementary material Figures Chapter 4  
Core MD07-3081

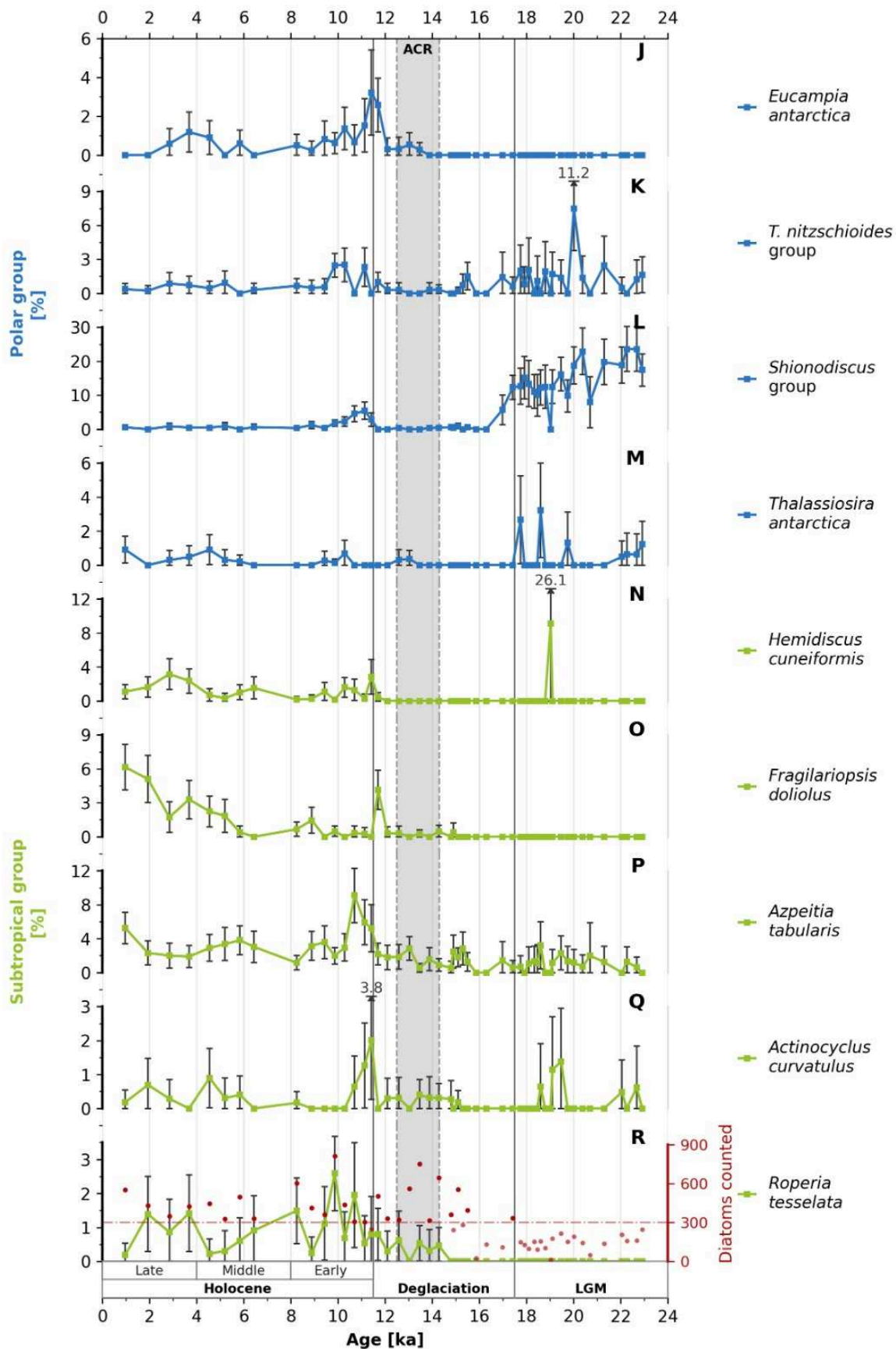


**Figure S1** Records for sediment core MD07-3081 from the last glacial period to the late Holocene. **A)** Reconstruction of Summer Surface Sea temperatures (SSST) ; **B)** Composition isotopique de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) (Martinez Fontaine, 2021) ; **C)** Total foraminifera abundance, red circles indicate the total number of diatoms counted **D)** Percentage of foraminifera fragments and **E-L)** Percentage of all species with abundance  $>2\%$  . Note the different Y axes for the relative percentage of the different planktic foraminifera species.

Annexe 4. Supplementary material Figures Chapter 4  
Core MD07-3081

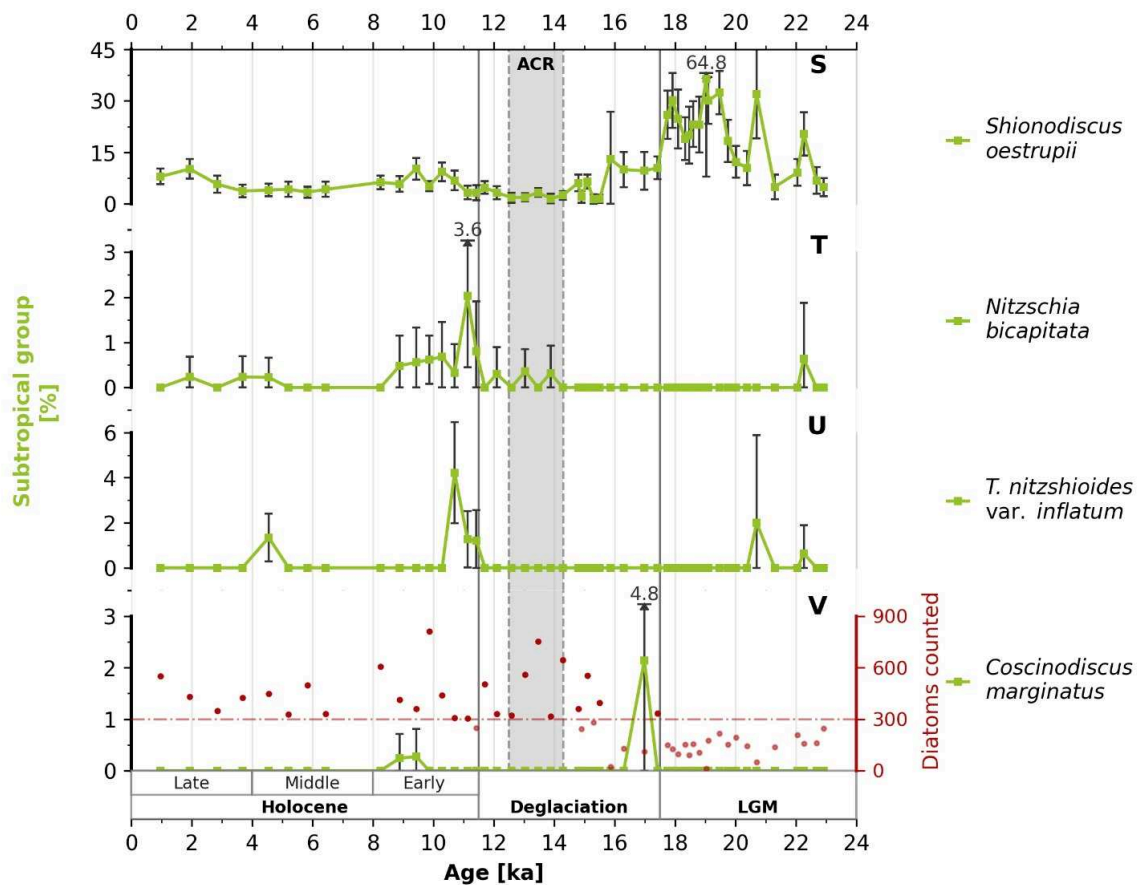


Annexe 4. Supplementary material Figures Chapter 4  
 Figure S2 continued Core MD07-3081





Annexe 4. Supplementary material Figures Chapter 4  
 Figure S2 continued Core MD07-3081



**Figure S2** Records for sediment core MD07-3081 from the last glacial period to the late Holocene. **A)** Total diatom abundance (Valves  $g^{-1}$ ), red circles indicate the total number of diatoms counted ; **B)** Percentage total diatom fragments ; **C-V)** Percentage of diatom species. This graph shows all counts with abundance  $>2\%$ .

# Annexe 5.

**Annexe 5-A** Tableau de pourcentage relative totale des diatomées de la carotte MD07-3100 avec l'erreur associée. Comprend les 58 niveaux analysés. Les comptages inférieurs à 150 valves sont indiqués en couleur grise.

