
Répartition (assemblages) et géochimie des foraminifères benthiques dans les sédiments du Golfe du Bengale : liens avec les contraintes environnementales et la géochimie des eaux interstitielles

Réalisé par :

Naoufel A. HADDAM

Encadré par :

Sophie SEPULCRE (IDES)

Laetitia LICARI (CEREGE)

Franck BASSINOT, Nicolas CAILLON (LSCE)



Remerciements :

Ce mémoire n'aurait jamais vu le jour sans l'aide inestimable de mes encadrants : Sophie Sepulcre, Laetitia Licari, Franck Bassinot et Nicolas Caillon.

J'aimerais remercier tout particulièrement Sophie Sepulcre pour l'attention qu'elle m'a portée, son écoute, le temps qu'elle a consacré à mes questions, et sa patience face à mes erreurs.

Je remercie très chaleureusement Laetitia Licari qui m'a fait découvrir le monde trépidant des foraminifères benthiques, et pour son accueil au CEREGE.

Je tiens aussi à remercier Franck Bassinot, Nicolas Caillon et Fabien Dewilde pour leur accueil chaleureux au LSCE, leur bonne humeur et pour leur aide inestimable lors des analyses au spectromètre.

Je remercie également Aurélie Noret de l'équipe IDREAU pour les mesures de $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau interstitielle, qui ont étoffé mon rapport.

Et enfin, j'aimerais remercier ma famille pour leur soutien moral outre-méditerranée.

I. Introduction

II. Matériel et méthodes

II.1. Zone d'étude

- II.1.1. Contexte climatique
- II.1.2. Circulation Océanique
- II.1.3. Production primaire
- II.1.4. Contexte sédimentaire

II.2. Matériel

II.3. Méthodes

- III.3.1. Méthodes de carottage et prélèvement des échantillons
- III.3.2. Tamisage du sédiment et piquage des foraminifères
- III.3.3. Préparations pour les mesures au spectromètre de masse
 - III.3.3.1. Echantillons d'eau
 - III.3.3.2. Préparation et analyse des foraminifères

III. Résultats

III.1. Résultats sur les assemblages

- III.1.1. Abondances totales (morts et vivants) en foraminifères
- III.1.2. Abondances en foraminifères vivants
- III.1.3. Abondances en foraminifères morts
 - III.1.3.1. Les foraminifères morts dominants de chaque station
 - III.1.3.2. Foraminifères morts de MONO 3

III.2. Résultats isotopiques

- III.2.1. Isotopes de l'eau de fond
- III.2.2. Isotopes de l'eau interstitielle
- III.2.3. Résultats isotopiques dans les tests des foraminifères

IV. Discussion

IV.1. Relations entre signal isotopique de l'eau et des foraminifères

- IV.1.1. Comparaison entre individus morts et vivants
- IV.1.2. Impact de la taille sur les résultats isotopiques
- IV.1.3. Effet de microhabitat et $\delta^{13}\text{C}$
- IV.1.4. Effet vital et $\delta^{18}\text{O}$

IV.2. Impact de la dissolution

- IV.2.1. Evidences faunistiques
 - IV.2.1.1. Etude comparative des assemblages vivants et morts
 - IV.2.1.2. Les indices de diversité et d'homogénéité et leur signification
 - IV.2.1.3. Intérêt des fragments de foraminifères arborescents
- IV.2.2 Influence sur le signal isotopique

IV.3. Rôles des apports de sédiment et des flux de matière organique

- IV.3.1. Apports détritiques
- IV.3.2. Flux de matière organique
 - IV.3.2.1. Corg associé aux apports détritiques
 - IV.3.2.2. Corg lié à la productivité primaire

V. Conclusion et perspectives

Liste des figures

Figures :

- Figure 1 : Distribution des différentes qualités de matière organique en fonction de la profondeur, avec les différentes faunes de foraminifères benthiques associées dans la baie de Biscay (Fontanier et al., 2002).
- Figure 2 : (a) Profil vertical d'abondances en foraminifères vivants dans le sédiment. (b) Profil vertical du $\delta^{13}\text{C}$ mesuré sur les tests de ces foraminifères comparé au $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau interstitielle (Points noirs reliés). (McCorkle et al., 1997).
- Figure 3 : Localisation des sites d'étude.
- Figure 4 : À gauche, Cartes trimestrielles de la production de chlorophylle A dans la baie du Bengale. Zoom sur la baie du Bengale (Antoine et al., 1996). À droite, Cartes satellites de Septembre 2006 à septembre 2007 de la même région. Source : SEAWIFS, NASA.
- Figure 5 : Abondances en foraminifères/gramme pour toutes les stations et en fonction de la profondeur.
- Figure 6 : Pourcentages et abondances en foraminifères vivants, par type de test, et en fonction de la profondeur de chaque station.
- Figure 7 : Profils verticaux du contenu en foraminifères vivants de (a) MONO 2, (b) MONO 3, (c) MONO 4, (d) MONO 7, (e) MONO 8 et (f) MONO 9.
- Figure 8 : Pourcentages et abondances en foraminifères morts, par type de test, et en fonction de la profondeur de chaque station.
- Figure 9 : Profil vertical du contenu en foraminifères morts de MONO 3.
- Figure 10 : $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau de fond des six stations.
- Figure 11 : Profils verticaux du $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau interstitielle des stations MONO 4 (a, e), MONO 8 (b, f) et MONO 9 (c, g). - Figure 11 : $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de fond des six stations.
- Figure 12 : Profils verticaux des analyses de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{18}\text{O}$ des stations MONO 2 (a, b), MONO 3 (c, d), MONO 4 (e, f) MONO 7 (g, h) et MONO 9 (i, j)
- Figure 13 : Comparaison entre le $\delta^{13}\text{C}$ des tests de l'eau de fond dans MONO 2 (a), MONO 3 (b) et MONO 7 (d), et interstitielle dans MONO 4 (c) et MONO 9 (e).- Figure 14 : Profils verticaux du $\delta^{18}\text{O}$ mesuré sur les tests (points libres), comparé avec le $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite à l'équilibre calculé à partir du $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de fond pour MONO 2, MONO 3 (b) et MONO 7 (d), et à partir de l'eau interstitielle (points liés) pour les stations MONO 4 (c) et MONO 9 (e).
- Figure 15 : Indices de diversité (a) des assemblages vivants et (b) des assemblages morts dans les différentes stations.
- Figure 16 : Abondances en fragments de foraminifères arborescents morts et vivants de chaque station.
- Figure 17 : Profils verticaux de fragments d'individus vivants de *Rhizammina algaeformis* dans (a) MONO 2 et (b) MONO 7.
- Figure 18 : Pourcentage de Corg de chaque station dans le premier demi-centimètre et à 4,5cm.
- Figure 19 : $\Delta\delta^{13}\text{C}$ Entre *F. wuellerstorfi* et le couple *O. umbonatus* et *E. exigua* pour toutes les stations.