Comptage_MD07-3100	Prof. [cm]	Âge [ka]	TOTAL DIATOMÉES [Valves g-1]	(1) to (10)																																	
				TOTAL FRAGMENTS DIATOMÉES	<i>Actinocyclus curvatus</i>	<i>Actinocyclus curvatus</i> [error]	<i>Actinopychus senarius</i>	<i>Actinopychus senarius</i> [error]	<i>Actinopychus vulgaris</i>	<i>Actinopychus vulgaris</i> [error]	<i>Asteromphalus</i> spp.	<i>Asteromphalus</i> spp. [error]	<i>Aulacoseira granulata</i>	<i>Aulacoseira granulata</i> [error]	<i>Azpetitia tabularis</i>	<i>Azpetitia tabularis</i> [error]	Centric spp.	Centric spp. [error]	<i>Chaetoceros</i> spp.	<i>Chaetoceros</i> spp. [error]	<i>Cocconeis</i> spp. group	<i>Cocconeis</i> spp. group [error]	<i>Coccinodiscus marginatus</i>	<i>Coccinodiscus marginatus</i> [error]													
[n°]	[cm]	[ka]	[Valves g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]				
464	20	0.1	2.2E+07	17.3	0.0	0.0	0.4	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.0	0.0	0.0	1.1	0.9	0.0	0.0	1.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
313	40	0.2	1.5E+07	4.1	0.0	0.0	0.6	0.9	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	1.0	1.1	0.0	0.0	1.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
70	60	0.3	9.9E+06	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
116	80	0.4	5.7E+06	8.8	0.0	0.0	1.7	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
12	100	0.5	5.9E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.0	24.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
1311	120	0.7	1.2E+08	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	0.2	0.3	0.4	0.3	0.0	0.0	1.2	0.6	0.0	0.0	0.8	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
834	140	0.9	7.9E+07	8.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
13	160	1.6	1.1E+06	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.1	17.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
1302	180	1.9	8.5E+07	15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0		
1119	200	2.1	7.3E+07	22.0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1128	220	2.3	7.3E+07	30.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1209	240	2.5	5.9E+07	27.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
91	260	2.7	5.6E+06	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	4.2	0.0	0.0	2.2	3.0	2.2	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2874	280	2.9	1.4E+08	29.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
53	300	3.2	3.4E+06	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1954	320	3.5	1.2E+08	12.7	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.3	0.0	0.0	0.5	0.3	0.0	0.0	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
667	340	3.7	6.8E+07	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	0.3	0.4	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
506	360	4.0	5.0E+07	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
14	380	4.2	9.0E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.6	23.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3	18.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
738	400	4.5	4.4E+07	14.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.6	0.0	0.0	0.3	0.4	0.5	0.5	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	420	5.0	3.5E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1362	440	5.5	8.7E+07	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	1.1	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	460	6.0	1.1E+06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
455	480	6.7	5.4E+07	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
544	500	7.2	5.4E+07	16.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
573	520	7.7	5.6E+07	7.0	0.5	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	1.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
786	540	8.2	7.8E+07	21.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	1.8	0.9	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2226	560	8.7	9.7E+07	29.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2130	580	9.2	1.0E+08	30.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	1.1	0.4	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
880	610	9.9	6.6E+07	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.8	0.6	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1291	620	10.0	1.3E+08	7.6	0.6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.3	0.3	1.2	0.6	0.0	0.0	0.5	0.4	0.0	0.0	0.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
404	655	10.4	3.4E+07	4.2	0.0	0.0	0.5	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
557	685	10.8	4.6E+07	10.9	0.5	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	726	11.2	1.9E+05	38.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	746	11.5	1.1E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0	69.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
308	776	12.0	3.0E+07	11.5	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.9	1.3	1.3	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
308	796	12.3	2.8E+07	4.9	0.6	0.9	0.6	0.9	0.3	0.6	0.6	0.9	0.0	0.0	0.0	1.0	1.1	1.3	1.3	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
199	856	12.9	1.9E+07	8.7	1.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.4	0.0	0.0	1.5	1.7	0.0	0.0	0.																

Annexe 5-A. Suite carotte MD07-3100

Compage_MD07-3100	Prof.	Âge	TOTAL DIATOMÉES	TOTAL FRAGMENTS DIATOMÉES	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)									
					<i>Coccolithus oculus-iridis</i>	<i>Coccolithus oculus-iridis</i> [error]	<i>Coccolithus radiatus</i>	<i>Coccolithus radiatus</i> [error]	<i>Coccolithus spp.</i>	<i>Coccolithus spp.</i> [error]	CRS	CRS [error]	<i>Cyclostephanos spp.</i>	<i>Cyclostephanos spp.</i> [error]	<i>Cycloella litoralis</i>	<i>Cycloella litoralis</i> [error]	<i>Cycloella spp.</i>	<i>Cycloella spp.</i> [error]	<i>Diploneis spp.</i>	<i>Diploneis spp.</i> [error]	<i>Discostella stelligera</i>	<i>Discostella stelligera</i> [error]	
[n°]	[cm]	[ka]	[Valves g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]			
464	20	0.1	2.2E+07	17.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.5	4.5	0.0	0.0	0.4	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
313	40	0.2	1.5E+07	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.5	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.6	0.9
70	60	0.3	9.9E+06	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	51.4	11.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
116	80	0.4	5.7E+06	8.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.9	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	100	0.5	5.9E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7	21.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1311	120	0.7	1.2E+08	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	74.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
834	140	0.9	7.9E+07	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.3	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	160	1.6	1.1E+06	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.5	27.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1302	180	1.9	8.5E+07	15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.7	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3
1119	200	2.1	7.3E+07	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	75.1	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1128	220	2.3	7.3E+07	30.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	80.1	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1209	240	2.5	5.9E+07	27.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	77.2	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
91	260	2.7	5.6E+06	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.4	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2874	280	2.9	1.4E+08	29.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	80.2	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53	300	3.2	3.4E+06	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.8	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1954	320	3.5	1.2E+08	12.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.9	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
667	340	3.7	6.8E+07	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	85.2	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
506	360	4.0	5.0E+07	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	85.6	3.1	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	380	4.2	9.0E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.6	23.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3	18.3	
738	400	4.5	4.4E+07	14.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.9	2.9	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	420	5.0	3.5E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.3	37.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1362	440	5.5	8.7E+07	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	82.5	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	460	6.0	1.1E+06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.6	18.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
455	480	6.7	5.4E+07	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	86.2	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	
544	500	7.2	5.4E+07	16.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	88.1	2.7	0.0	0.0	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
573	520	7.7	5.6E+07	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.6	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	
786	540	8.2	7.8E+07	21.9	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	81.9	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2226	560	8.7	9.7E+07	29.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	82.5	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2130	580	9.2	1.0E+08	30.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.1	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
880	610	9.9	6.6E+07	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	82.4	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1291	620	10.0	1.3E+08	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	82.3	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
404	655	10.4	3.4E+07	4.2	0.0	0.0	0.7	0.8	0.0	74.0	4.3	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
557	685	10.8	4.6E+07	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	72.4	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	726	11.2	1.9E+05	38.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	746	11.5	1.1E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0	69.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
308	776	12.0	3.0E+07	11.5	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	66.6	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.3	0.6
308	796	12.3	2.8E+07	4.9	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	68.8	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0
199	856	12.9	1.9E+07	8.7	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	67.8	6.5	0.0	0.0	1.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
497	876	13.0	3.7E+07	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	65.8	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
116	906	13.2	1.1E+07	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.3	8.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.7	
113	946	13.6	4.8E+07	9.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.7	62.8	8.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
177	1006	14.0	1.7E+07	7.8	0.0	0.0	0.6	1.1	0.0	72.3	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
539	1036	14.2	5.3E+07	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.6	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
376	1066	14.5	3.7E+07	2.2	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	66.5	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0
476	1086	14.8	3.6E+07	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	73.9	3.9	0.0	0.0	0.0	0.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
329	1116	15.2	3.2E+07	0.8	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	81.2	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
408	1146	15.6	4.0E+07	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.7	3.9	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	
735	1166	16.1	6.6E+07	7.3	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	85.9	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
450	1196	16.8	4.4E+07	8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	88.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
450	1216	17.3	4.3E+07	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	73.8	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
507	1256	17.9	4.6E+07	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	71.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	
368	1276	18.2	3.6E+07	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	82.6	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
897	1296	18.5	8.0E+07	10.8	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	72.7	2.9	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
146	1316	18.8	1.4E+07	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.4	7.7	3.4	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.3	
1328	1346	19.2	1.3E+08	17.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	78.2	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
793	1376	19.7	7.5E+07	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.9	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1150	1396	19.9	1.1E+08	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	88.2	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
645	1426	20.2	6.2E+07	15.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.9	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.							

## Annexe 5-A. Suite carotte MD07-3100

Comptage_MD07-3100	Prof.	Âge	TOTAL DIATOMÉES	TOTAL FRAGMENTS DIATOMÉES	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)										
					<i>Ditylum brightwellii</i>	<i>Ditylum brightwellii</i> [error]	<i>Epithemia spp.</i>	<i>Epithemia spp.</i> [error]	<i>Fragilaria capucina</i>	<i>Fragilaria capucina</i> [error]	<i>Fragilariopsis dolohus</i>	<i>Fragilariopsis dolohus</i> [error]	<i>Fragilariopsis kerguelensis</i>	<i>Fragilariopsis kerguelensis</i> [error]	<i>Gomphonema spp.</i>	<i>Gomphonema spp.</i> [error]	<i>Grammatophora spp.</i>	<i>Grammatophora spp.</i> [error]	<i>Hemidiscus cuneiformis</i>	<i>Hemidiscus cuneiformis</i> [error]	<i>Munidiscus chilensis</i>	<i>Munidiscus chilensis</i> [error]	<i>Navicula capitata</i>	<i>Navicula capitata</i> [error]
[n°]	[cm]	[ka]	[Valves g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
464	20	0.1	2.2E+07	17.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
313	40	0.2	1.5E+07	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
70	60	0.3	9.9E+06	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
116	80	0.4	5.7E+06	8.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	100	0.5	5.9E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1311	120	0.7	1.2E+08	10.1	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
834	140	0.9	7.9E+07	8.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	160	1.6	1.1E+06	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1302	180	1.9	8.5E+07	15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1119	200	2.1	7.3E+07	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1128	220	2.3	7.3E+07	30.9	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1209	240	2.5	5.9E+07	27.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
91	260	2.7	5.6E+06	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2874	280	2.9	1.4E+08	29.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53	300	3.2	3.4E+06	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1954	320	3.5	1.2E+08	12.7	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.3	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
667	340	3.7	6.8E+07	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
506	360	4.0	5.0E+07	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	380	4.2	9.0E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
738	400	4.5	4.4E+07	14.8	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	420	5.0	3.5E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1362	440	5.5	8.7E+07	7.5	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	460	6.0	1.1E+06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
455	480	6.7	5.4E+07	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
544	500	7.2	5.4E+07	16.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
573	520	7.7	5.6E+07	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
786	540	8.2	7.8E+07	21.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2226	560	8.7	9.7E+07	29.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2130	580	9.2	1.0E+08	30.7	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
880	610	9.9	6.6E+07	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1291	620	10.0	1.3E+08	7.6	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
404	655	10.4	3.4E+07	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
557	685	10.8	4.6E+07	10.9	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	726	11.2	1.9E+05	38.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	746	11.5	1.1E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
308	776	12.0	3.0E+07	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
308	796	12.3	2.8E+07	4.9	1.3	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
199	856	12.9	1.9E+07	8.7	0.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
497	876	13.0	3.7E+07	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
116	906	13.2	1.1E+07	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
113	946	13.6	4.8E+07	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
177	1006	14.0	1.7E+07	7.8	0.0	0.0	0.6	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
539	1036	14.2	5.3E+07	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
376	1066	14.5	3.7E+07	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
476	1086	14.8	3.6E+07	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.6	0.0	0.0	0.8	0.8	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
329	1116	15.2	3.2E+07	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
408	1146	15.6	4.0E+07	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
735	1166	16.1	6.6E+07	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
450	1196	16.8	4.4E+07	8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.6	0.0	0.0	0.0
450	1216	17.3	4.3E+07	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
507	1256	17.9	4.6E+07	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4
368	1276	18.2	3.6E+07	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
897	1296	18.5	8.0E+07	10.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
146	1316	18.8	1.4E+07	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1328	1346	19.2	1.3E+08	17.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.4	0.0
793	1376	19.7	7.5E+07	11.5																				