Tableaux :

- Tableau 1 : Liste des stations étudiées.
- Tableau 2: Nombre de foraminifères piqués.
- Tableau 3: Nombre d'individus piqués classés par nature du test.
- Tableau 4 : Valeurs de $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{tests}} \text{‰}$ des foraminifères de chaque station.

I. Introduction

La mousson indienne est un phénomène d'inversion du sens des vents qui régit le climat d'Asie du Sud et du Sud-Est, où se concentre la majeure partie de la population mondiale. Cette population est directement affectée par les dérèglements de la mousson qui peuvent provoquer destruction et famines. Dans le contexte actuel et futur de réchauffement climatique, il est nécessaire de mieux comprendre le fonctionnement de la mousson actuelle pour mieux appréhender ses dérèglements liés aux changements climatiques globaux. Pour ce faire, l'étude du système de mousson dans le passé et de ses variations à l'état naturel est donc indispensable. L'étude des archives climatiques telles que les carottes de sédiments marins permet de restituer les variations de la mousson dans le passé.

La baie du Bengale est une région idéale pour reconstituer la variabilité de la mousson indienne dans le passé, à différentes échelles de temps, grâce à l'existence de zones à taux de sédimentation très variables. De plus, cette région possède une dynamique océanique et sédimentaire directement influencée par ce phénomène climatique. A partir des archives sédimentaires prélevées dans cette zone, de nombreuses informations sur les changements passés de l'intensité de la mousson à différentes échelles de temps peuvent être obtenues, à partir d'outils variés, dont les foraminifères benthiques.

Les foraminifères sont des micro-organismes marins qui constituent l'un des outils les plus importants en paléocéanographie du fait de leur ubiquité et de la bonne conservation de leurs tests carbonatés dans le sédiment. De plus ils enregistrent et restituent les conditions physico-chimiques qui règnent dans l'eau de fond et l'eau interstitielle (Schumacher et al., 2010). Ces organismes unicellulaires se divisent en deux catégories : les planctoniques et les benthiques. Les foraminifères planctoniques vivent jusque dans les 500 premiers mètres de profondeur dans la colonne d'eau, les foraminifères benthiques vivent au niveau de l'interface sédiment-eau de fond, ou enfouis à quelque centimètres de profondeur dans le sédiment. Cette étude concerne uniquement les foraminifères benthiques, et plus particulièrement la reconstitution des assemblages et l'étude de la composition isotopique des tests en relation avec les paramètres environnementaux, et la composition isotopique de l'eau de fond et interstitielle. Cette étude se base à la fois sur des foraminifères actuels morts et vivants (teintés au rose de Bengale).

Les foraminifères benthiques sont souvent les organismes les plus abondants de la méiofaune de l'océan profond (Geslin et al., 2004). Ils colonisent le sédiment depuis l'interface entre sédiment et eau de fond, jusqu'à quelques centimètres de profondeur dans le sédiment. Certains individus vivants ont été trouvés jusqu'à 30cm dans le sédiment (Basov et Khusid, 1983 in Geslin et al., 2004). Cette distribution verticale est dépendante de divers facteurs dont les plus importants sont la disponibilité en nutriments (matière organique) et en oxygène (ex : Jorissen et al., 1995 ; Fontanier et al., 2002, Figure 1).