## Annexe 5-A. Suite carotte MD07-3100

Comptage_MD07-3100				(41)	(42)	(43)	(44)	(45)	(46)	(47)	(48)	(49)	(50)									
Prof.	Âge	TOTAL DIA TOMÉES	TOTAL FRAGMENTS DIA TOMÉES	Pennate spp.	<i>Planktoniella sol</i>	<i>Planktoniella sol</i> [error]	<i>Planolithidium lanceolatum</i>	<i>Planolithidium lanceolatum</i> [error]	<i>Planolithidium</i> spp.	<i>Planolithidium</i> spp. [error]	<i>Proboscita alata</i>	<i>Proboscita alata</i> [error]	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. [error]	<i>Pseudogomphonema kamschaticum</i>	<i>Pseudogomphonema kamschaticum</i> [error]	<i>Rhizosolenia</i> spp.	<i>Rhizosolenia</i> spp. [error]	<i>Rhopalodia gibba</i>	<i>Rhopalodia gibba</i> [error]	<i>Roperia tessellata</i>	<i>Roperia tessellata</i> [error]
[m]	[ka]	[Valves g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
464	20	0.1	2.2E+07	17.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
313	40	0.2	1.5E+07	4.1	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
70	60	0.3	9.9E+06	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
116	80	0.4	5.7E+06	8.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	100	0.5	5.9E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1311	120	0.7	1.2E+08	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
834	140	0.9	7.9E+07	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	160	1.6	1.1E+06	14.4	12.1	17.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1302	180	1.9	8.5E+07	15.5	0.2	0.3	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1119	200	2.1	7.3E+07	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
1128	220	2.3	7.3E+07	30.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1209	240	2.5	5.9E+07	27.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
91	260	2.7	5.6E+06	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2874	280	2.9	1.4E+08	29.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2
53	300	3.2	3.4E+06	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1954	320	3.5	1.2E+08	12.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
667	340	3.7	6.8E+07	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
506	360	4.0	5.0E+07	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	380	4.2	9.0E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
738	400	4.5	4.4E+07	14.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	420	5.0	3.5E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1362	440	5.5	8.7E+07	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	460	6.0	1.1E+06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
455	480	6.7	5.4E+07	5.2	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
544	500	7.2	5.4E+07	16.3	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
573	520	7.7	5.6E+07	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
786	540	8.2	7.8E+07	21.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2226	560	8.7	9.7E+07	29.6	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
2130	580	9.2	1.0E+08	30.7	0.0	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
880	610	9.9	6.6E+07	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1291	620	10.0	1.3E+08	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
404	655	10.4	3.4E+07	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	0.0	0.0	0.2	0.5
557	685	10.8	4.6E+07	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	726	11.2	1.9E+05	38.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	746	11.5	1.1E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
308	776	12.0	3.0E+07	11.5	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.3	0.6
308	796	12.3	2.8E+07	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0
199	856	12.9	1.9E+07	8.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
497	876	13.0	3.7E+07	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
116	906	13.2	1.1E+07	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
113	946	13.6	4.8E+07	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
177	1006	14.0	1.7E+07	7.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
539	1036	14.2	5.3E+07	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
376	1066	14.5	3.7E+07	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
476	1086	14.8	3.6E+07	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
329	1116	15.2	3.2E+07	0.8	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
408	1146	15.6	4.0E+07	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	0.2	0.5	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
735	1166	16.1	6.6E+07	7.3	0.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
450	1196	16.8	4.4E+07	8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
450	1216	17.3	4.3E+07	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
507	1256	17.9	4.6E+07	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
368	1276	18.2	3.6E+07	4.0	0.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
897	1296	18.5	8.0E+07	10.8	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
146	1316	18.8	1.4E+07	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.3	1.4	1.9	0.0	0.0	0.0	0.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0
1328	1346	19.2	1.3E+08	17.1	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
793	1376	19.7	7.5E+07	11.5	0.9	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1150	1396	19.9	1.1E+08	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
645	1426	20.2	6.2E+07	15.6	0.9	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

## Annexe 5-A. Suite carotte MD07-3100

Compage_MD07-3100	Prof. [cm]	Âge [ka]	TOTAL DIA TOMÉES [Valves g-1]	TOTAL FRAGMENTS DIATOMÉES [%]	(51)	(52)	(53)	(54)	(55)	(56)	(57)	(58)	(59)	(60)					
					<i>Shionodiscus frenguelli</i>	<i>Shionodiscus frenguelli</i> [error]	<i>Shionodiscus oestrupii</i>	<i>Shionodiscus oestrupii</i> [error]	<i>Shionodiscus oestrupii</i> var. <i>venrickiae</i>	<i>Shionodiscus oestrupii</i> var. <i>venrickiae</i> [error]	<i>Shionodiscus poroseriatus</i>	<i>Shionodiscus poroseriatus</i> [error]	<i>Shionodiscus</i> spp.	<i>Shionodiscus</i> spp. [error]	<i>Shionodiscus trifidus</i>	<i>Shionodiscus trifidus</i> [error]	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i> [error]	<i>Staurosira</i> spp.
464	20	0.1	2.2E+07	17.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
313	40	0.2	1.5E+07	4.1	0.3	0.6	1.3	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
70	60	0.3	9.9E+06	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	2.8	0.0	0.0					
116	80	0.4	5.7E+06	8.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
12	100	0.5	5.9E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
1311	120	0.7	1.2E+08	10.1	0.2	0.3	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
834	140	0.9	7.9E+07	8.0	0.0	0.0	1.3	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
13	160	1.6	1.1E+06	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
1302	180	1.9	8.5E+07	15.5	0.5	0.4	2.8	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
1119	200	2.1	7.3E+07	22.0	0.0	0.0	1.9	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
1128	220	2.3	7.3E+07	30.9	0.0	0.0	1.3	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
1209	240	2.5	5.9E+07	27.5	0.0	0.0	1.0	0.6	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0					
91	260	2.7	5.6E+06	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
2874	280	2.9	1.4E+08	29.2	0.2	0.2	2.9	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
53	300	3.2	3.4E+06	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
1954	320	3.5	1.2E+08	12.7	0.9	0.4	2.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
667	340	3.7	6.8E+07	5.6	0.3	0.4	1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
506	360	4.0	5.0E+07	4.1	0.2	0.4	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
14	380	4.2	9.0E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
738	400	4.5	4.4E+07	14.8	0.5	0.5	3.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
6	420	5.0	3.5E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
1362	440	5.5	8.7E+07	7.5	0.2	0.2	3.1	0.9	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0					
17	460	6.0	1.1E+06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
455	480	6.7	5.4E+07	5.2	0.9	0.9	0.7	0.7	0.0	0.0	0.7	0.7	1.5	1.1					
544	500	7.2	5.4E+07	16.3	1.5	1.0	1.1	0.9	0.0	0.0	0.6	0.6	0.4	0.5					
573	520	7.7	5.6E+07	7.0	1.2	0.9	1.4	1.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.7	2.6					
786	540	8.2	7.8E+07	21.9	0.5	0.5	2.5	1.1	0.0	0.0	1.3	0.8	0.3	0.4					
2226	560	8.7	9.7E+07	29.6	0.3	0.2	3.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.3					
2130	580	9.2	1.0E+08	30.7	0.0	0.0	2.5	0.7	0.0	0.0	0.3	0.2	0.3	0.2					
880	610	9.9	6.6E+07	9.4	0.3	0.4	1.1	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.7					
1291	620	10.0	1.3E+08	7.6	0.3	0.3	1.1	0.6	0.0	0.0	0.2	0.3	1.0	0.5					
404	655	10.4	3.4E+07	4.2	0.2	0.5	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7					
557	685	10.8	4.6E+07	10.9	0.2	0.4	1.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
2	726	11.2	1.9E+05	38.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
2	746	11.5	1.1E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
308	776	12.0	3.0E+07	11.5	0.6	0.9	2.6	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
308	796	12.3	2.8E+07	4.9	0.6	0.9	2.6	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
199	856	12.9	1.9E+07	8.7	0.0	0.0	1.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
497	876	13.0	3.7E+07	10.4	0.3	0.5	1.6	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
116	906	13.2	1.1E+07	3.7	1.7	2.4	1.7	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
113	946	13.6	4.8E+07	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
177	1006	14.0	1.7E+07	7.8	0.6	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
539	1036	14.2	5.3E+07	10.9	0.6	0.6	1.3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
376	1066	14.5	3.7E+07	2.2	0.0	0.0	1.9	1.4	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.8					
476	1086	14.8	3.6E+07	6.7	0.0	0.0	0.4	0.6	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0					
329	1116	15.2	3.2E+07	0.8	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6					
408	1146	15.6	4.0E+07	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5					
735	1166	16.1	6.6E+07	7.3	0.0	0.0	1.6	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
450	1196	16.8	4.4E+07	8.4	0.0	0.0	1.6	1.1	0.0	0.0	0.9	0.9	0.0	0.0					
450	1216	17.3	4.3E+07	3.4	0.0	0.0	0.9	0.9	0.0	0.0	0.2	0.4	0.4	0.6					
507	1256	17.9	4.6E+07	8.6	0.8	0.8	1.6	1.1	0.0	0.0	0.8	0.8	2.4	1.3					
368	1276	18.2	3.6E+07	4.0	0.3	0.5	2.4	1.6	0.0	0.0	1.4	1.2	0.0	0.0					
897	1296	18.5	8.0E+07	10.8	0.0	0.0	2.5	1.0	0.0	0.0	1.8	0.9	0.6	0.5					
146	1316	18.8	1.4E+07	4.6	1.4	1.9	0.7	1.3	0.0	0.0	1.4	1.9	0.0	0.0					
1328	1346	19.2	1.3E+08	17.1	0.5	0.4	4.0	1.1	0.0	0.0	2.9	0.9	0.0	0.0					
793	1376	19.7	7.5E+07	11.5	1.6	0.9	1.8	0.9	0.0	0.0	1.6	0.9	0.6	0.6					
1150	1396	19.9	1.1E+08	6.1	0.6	0.4	0.6	0.4	0.0	0.0	1.0	0.6	0.0	0.0					
645	1426	20.2	6.2E+07	15.6	0.0	0.0	3.9	1.5	0.0	0.0	1.6	1.0	0.3	0.4					





## Annexe 5-A. Suite carotte MD07-3100

Compage_MD07-3100	Prof.	Age	TOTAL DIATOMÉES	TOTAL FRAGMENTS DIATOMÉES	(71)	(72)	(73)	(74)	(75)	(76)	(77)							
					<i>Thalassiosira eccentrica</i>	<i>Thalassiosira eccentrica</i> [error]	<i>Thalassiosira lineata</i>	<i>Thalassiosira lineata</i> [error]	<i>Thalassiosira pacifica</i>	<i>Thalassiosira pacifica</i> [error]	<i>Thalassiosira simonsenii</i>	<i>Thalassiosira simonsenii</i> [error]	<i>Thalassiosira</i> spp.	<i>Thalassiosira</i> spp. [error]	<i>Thalassiothrix</i> spp.	<i>Thalassiothrix</i> spp. [error]	<i>Trichotoxon</i> spp.	<i>Trichotoxon</i> spp. [error]
[n°]	[cm]	[ka]	[Valves g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
464	20	0.1	2.2E+07	17.3	8.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.8	0.0	0.0	1.1	0.9		
313	40	0.2	1.5E+07	4.1	6.7	2.8	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.3	0.6	
70	60	0.3	9.9E+06	7.7	8.6	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
116	80	0.4	5.7E+06	8.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12	100	0.5	5.9E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1311	120	0.7	1.2E+08	10.1	3.3	1.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	1.6	0.7	0.0	0.0	0.0	
834	140	0.9	7.9E+07	8.0	6.5	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.5	0.0	
13	160	1.6	1.1E+06	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1302	180	1.9	8.5E+07	15.5	4.1	1.1	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.9	0.5	0.2	0.3	0.2	0.3
1119	200	2.1	7.3E+07	22.0	6.2	1.4	0.0	0.0	0.5	0.4	0.0	0.0	0.5	0.4	1.1	0.6	0.3	0.3
1128	220	2.3	7.3E+07	30.9	4.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4
1209	240	2.5	5.9E+07	27.5	6.9	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.7	1.0	0.6	0.7	0.5
91	260	2.7	5.6E+06	4.7	2.2	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2874	280	2.9	1.4E+08	29.2	5.8	0.9	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2	0.2	0.8	0.3	0.6	0.3	0.4	0.2
53	300	3.2	3.4E+06	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1954	320	3.5	1.2E+08	12.7	3.9	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	1.2	0.5	0.3	0.2	0.0	0.0
667	340	3.7	6.8E+07	5.6	3.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
506	360	4.0	5.0E+07	4.1	3.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
14	380	4.2	9.0E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
738	400	4.5	4.4E+07	14.8	6.8	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
6	420	5.0	3.5E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1362	440	5.5	8.7E+07	7.5	2.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0
17	460	6.0	1.1E+06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
455	480	6.7	5.4E+07	5.2	3.1	1.6	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
544	500	7.2	5.4E+07	16.3	1.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0
573	520	7.7	5.6E+07	7.0	4.7	1.7	0.7	0.7	0.3	0.5	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
786	540	8.2	7.8E+07	21.9	1.3	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0
2226	560	8.7	9.7E+07	29.6	3.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
2130	580	9.2	1.0E+08	30.7	5.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	1.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
880	610	9.9	6.6E+07	9.4	6.4	1.6	0.7	0.5	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1291	620	10.0	1.3E+08	7.6	6.9	1.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.2	0.3	0.4	0.3	0.0	0.0
404	655	10.4	3.4E+07	4.2	11.9	3.2	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8
557	685	10.8	4.6E+07	10.9	17.4	3.1	0.0	0.0	2.5	1.3	0.0	0.0	0.9	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
2	726	11.2	1.9E+05	38.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	746	11.5	1.1E+05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
308	776	12.0	3.0E+07	11.5	17.5	4.2	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
308	796	12.3	2.8E+07	4.9	13.6	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.1	0.3	0.6	0.3	0.6
199	856	12.9	1.9E+07	8.7	12.6	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
497	876	13.0	3.7E+07	10.4	21.0	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	0.3	0.5	0.3	0.5
116	906	13.2	1.1E+07	3.7	19.8	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
113	946	13.6	4.8E+07	9.0	19.5	7.3	0.9	1.7	0.9	1.7	0.0	0.0	0.9	1.7	0.0	0.0	0.9	1.7
177	1006	14.0	1.7E+07	7.8	14.7	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0
539	1036	14.2	5.3E+07	10.9	12.4	2.8	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
376	1066	14.5	3.7E+07	2.2	6.9	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5
476	1086	14.8	3.6E+07	6.7	3.8	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0
329	1116	15.2	3.2E+07	0.8	4.6	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	0.0	0.0	0.3	0.6
408	1146	15.6	4.0E+07	3.0	2.9	1.6	0.0	0.0	0.2	0.5	0.0	0.0	2.0	1.3	0.2	0.5	0.2	0.5
735	1166	16.1	6.6E+07	7.3	3.3	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0
450	1196	16.8	4.4E+07	8.4	2.7	1.5	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	1.3	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0
450	1216	17.3	4.3E+07	3.4	10.7	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0
507	1256	17.9	4.6E+07	8.6	12.2	2.9	0.0	0.0	0.4	0.5	0.0	0.0	3.6	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
368	1276	18.2	3.6E+07	4.0	6.8	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	1.1	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0
897	1296	18.5	8.0E+07	10.8	12.2	2.1	0.0	0.0	1.1	0.7	0.0	0.0	2.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0
146	1316	18.8	1.4E+07	4.6	4.8	3.5	0.0	0.0	1.4	1.9	0.0	0.0	1.4	1.9	0.7	1.3	0.0	0.0
1328	1346	19.2	1.3E+08	17.1	3.2	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0
793	1376	19.7	7.5E+07	11.5	8.6	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0
1150	1396	19.9	1.1E+08	6.1	6.5	1.4	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
645	1426	20.2	6.2E+07	15.6	2.2	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0