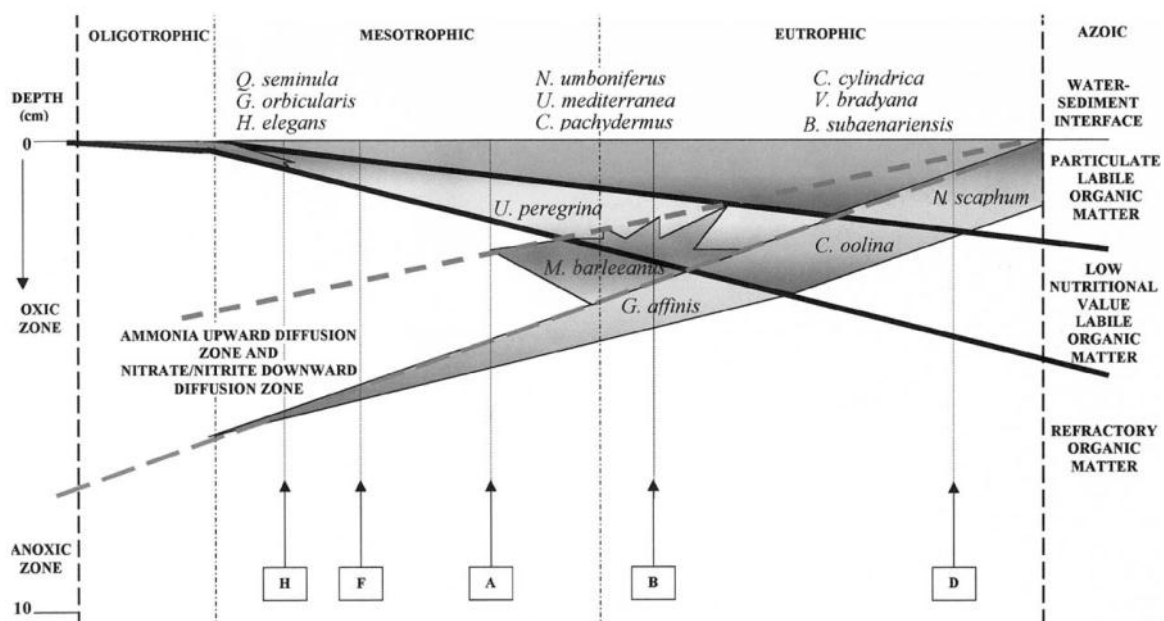


Figure 1 : Distribution des différentes qualités de matière organique en fonction de la profondeur, avec les différentes faunes de foraminifères benthiques associées dans le Golfe de Gascogne (Fontanier et al., 2002).

La qualité de la matière organique joue aussi un rôle prépondérant dans la distribution verticale des foraminifères benthiques dans le sédiment (Figure 1). Toutes les espèces de foraminifères benthiques n'ont pas la même sensibilité vis-à-vis de ces facteurs. Certaines espèces comme *Fontbotia wuellerstorfi* ont des besoins métaboliques qui

restreignent leur habitat à l'interface sédiment-eau de fond, où la matière organique labile (facilement métabolisable par les foraminifères) est plus abondante. Ces espèces sont dites épibenthiques. D'autres espèces montrent un maximum d'abondance plus profondément dans le sédiment, ce sont des foraminifères endobenthiques intermédiaires ou profonds. Enfin, il existe des espèces endobenthiques superficielles, qui montrent un maximum d'abondance en surface suivi d'une diminution plus ou moins rapide en profondeur dans le sédiment. Cette zonation est moins bien marquée dans les eaux peu profondes car l'hydrodynamisme et la bioturbation y sont plus forts (Jorissen et al., 1995). Dans un premier temps, je présenterai les résultats de l'étude des assemblages de foraminifères benthiques. L'originalité de ce travail est que de telles données faunistiques, dans la baie du Bengale et aux profondeurs d'eau étudiées (plus de 2000m), sont inexistantes dans la littérature. Cette démarche nécessite l'identification taxonomique et le comptage de chaque individu.

Dans un second temps, je m'attacherai aux données géochimiques, à savoir les isotopes stables du carbone et de l'oxygène $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ mesurés sur l'eau de fond, l'eau interstitielle et les tests des foraminifères. Ces outils géochimiques sont en effet de puissants traceurs des caractéristiques environnementales et ont la particularité d'être enregistrés par les tests des foraminifères benthiques.

Le $\delta^{13}\text{C}$ du carbone inorganique dissous (DIC) de l'eau $\delta^{13}\text{C}_{\Sigma\text{CO}_2}$ va être influencé par plusieurs facteurs : la production et la décomposition de la matière organique, la précipitation et la dissolution du CaCO_3 et le mélange avec des masses d'eau de signature différente (McCorkle et al., 1990). Le $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau interstitielle est essentiellement influencé par le $\delta^{13}\text{C}_{\Sigma\text{CO}_2}$ de l'eau de fond sus-jacente, et par la décomposition de la matière organique et la dissolution du CaCO_3 qui se produisent à l'intérieur du sédiment (Figure 2b). Plus précisément, lorsque la décomposition de la matière organique est importante à l'intérieur du sédiment, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ dans l'eau diminuent avec un gradient de décroissance plus ou moins marqué en fonction du taux de décomposition (Figure 2b). Le $\delta^{13}\text{C}$ diminue avec l'augmentation du taux de matière organique car le ^{13}C est dilué par le $^{12}\text{CO}_2$ relâché lors de la décomposition des organismes morts présents dans le sédiment. La décomposition de la matière organique à l'intérieur du sédiment entraîne également une diminution du pH ayant pour effet de dissoudre le CaCO_3 présent. Cette dissolution va avoir pour effet d'augmenter le $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau interstitielle (Gehlen et al., 1999 ; Hu et Burdige, 2007), mais son influence est beaucoup moins importante que l'effet de la décomposition de la matière organique. Le $\delta^{13}\text{C}$ enregistré par les foraminifères benthiques permet de restituer la composition isotopique de l'eau de fond et de l'eau interstitielle car ces organismes vivent à différentes profondeurs dans le sédiment (Figure 2 a et b). Néanmoins, cette distribution verticale des foraminifères dans le sédiment varie localement, d'un site à l'autre. Cette distribution peut même varier dans le temps au sein d'un même site, car les foraminifères migrent dans le sédiment en fonction des disponibilités en nutriments et en oxygène (Figure 1), avec une vitesse de déplacement moyenne de $50\mu\text{m}/\text{mn}$ (Murray, 2006).

L'intérêt d'étudier le $\delta^{13}\text{C}$ dans la baie du Bengale réside dans le fait que le flux en matière organique qui atteint le sédiment est intimement lié à la dynamique de la mousson Indienne qui régule les floraisons phytoplanctoniques annuelles. Il en résulte une forte saisonnalité des apports en nutriments dont l'impact sera détecté à la fois dans les assemblages et les signaux isotopiques qu'enregistrent les tests. De plus, la Baie du Bengale est le réceptacle de sédiments détritiques transportés depuis le continent dont la teneur en carbone organique peut être importante, et également représenter une source de matière organique au sédiment. Or, ces apports sont également contrôlés par la saisonnalité de la mousson qui régule les flux d'eau et de sédiments depuis le continent vers l'océan.

Les tests de foraminifères benthiques ont le potentiel d'enregistrer le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de fond et de l'eau interstitielle. Le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau actuel est influencé par deux principaux paramètres : la température et la salinité. Cet enregistrement du signal lors de la précipitation des tests peut être modifié par l'effet vital (McCorkle et al., 1990). Cet effet vital crée un écart entre le $\delta^{18}\text{O}$ d'une calcite qui aurait précipité à l'équilibre avec le $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau}}$ et le $\delta^{18}\text{O}$ mesuré dans les tests de foraminifère benthique. L'effet vital est spécifique mais est constant au sein des individus d'une même espèce. Ce phénomène est provoqué par des fractionnements isotopiques lors de la précipitation du test, lié aux processus métaboliques, tels que la respiration, ainsi qu'aux processus thermodynamiques lors de la biominéralisation, et aux échanges ioniques qui se produisent au sein la membrane plasmique du foraminifère (Yu et al., 2007, Bentov et al., 2009, Rollion-Bard et al., 2010).

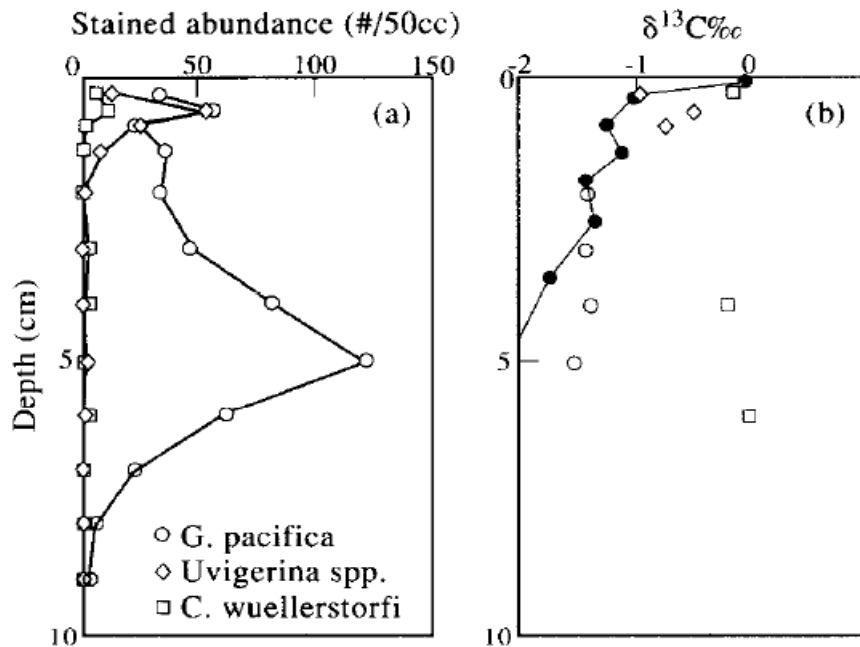


Figure 2 : (a) Profil vertical d'abondances en foraminifères vivants dans le sédiment. (b) Profil vertical du $\delta^{13}\text{C}$ mesuré sur les tests de ces foraminifères comparé au $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau interstitielle (Points noirs reliés). (McCorkle et al., 1997).

L'étude présentée dans ce rapport vise à définir et associer les assemblages de foraminifères aux caractéristiques environnementales des différents habitats associés aux sites d'échantillonnage, puis de lier ces paramètres écologiques avec la chimie des tests de certaines espèces de foraminifères et des eaux de fond et interstitielles, afin de mieux comprendre les relations qui existent entre écologie et géochimie. La finalité de cette approche couplée est de mieux contraindre les paramètres environnementaux qui gouvernent la signature géochimique des tests de foraminifères benthiques pour pouvoir, *in fine*, utiliser ces traceurs à des fins de reconstitutions paléocéanographiques. Pour cela, j'ai travaillé sur les eaux et les sédiments d'interface prélevés sur six sites à différentes profondeurs d'eau à bord du Marion Dufresne durant la mission MONOPOL (Monsoon Paleovariability) effectuée dans la baie du Bengale en Mai-Juin 2012, dont le but est de mieux comprendre et anticiper la variabilité future de la mousson indienne en étudiant les changements qui ont eu lieu dans le passé.

II. Matériel et méthodes

II.1. Zone d'étude

Ce travail a porté sur l'eau de fond, l'eau interstitielle et les sédiments de surface, prélevés pendant la campagne MONOPOL sur six sites MONO 2, 3, 4, 7, 8 et 9 (Figure 3 et Tableau 1).