# Annexe 5-B. Suite carotte MD07-3088

Compage_MD07-3088														(41)	(42)	(43)	(44)	(45)	(46)	(47)	(48)	(49)	(50)	
	Prof.	Age	TOTAL DIATOMÉES	TOTAL FRAGMENTS DIATOMÉES	<i>Shionodiscus franguliti</i>	<i>Shionodiscus franguliti</i> [error]	<i>Shionodiscus gracilis</i>	<i>Shionodiscus gracilis</i> [error]	<i>Shionodiscus oestrupii</i>	<i>Shionodiscus oestrupii</i> [error]	<i>Shionodiscus porosariatus</i>	<i>Shionodiscus porosariatus</i> [error]	<i>Shionodiscus</i> spp.	<i>Shionodiscus</i> spp. [error]	<i>Shionodiscus trifolius</i>	<i>Shionodiscus trifolius</i> [error]	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i> [error]	<i>Stephanopsis</i> spp.	<i>Stephanopsis</i> spp. [error]	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>capitulum</i>	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>capitata</i>	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>inflatum</i>	<i>Thalassionema nitzschioides</i> var. <i>inflatum</i> [error]
[n°]	[cm]	[ka]	[Valves g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
40	5	0.25	6.0E+06	38.22	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	6.8	5.0	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	14	0.34	1.1E+06	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
579	32	0.53	8.5E+07	9.65	0.5	0.6	0.0	0.0	2.2	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	0.0	0.0	1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
80	54	0.75	4.5E+06	6.92	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	3.4	0.0	0.0	1.3	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0
432	72	0.92	4.6E+07	22.23	1.1	1.0	0.0	0.0	2.9	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.6	1.0	0.9	1.0	0.9	0.0	0.0	1.0	0.9
398	92	1.09	5.9E+07	20.95	0.0	0.0	0.5	0.7	5.5	2.2	0.5	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
119	108	1.23	1.2E+07	14.94	0.8	1.6	0.0	0.0	0.8	1.6	0.0	0.0	0.8	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0
1143	132	1.44	1.7E+08	14.33	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.7	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
492	152	1.62	1.8E+08	24.24	0.4	0.6	0.0	0.0	1.0	0.9	0.0	0.0	0.2	0.4	0.2	0.4	0.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
169	176	2.03	1.7E+07	8.40	0.6	1.2	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.6	0.0	0.6	1.2	0.6	1.2	0.6	1.2	0.6
688	192	2.37	1.0E+08	12.89	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
108	212	2.79	1.6E+07	10.83	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
591	232	3.17	8.7E+07	6.39	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	1.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.2	0.3	0.3	0.5	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
679	256	3.59	5.0E+07	20.80	0.6	0.6	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.9	0.9	0.7	1.6	0.9	0.0	0.0	0.3	0.4
164	274	3.92	2.5E+07	17.50	0.6	1.2	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0	0.6	1.2	0.6	1.2	0.0	0.0	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0
428	292	4.32	1.1E+08	8.32	1.6	1.2	0.0	0.0	1.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
1172	312	4.78	1.7E+08	16.37	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
1055	332	5.23	1.1E+08	20.03	0.9	0.6	0.0	0.0	0.7	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.1	0.2	2.6	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1127	352	5.68	2.0E+08	22.00	0.1	0.2	0.0	0.0	1.2	0.6	0.1	0.2	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
646	362	5.92	9.6E+07	2.68	0.2	0.3	0.0	0.0	3.1	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
798	374	6.14	1.2E+08	5.96	0.3	0.3	0.0	0.0	3.4	1.3	0.4	0.4	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
892	394	6.51	6.8E+07	15.31	0.7	0.5	0.0	0.0	2.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.6	1.7	0.8	0.4	0.4	0.0	0.0	0.2	0.3
1663	412	6.83	1.1E+08	16.98	0.5	0.4	0.0	0.0	0.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.4	0.8	0.4	0.1	0.2	0.0	0.0	0.2	0.2
179	432	7.18	2.7E+07	10.05	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
573	452	7.54	8.5E+07	6.09	0.3	0.5	0.3	0.5	5.2	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
910	472	7.90	1.4E+08	2.23	1.3	0.7	0.0	0.0	4.1	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1083	492	8.28	1.1E+08	10.42	0.3	0.3	0.0	0.0	2.2	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
907	514	8.71	1.4E+08	3.98	0.7	0.5	0.3	0.3	6.6	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
505	534	9.10	7.3E+07	16.70	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.7	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
180	554	9.49	5.6E+07	15.79	1.1	1.5	0.0	0.0	2.2	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
154	592	10.13	5.0E+07	25.96	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
243	632	10.88	4.6E+07	12.03	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
101	648	11.16	1.5E+07	31.87	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
199	654	11.27	3.1E+07	19.92	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
187	674	11.72	2.8E+07	10.74	0.0	0.0	1.1	1.5	3.2	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
177	714	13.01	2.8E+07	18.62	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
192	754	13.57	2.8E+07	16.35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
138	776	13.79	1.1E+07	16.64	0.0	0.0	0.5	1.1	3.1	2.9	0.0	0.0	0.5	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.6	0.0	0.0	0.5	1.1
65	798	14.36	1.1E+07	12.16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	814	14.90	4.1E+06	9.28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	834	15.53	1.9E+06	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	856	16.07	7.6E+04	80.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	876	16.64	1.3E+06	63.64	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.2	27.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	914	17.64	3.4E+06	20.93	0.0	0.0	0.0	0.0	23.5	20.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	934	17.89	1.7E+06	27.27	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7	21.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
69	1014	18.30	1.5E+07	9.04	1.9	3.2	0.0	0.0	29.3	10.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60	1054	18.49	8.9E+06	6.98	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54	1106	18.67	7.8E+06	7.69	0.0	0.0	0.0	0.0	20.4	10.7	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	1216	19.04	2.2E+06	12.33	0.0	0.0	0.0	0.0	18.8	19.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1254	19.17	1.5E+06	18.37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	1294	19.30	1.0E+06	27.08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	1318	19.37	1.9E+06	0.00	15.4	19.6	0.0	0.0	15.4	19.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1402	19.62	3.2E+05	37.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	35.1	20.0	35.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	1500	19.88	5.8E+05	36.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0	49.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	1618	20.23	3.1E+06	12.33																				



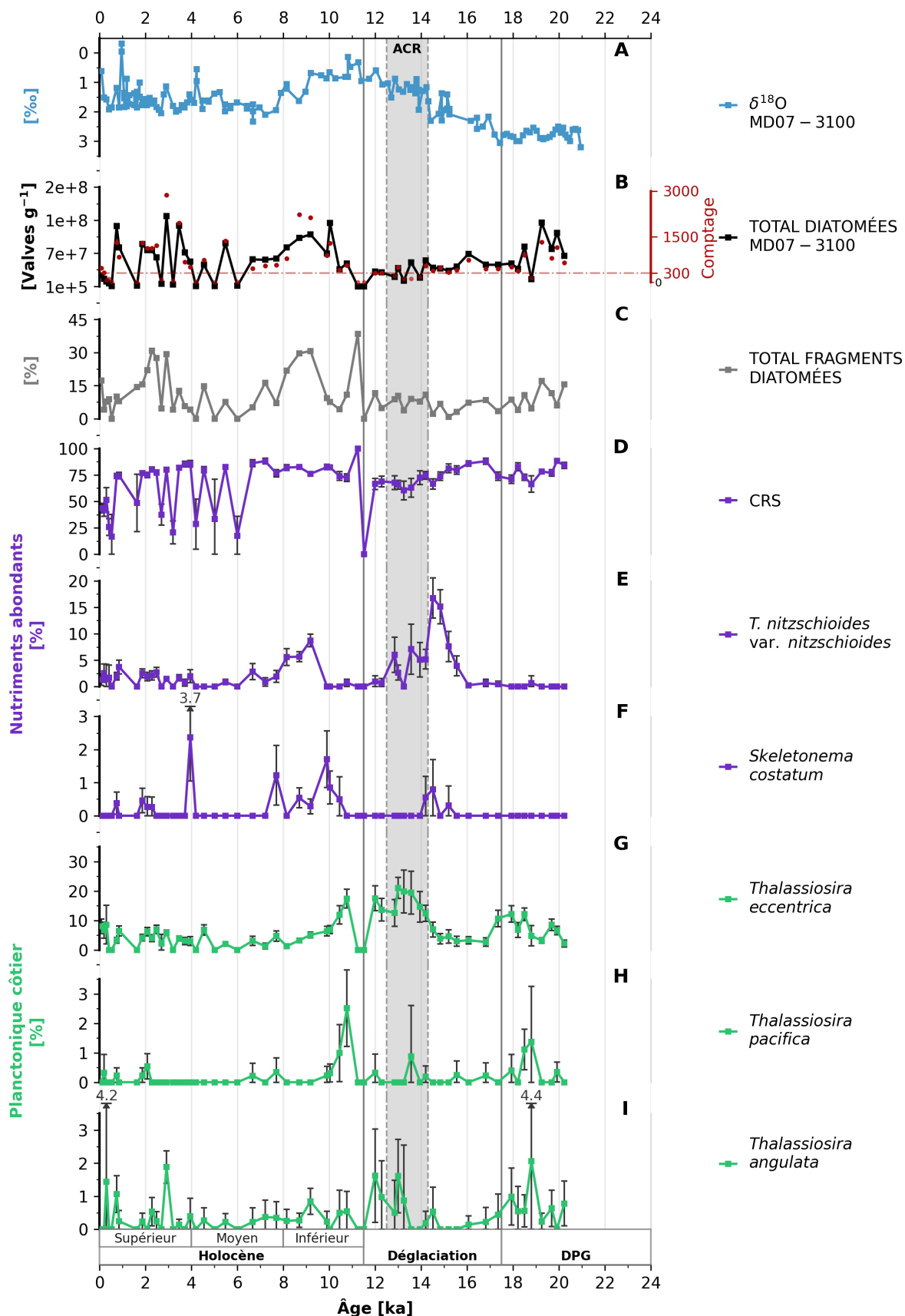
## Annexe 5-B. Suite carotte MD07-3088

Comptage MD07-3088				(61)	(62)	(63)	(64)				
Prof.	Age	TOTAL DIATOMÉES	TOTAL FRAGMENTS DIATOMÉES	<i>Thalassioira simonsenii</i>	<i>Thalassioira simonsenii</i> [error]	<i>Thalassioira spp.</i>	<i>Thalassioira spp.</i> [error]	<i>Thalassiothrix spp.</i>	<i>Thalassiothrix spp.</i> [error]	<i>Trichooxon spp.</i>	<i>Trichooxon spp.</i> [error]
[n°]	[cm]	[ka]	[Valves g-1]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
40	5	0.25	6.0E+06	38.22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	14	0.34	1.1E+06	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
579	32	0.53	8.5E+07	9.65	0.3	0.5	1.6	1.0	2.4	1.3	0.0
80	54	0.75	4.5E+06	6.92	0.0	0.0	1.3	2.4	0.0	0.0	0.0
432	72	0.92	4.6E+07	22.23	0.0	0.0	0.3	0.5	0.7	0.8	0.0
398	92	1.09	5.9E+07	20.95	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
119	108	1.23	1.2E+07	14.94	0.0	0.0	0.8	1.6	0.0	0.0	1.6
1143	132	1.44	1.7E+08	14.33	0.0	0.0	0.5	0.4	0.2	0.2	0.0
492	152	1.62	1.8E+08	24.24	0.4	0.6	0.8	0.8	1.2	1.0	0.0
169	176	2.03	1.7E+07	8.40	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.6	0.6
688	192	2.37	1.0E+08	12.89	0.0	0.0	0.4	0.5	1.2	0.8	0.0
108	212	2.79	1.6E+07	10.83	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
591	232	3.17	8.7E+07	6.39	0.0	0.0	0.2	0.3	1.7	1.0	0.0
679	256	3.59	5.0E+07	20.80	0.0	0.0	1.2	0.8	0.4	0.5	0.0
164	274	3.92	2.5E+07	17.50	0.0	0.0	1.2	1.7	0.0	0.0	0.6
428	292	4.32	1.1E+08	8.32	0.7	0.8	1.2	1.0	1.9	1.3	0.0
1172	312	4.78	1.7E+08	16.37	0.0	0.0	1.1	0.6	0.4	0.4	0.0
1055	332	5.23	1.1E+08	20.03	0.0	0.0	0.5	0.4	0.1	0.2	0.5
1127	352	5.68	2.0E+08	22.00	0.0	0.0	0.3	0.3	0.2	0.2	0.0
646	362	5.92	9.6E+07	2.68	0.0	0.0	1.9	1.0	0.0	0.0	0.0
798	374	6.14	1.2E+08	5.96	0.3	0.3	2.6	1.1	0.3	0.3	0.0
892	394	6.51	6.8E+07	15.31	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0
1663	412	6.83	1.1E+08	16.98	0.0	0.0	1.5	0.6	0.0	0.0	0.4
179	432	7.18	2.7E+07	10.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.1	0.0
573	452	7.54	8.5E+07	6.09	0.0	0.0	0.9	0.8	2.4	1.3	0.0
910	472	7.90	1.4E+08	2.23	0.0	0.0	0.7	0.5	0.5	0.5	0.0
1083	492	8.28	1.1E+08	10.42	0.0	0.0	0.3	0.3	0.8	0.5	0.0
907	514	8.71	1.4E+08	3.98	0.0	0.0	1.0	0.7	1.0	0.7	0.0
505	534	9.10	7.3E+07	16.70	0.0	0.0	1.4	1.0	2.0	1.2	0.0
180	554	9.49	5.6E+07	15.79	1.7	1.9	1.1	1.5	1.7	1.9	0.0
154	592	10.13	5.0E+07	25.96	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	3.1	0.0
243	632	10.88	4.6E+07	12.03	0.0	0.0	1.2	1.4	0.0	0.0	0.0
101	648	11.16	1.5E+07	31.87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
199	654	11.27	3.1E+07	19.92	0.0	0.0	2.0	1.9	2.0	1.9	0.0
187	674	11.72	2.8E+07	10.74	1.1	1.5	2.7	2.3	3.2	2.5	0.0
177	714	13.01	2.8E+07	18.62	0.0	0.0	3.4	2.7	0.0	0.0	0.0
192	754	13.57	2.8E+07	16.35	0.0	0.0	1.0	1.4	0.0	0.0	0.0
138	776	13.79	1.1E+07	16.64	0.0	0.0	1.9	2.3	0.5	1.1	0.9
65	798	14.36	1.1E+07	12.16	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	5.1	0.0
22	814	14.90	4.1E+06	9.28	0.0	0.0	9.1	12.0	0.0	0.0	0.0
4	834	15.53	1.9E+06	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	856	16.07	7.6E+04	80.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	876	16.64	1.3E+06	63.64	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	914	17.64	3.4E+06	20.93	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	934	17.89	1.7E+06	27.27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
69	1014	18.30	1.5E+07	9.04	0.0	0.0	1.9	3.2	0.0	0.0	0.0
60	1054	18.49	8.9E+06	6.98	3.3	4.5	3.3	4.5	3.3	4.5	0.0
54	1106	18.67	7.8E+06	7.69	0.0	0.0	9.3	7.7	0.0	0.0	0.0
16	1216	19.04	2.2E+06	12.33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1254	19.17	1.5E+06	18.37	0.0	0.0	20.0	24.8	0.0	0.0	0.0
6	1294	19.30	1.0E+06	27.08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	1318	19.37	1.9E+06	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1402	19.62	3.2E+05	37.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	1500	19.88	5.8E+05	36.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	1618	20.23	3.1E+06	12.33	0.0	0.0	12.5	16.2	0.0	0.0	0.0
4	1700	20.49	7.9E+05	20.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	1880	21.88	2.5E+06	57.50	0.0	0.0	5.9	11.2	0.0	0.0	0.0

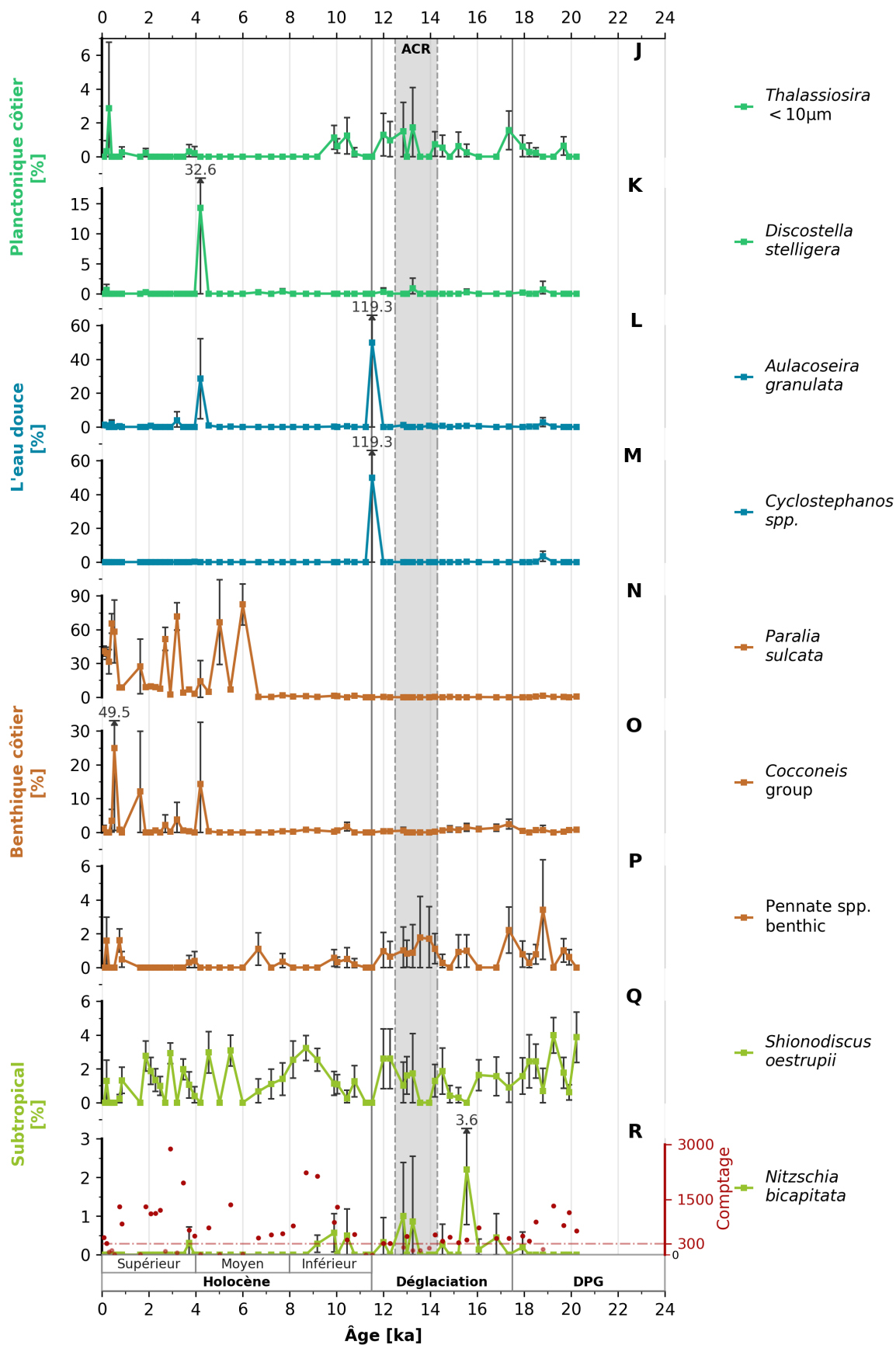


Annexe 6.