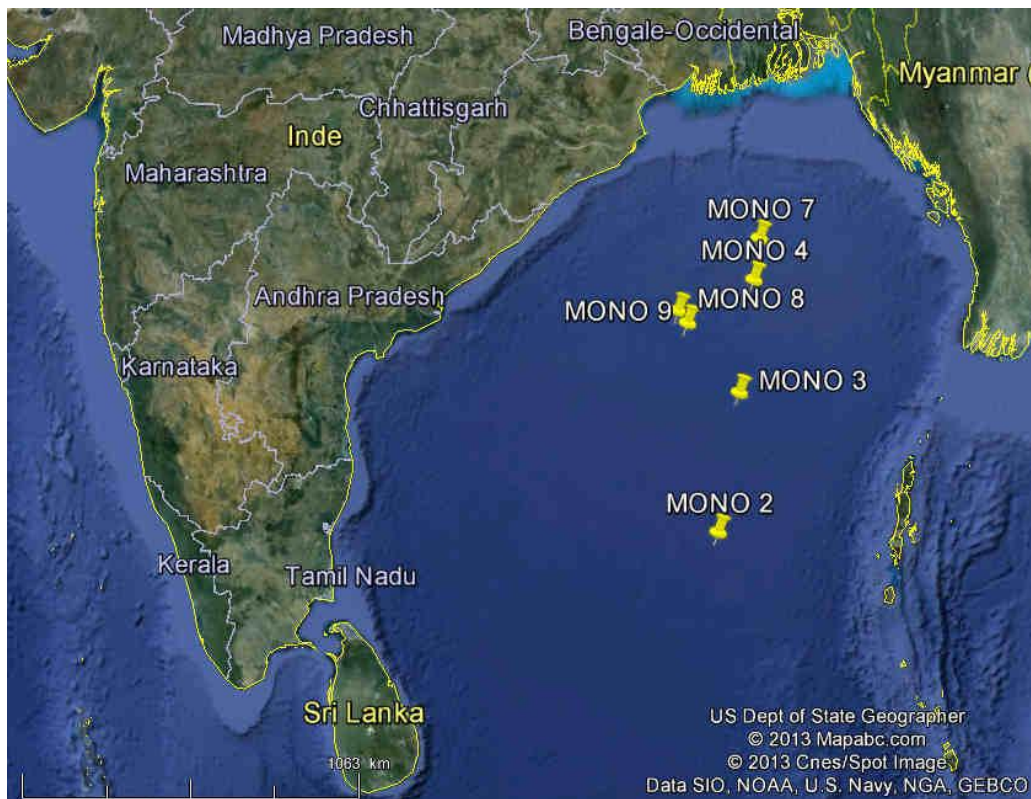


Figure 3 : Localisation des sites d'étude.

II.1.1 Contexte climatique

La baie du Bengale est soumise au régime de la mousson indienne. Ce phénomène climatique consiste en une inversion saisonnière de la direction des vents dominants. Cette inversion est due à la différence d'inertie thermique entre l'océan et le continent : l'océan chauffe deux fois moins vite que le continent et a la possibilité d'évacuer la chaleur via l'évaporation et les échanges avec les couches d'eaux plus profondes et froides (une thermocline de plusieurs dizaines de mètres se crée à la surface des océans, contrairement au continent où la chaleur ne pénètre que de quelques décimètres et où l'évaporation est très faible). Ainsi, durant l'été sur le continent asiatique, le plateau Tibétain au Nord se réchauffe plus et plus vite que l'océan Indien au sud, il se crée alors une cellule de basse pression au-dessus du plateau, ce gradient de pression atmosphérique génère des vents de Sud-ouest qui apportent avec eux l'humidité de l'océan ce qui provoque de fortes précipitations sur le continent. Inversement, en hiver, le continent, se refroidit plus rapidement que l'océan, il en découle une cellule de haute pression au-dessus du continent et des vents secs qui soufflent depuis le continent vers l'océan (vents Nord-est) avec de précipitations moins importantes.

Le système de mousson d'été est très important dans cette région car il agit directement sur le taux d'érosion de la chaîne himalayenne, et sur le transport de la matière organique et des sédiments issus de cette érosion (Galy et al., 2007).

II.1.2 Circulation Océanique

Différentes masses d'eau sont identifiées dans la partie Est de la baie du Bengale (adjacente à la mer d'Andaman) depuis la surface (Surface Bengal Water Mass : Eaux de surface, 0-200m), au niveau intermédiaire (Intermediate Bengal WM : eaux intermédiaires du Bengale, 200-1600m) et en profondeur (Deep North Indian Waters : eaux profondes indiennes du Nord, 1600-3500m) (Saidova et al., 2007). Les masses d'eau intermédiaires du Bengale pénètrent dans la mer d'Andaman à travers le détroit d'Andaman- Nicobar (Saidova et al., 2007).

En surface, les masses d'eau sont soumises aux vents dominants de la mousson (Annexe I). En été, les vents de Sud-Ouest engendrent une gyre anticyclonique. En hiver, les vents de Nord-Est créent une gyre cyclonique. Actuellement, les paramètres orbitaux de la Terre (notamment la précession qui contrôle le taux d'insolation aux basses latitudes) font que la mousson d'été (Sud-Ouest) est prédominante. Il en résulte une circulation de surface annuelle dominante anticyclonique.