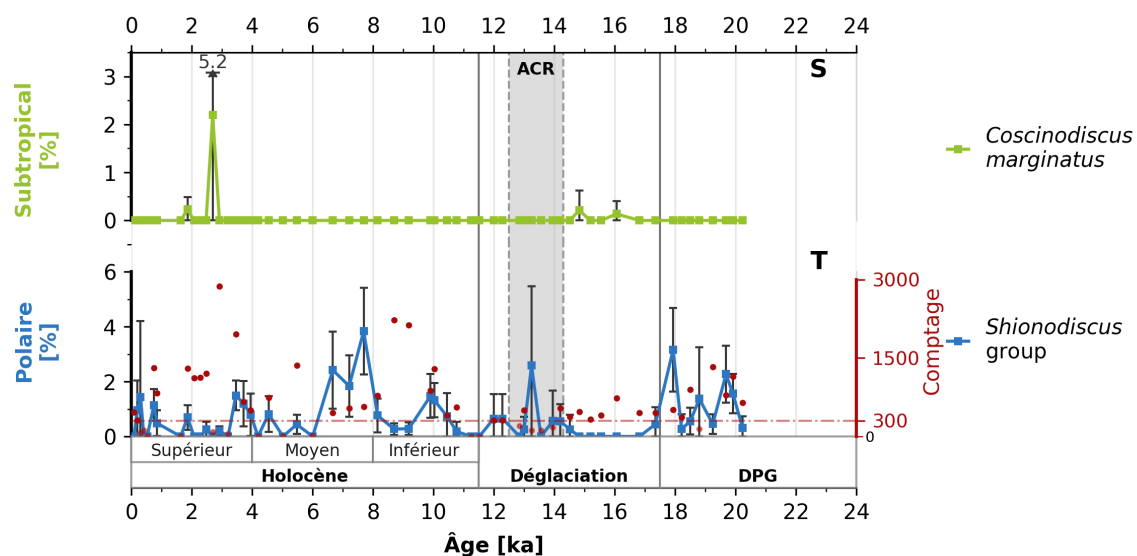
Annexe 6-A. Carotte MD07-3100



# Annexe 6-A. Suite carotte MD07-3100

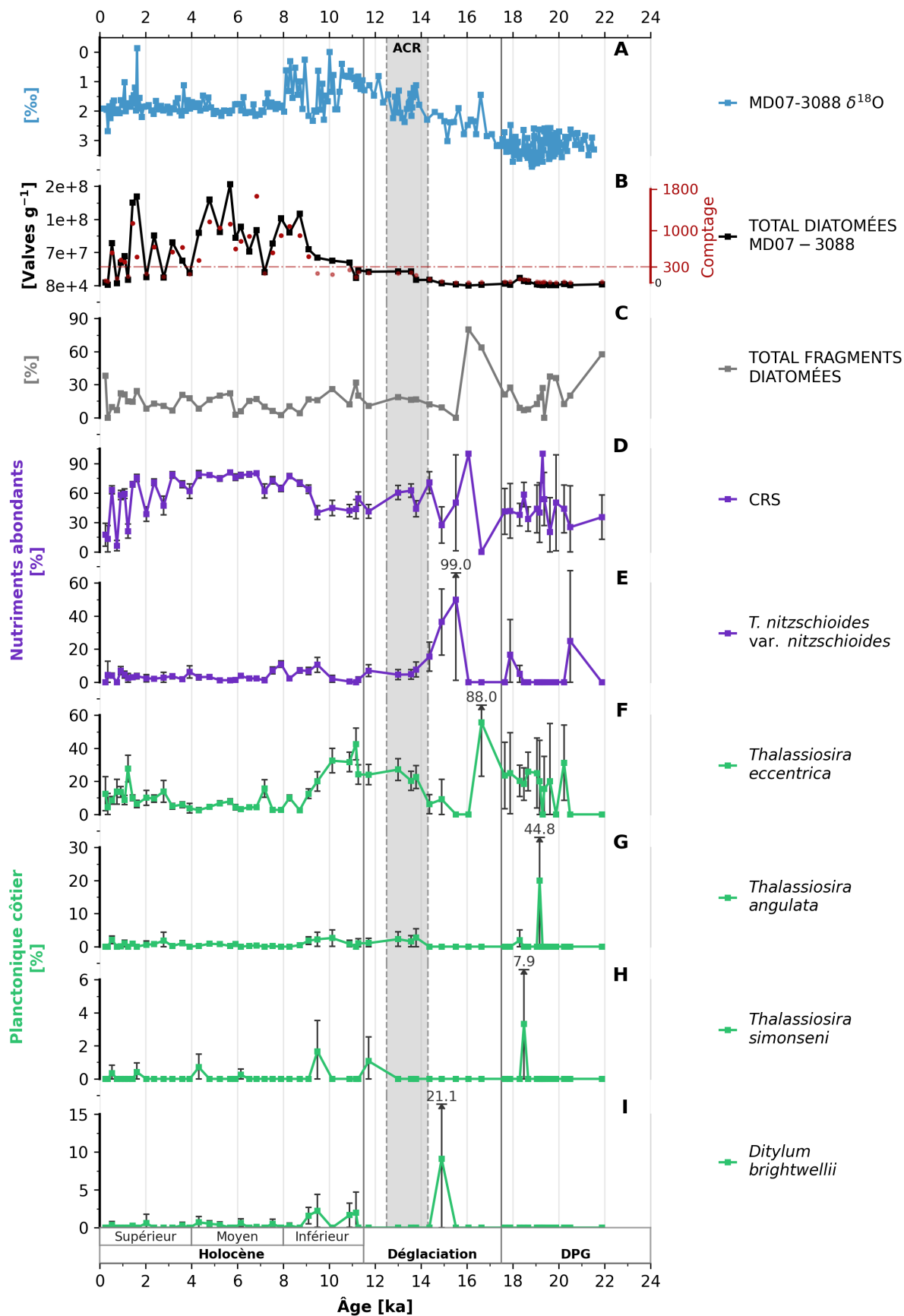


## Annexe 6-A. Suite carotte MD07-3100

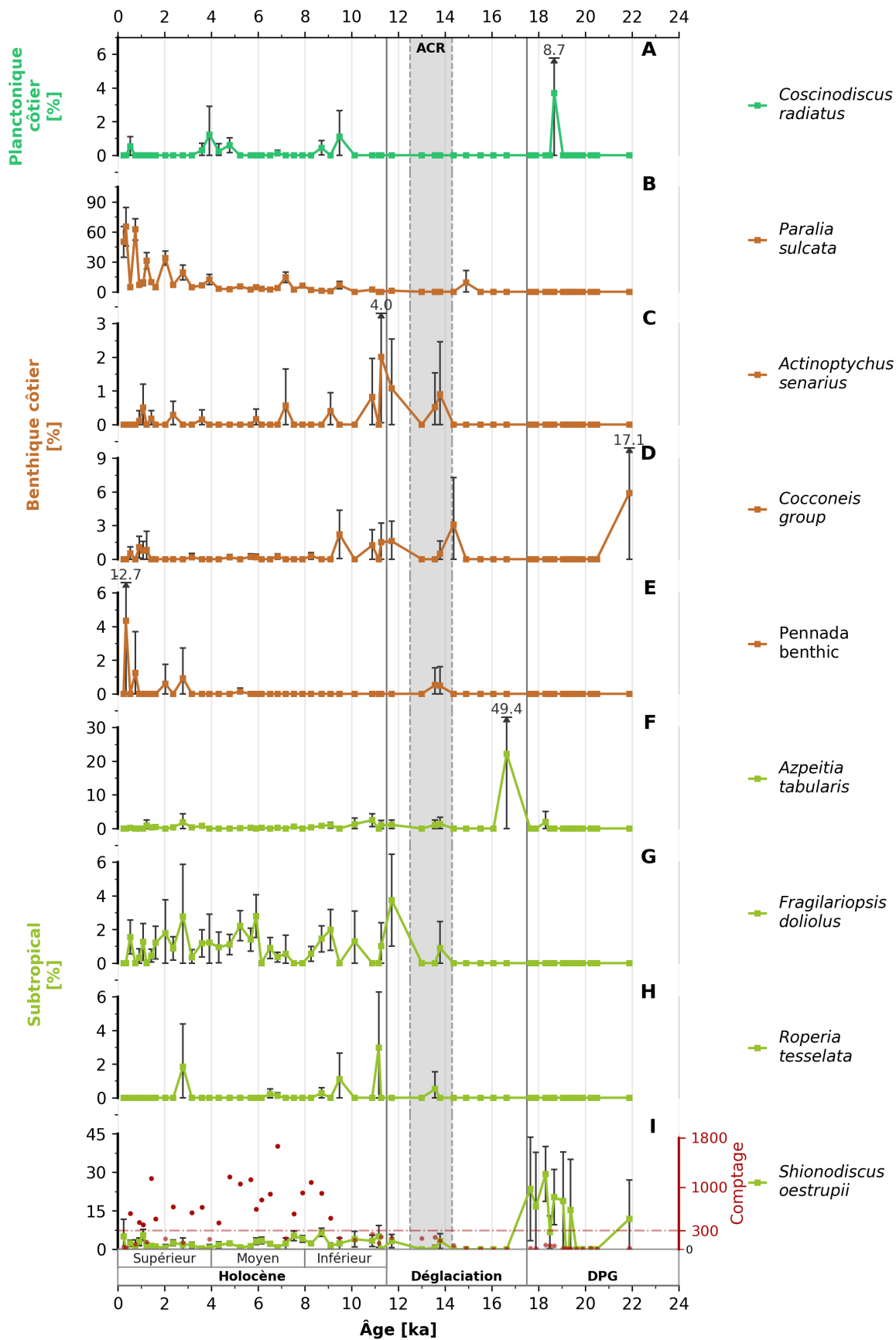


**Figure 6-A.** Enregistrements pour la carotte de sédiments MD07-3100 de la dernière période glaciaire à la fin de l'Holocène. **A)** Composition isotopique de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) mesurées sur *G. bulloides* d'après Haddam et al., (2018) ; **B)** Abondance totale de diatomées (Valves  $\text{g}^{-1}$ ), les cercles rouges indiquent le nombre total de diatomées comptées ; **C)** Pourcentage de fragments totaux de diatomées ; **D- T)** Pourcentage des espèces de diatomées. Ce graphique montre tous les comptages.

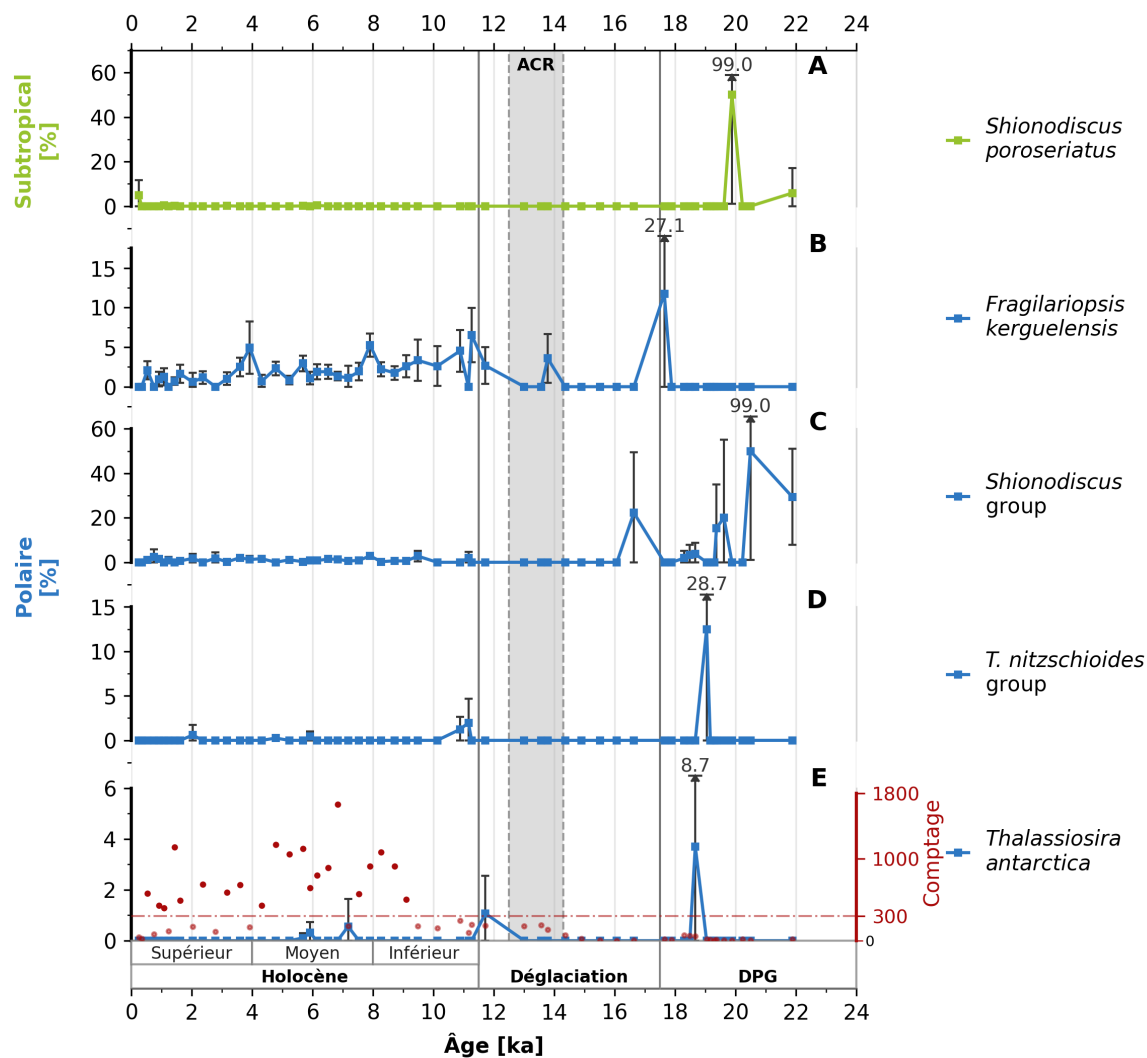
Annexe 6.  
Annexe 6-B. Carotte MD07-3088