Les masses d'eau intermédiaires sont caractérisées par la présence d'une zone à minimum d'oxygène (Oxygen Minimum Zone OMZ) due à un faible renouvellement de ces eaux (Tomczak et Godfrey, 2003, Stramma et al., 2008) (Annexe I). Les mesures de l'oxygène dissous en fonction de la profondeur effectuées lors de la mission MONOPOL (Annexe I) mettent en évidence cette OMZ, au niveau de laquelle les taux d'oxygène sont proches de 0 autour de 500m de profondeur.

En dessous de cette OMZ, dans les eaux profondes (plus de 2000m), les teneurs en oxygène augmentent pour atteindre dans les eaux de fond 90-100 $\mu\text{mol/kg}$ ($>2\text{ml/L}$). Les conditions ne sont donc pas anoxiques en profondeur (seuil d'anoxie : $< 1\text{ml/L}$, Bernhard et al., 1999).

En profondeur (plus de 1600m), l'état actuel des connaissances suggère que les courants profonds dans le baie du Bengale sont liés aux eaux de fond antarctiques (Antarctic Bottom Water : AABW) et aux courants de turbidité (Colin, 1997 ; Tomczak et Godfrey, 2003).

Dans la Baie du Bengale, la profondeur de la lysocline (profondeur à laquelle la dissolution des carbonates augmente) se situe à 3700–3900m et la CCD (seuil de compensation des carbonates, au-delà duquel les carbonates ne sont pas préservés) à 4500-4800m (Kessarkar et al., 2005).

II.1.3 Production primaire

Le système de mousson génère une importante saisonnalité des floraisons d'organismes photosynthétiques planctoniques (tels que les diatomées, les radiolaires, les coccolithophores...). Cette floraison se produit lors de la mousson d'été durant le trimestre Juillet-Août-Septembre (Figure 4) (Antoine et al., 1996). Ceci s'explique par les apports massifs de nutriments venus du continent, acheminés dans la baie du Bengale par le système fluvial du Gange et du Brahmapoutre lors des fortes précipitations de la mousson d'été (Galy et al., 2007). Plus précisément, les images satellites (Figure 4) montrent qu'il y aurait deux pics de production primaire, le premier autour du mois d'août durant la mousson d'été, le second durant la mousson d'hiver autour du mois de janvier, ce qui montre que la mousson d'hiver joue aussi un rôle dans l'enrichissement en matière organique dans la baie en provoquant un second « bloom » phytoplanktonique. Les flux de matière organique en profondeur seront donc fortement influencés par cette saisonnalité liée à la mousson.

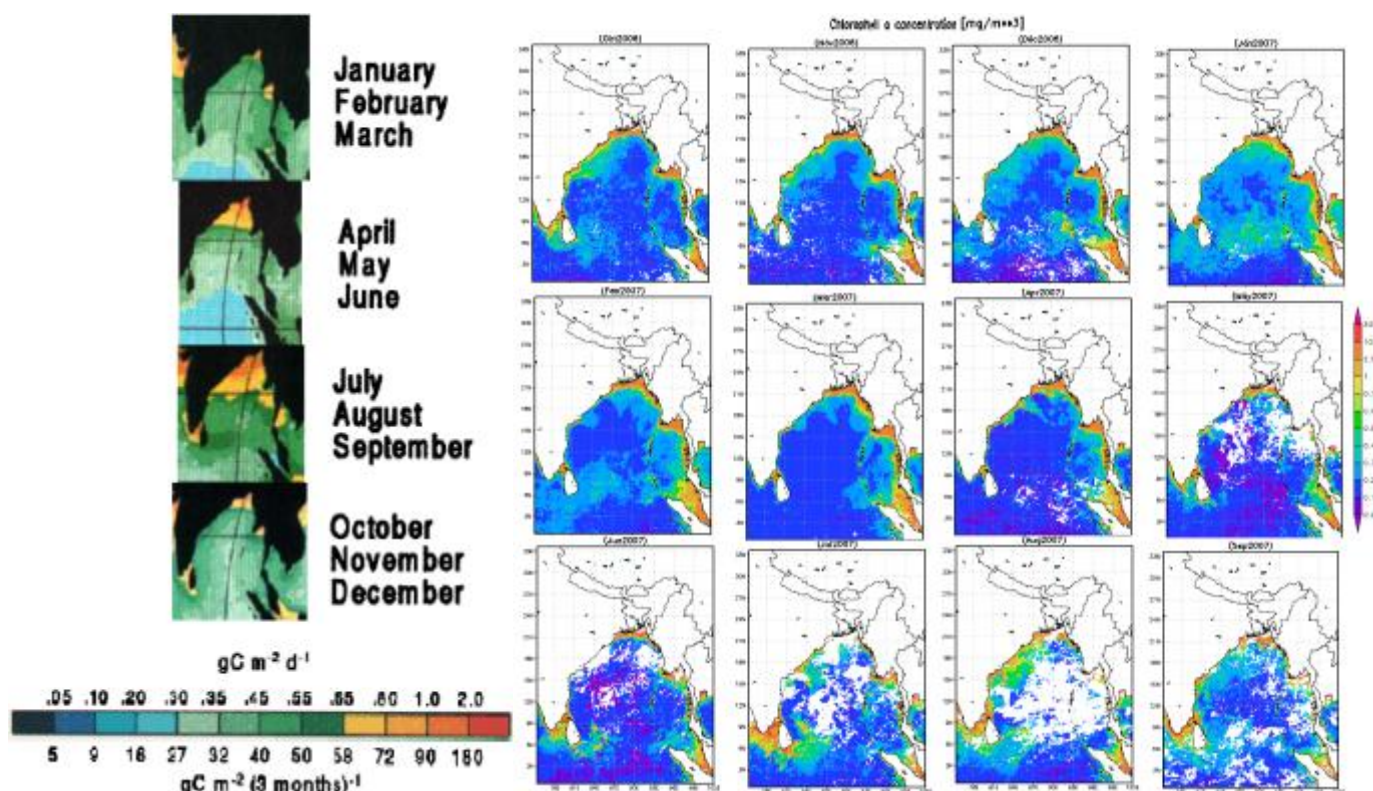


Figure 4 : À gauche, Cartes trimestrielles de la production de chlorophylle A dans la baie du Bengale. Zoom sur la baie du Bengale (Antoine et al., 1996). À droite, Cartes satellites de Septembre 2006 à septembre 2007 de la même région. Source : SEAWIFS, NASA.

II.1.4 Contexte sédimentaire

La baie du Bengale reçoit les sédiments issus de l'érosion intense de la chaîne himalayenne (Weber et al., 2003, Galy et al., 2007). Le drainage de l'Himalaya par de grands fleuves tels que le Gange et le Brahmapoutre achemine d'importantes quantités de sédiments et de matière organique (entre 1 et 2 Gtonnes de sédiments par an, Galy et al., 2007) qui se déposent dans la baie du Bengale. Ce transport s'effectue principalement lors de la mousson d'été et ces apports terrigènes peuvent atteindre 3000 km vers le sud dans l'océan indien (Weber et al., 2003). Ce transport de sédiments se fait principalement par des courants turbides au sein d'un chenal sous-marin unique et méandrique atteignant 1km de largeur à certains endroits (15km en prenant en compte les levées). Ce chenal est bordé par des levées atteignant au maximum 100m de hauteur (Annexe I). Les taux de sédimentation dans le chenal sont très élevés, estimés entre 3 et 10 cm/ka (Colin, 1997).

Le système Gange-Brahmapoutre charrie des quantités importantes de carbone organique continental (0.63×10^{12} mol C_{org}/an) qui provient à la fois de sources fossiles, notamment par la dissolution de roches carbonatées, et de sources récentes, via la matière organique terrestre, essentiellement d'origine végétale (Galy et al., 2007). Le C_{org} d'origine fossile est réfractaire, ce qui signifie qu'il est difficilement métabolisable par la majorité des espèces de foraminifères benthiques tandis que le C_{org} récent, d'origine végétale, est dit « labile » car plus aisément métabolisable. Ce C_{org} labile est souvent consommé de manière quasi-totale dans les premiers centimètres du sédiment par les foraminifères benthiques de l'épifaune et de l'endofaune peu profonde (figure 1) (Fontanier et al., 2002). Le C_{org} fossile dans les sédiments du système Gange-Brahmapoutre représente 10 à 20% du C_{org} total (COT) dans les sédiments en suspension, et à peu près 40 à 100% du COT (Carbone Organique Total) dans les sédiments déposés (Galy et al., 2007). En prenant en compte ce flux de C_{org} fossile, il est estimé que le taux de C_{org} récent labile apporté dans la baie du Bengale est de $(3.1 \pm 0.3) \times 10^{11}$ mol an^{-1} (Galy et al., 2007).

La présence d'une OMZ permet la préservation de cette matière organique dans la colonne d'eau et les forts taux de sédimentation dans la partie proximale de delta du Gange-Brahmapoutre (shelf) et permettent une séquestration efficace de cette matière organique en la protégeant de l'oxydation. Ces sédiments du plateau continental, riches en matière organique sont ensuite transportés par des courants turbides vers le chenal profond de la baie du Bengale (Galy et al., 2007).

Ce contexte climatique et sédimentaire fait de cette région un puits très actif de CO_2 atmosphérique qui contribue à la régulation à long terme du climat (Galy et al., 2007). Toutes ces caractéristiques contribuent à établir un cadre particulier dans les sédiments profonds de la baie du Bengale, en termes d'oxygène et de C_{org} , qui jouent un rôle crucial dans la distribution à la fois horizontale et verticale des faunes de foraminifères benthiques dans le sédiment (Figure 1).

II.2. Matériel de l'étude

Nous avons utilisé dans cette étude des échantillons d'eau de fond, d'eau interstitielle, et de sédiments d'interface (Annexe II), provenant de 6 stations (figure 3) dans la baie du Bengale durant la mission MONOPOL, à bord du Marion Dufresne (Tableau 1).

Tableau 1 : Liste des stations étudiées.

Stations	Latitude	Longitude	Profondeur	Eau de fond prélevée	Eau interstitielle prélevée	Foraminifères étudiés
MONO 2	11°46,10'N	88°38,78'E	3175m	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
MONO 3	14°47,16'N	89°05,72'E	2806m	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
MONO 4	17°10,95'N	89°28,93'E	2373m	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
MONO 7	18°01,67'N	89°32,08'E	2140m	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
MONO 8	16°30,28'N	87°47,92'E	2549m	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
MONO 9	16°14,63'N	87°54,66'E	2608m	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

II.3 : Méthodes de l'étude

II.3.1 : Méthode de carottage et prélèvement des échantillons

Le carottier d'interface multi-tubes porte quatre tubes de 60cm qui s'enfoncent dans le sédiment par gravité permettant de collecter l'eau de fond, le sédiment et l'eau interstitielle contenue dans le sédiment (Annexe II). La qualité du prélèvement est attestée par la bonne préservation de l'interface et une eau de fond non turbide (Annexe III).