### Annexe 6-B. Suite carotte MD07-3088



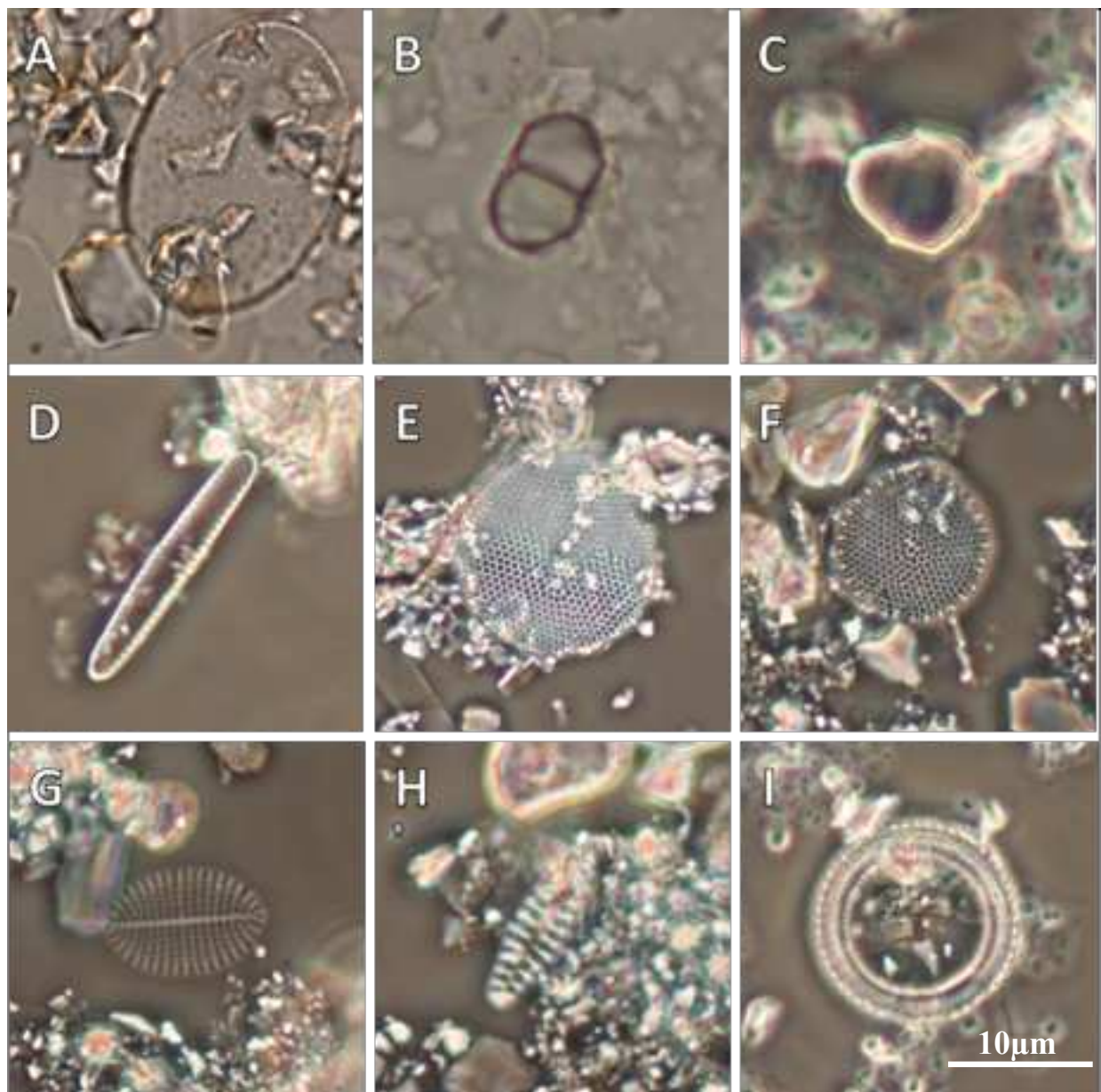
## Annexe 6-B. Suite carotte MD07-3088



**Figure 6-B.** Enregistrements pour la carotte de sédiments MD07-3100 de la dernière période glaciaire à la fin de l'Holocène. **A)** Graphique d'abondance totale de diatomées (Valves  $g^{-1}$ ), les cercles rouges indiquent le nombre total de diatomées comptées ; **B)** % de fragments totaux de diatomées ; **D-E)** Pourcentage des espèces de diatomées. Ce graphique montre tous les comptages.

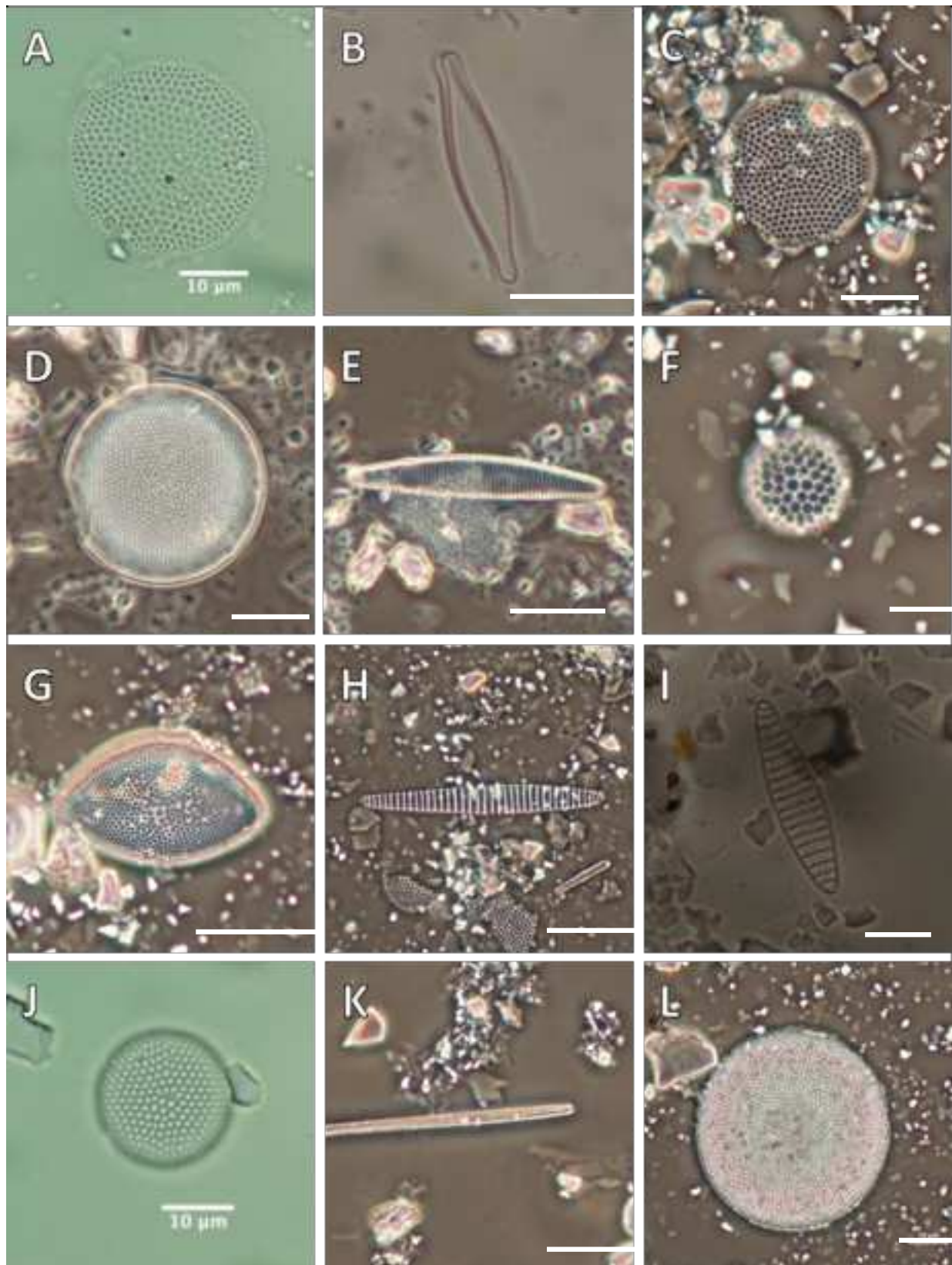
## Annexe 7.

Photographies des espèces de diatomées présentes dans les carottes MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3081.



**Groupe Nutriments abondants :** A-C) *Chaetoceros* spp. resting spores et D) *Thalassionema nitzschioides* var. *nitzschioides*. **Groupe Planctonique-côtier :** E) *Thalassiosira eccentrica* et F) *Thalassiosira angulata*. **Grupe Benthique-côtier :** G) *Cocconeis* spp. groupe, H) Pennate spp. benthic et I) *Paralia sulcata*. Ligne blanche = 10  $\mu$ m.

Annexe 7



**Grupe Subtropical :** A) *Roperia tessellata*, B) *Nitzschia bicapitata*, C) *Azpeitia tabularis*, D) *Actinocyclus curvatulus*, E) *Fragilariopsis doliolus*, F) *Shionodiscus oestrupii* y G)



*Hemidiscus cuneiformis*. **Groupe Polaire H-I)** *Fragilariopsis kerguelensis*, **J)** *Shionodiscus trifultus*, **K)** *Thalassiothrix* spp. et **L)** *Thalassiosira lentiginosa*. Ligne blanche = 10 µm.