Le conditionnement de l'eau pour les analyses isotopiques consiste à remplir les flacons au maximum afin d'éviter tout échange isotopique avec l'air entre le moment du prélèvement et l'analyse. De plus, les échantillons d'eau destinés aux mesures de $\delta^{13}\text{C}$ sont empoisonnés au mercure pour empêcher les fractionnements liés aux développements d'algues. Environ 15 mL d'eau de fond ont été prélevés pour chaque analyse isotopique. Le prélèvement de l'eau interstitielle nécessite l'utilisation de seringues de filtration (Annexes II). 2 mL pour chaque analyse isotopique ont été prélevés. L'ensemble des échantillons ont ensuite été scellés et conservés au froid.

Le sédiment est prélevé en tranches entre 0 et 10cm de profondeur dans le but d'étudier son contenu en foraminifères benthique. Le pas d'échantillonnage adopté est de 0,5 cm pour les 2 premiers centimètres, puis de 1 cm au-delà de 2cm de profondeur. Ces tranches sont ensuite coupées en demi-tranches, et chaque demi-tranche a été teintée au rose Bengale (1g/L d'éthanol) afin de déterminer quels sont les foraminifères qui étaient vivants au moment du carottage car le colorant teinte la matière organique. L'ensemble des échantillons de sédiments est conditionné au froid.

Ces premières étapes ont toutes été effectuées à bord du Marion Dufresne.

II.3.2. Tamisage du sédiment et piquage des foraminifères

La préparation des échantillons de sédiments et le piquage des foraminifères benthiques ont été entièrement effectués au CEREGE.

- Tamisage :

Les échantillons de sédiment de 0 à 5cm ont d'abord été séchés à l'étuve (à 70°C pendant 48h), ceci afin de pouvoir normaliser les abondances en foraminifères par gramme de sédiment sec. Après avoir été pesés, les sédiments ont été tamisés sous l'eau afin d'éliminer la fraction inférieure à 63 μm . Une fois ce premier tamisage effectué, les échantillons ont été séchés encore une fois à l'étuve (à 50°C pendant 24h), avant d'être tamisés à sec avec un tamis de calibre 150 μm pour obtenir 2 fractions granulométriques 63-150 μm et >150 μm qui sera utilisée pour le piquage des foraminifères. Quelques échantillons dans la fraction 63-150 μm ont qualitativement été vérifiés pour leur contenu en foraminifères vivants afin d'être sûr que la perte d'information est négligeable (les poids des échantillons sont représentés dans l'Annexe IV).

- Piquage des foraminifères :

Pour cette étude tous les foraminifères benthiques ont été piqués manuellement à l'aide d'un pinceau fin et légèrement humide, sous loupe binoculaire, et identifiés jusqu'au niveau de l'espèce lorsque cela était possible. Des foraminifères vivants ont été trouvés depuis la surface jusqu'à une profondeur variable selon les stations, comprise entre 2 et 10 cm. L'étude des foraminifères morts porte sur le premier centimètre de sédiment, sauf dans la station MONO 3 où les individus morts ont été piqués jusque 5 cm afin de contraindre la dynamique de formation des assemblages fossiles en profondeur dans le sédiment. L'identification taxonomique se base principalement sur Loeblich et Tappan (1987) et Jones (1994).

- La méthode de coloration au rose Bengale et ses contraintes :

La coloration au rose Bengale (Walton, 1952) est une méthode qui est à la fois très répandue et très critiquée par la communauté de « foraminiféristes » (Murray, 2006). Cette technique consiste à définir si un foraminifère était vivant au moment du carottage. Ceci est possible grâce au fait que le rose Bengale teinte la matière organique en rose, ce qui inclut les voiles bactériens et les protoplasmes de foraminifères morts qui ne se sont pas décomposés. Ainsi, un biais peut être introduit car la décomposition du protoplasme d'un foraminifère dépend de la température et du taux d'oxygène dans son milieu de vie. Pour les foraminifères épibenthiques, cette décomposition peut prendre de 0,07 à 2 ans, pour les foraminifères de l'endofaune profonde cette décomposition peut prendre jusqu'à 80 ans (McCorkle et al.,

1990). Des foraminifères morts mais avec un protoplasme conservé peuvent être interprétés comme vivants ce qui peut induire une surestimation du nombre de foraminifères vivants (Jorissen et al., 1995, Gupta, 2002, Murray, 2006). De ce fait, les critères de détermination à l'aide du rose Bengale doivent être très stricts : i) coloration homogène : au moins une loge colorée, ii) couleur rose vive (Les tests marrons ou oranges ont été exclus), iii) protoplasme encore présent, mis en évidence par « wet-picking » (i.e., humidification du test pour rendre la calcite moins opaque), ou en cassant le test pour les foraminifères agglutinés, iv) absence de signes de perforations (liées à la prédation de nématodes par exemple), v) présence de sédiment à proximité du foramen (Geslin et al., 2004).

Les données acquises après l'étude ces assemblages ont été traitée selon différents paramètres, i) abondances par gramme de sédiment sec, ii) abondances relatives entre individus possédant des tests de natures différentes, iv) profils verticaux d'abondance en foraminifères vivants au sein du sédiment, v) indices de Shannon d'homogénéité, et de Simpson pour la diversité, pour les différents assemblages (foraminifères et vivants).

II.3.3. Préparations pour les mesures au spectromètre de masse

II.3.3.1. Echantillons d'eau

J'ai mené les analyses isotopiques des isotopes stables de l'oxygène au LSCE. Les analyses de $\delta^{13}\text{C}$ dans l'eau ont été effectuées à IDES par Aurélie Noret au sein de l'équipe IDREAU (les détails méthodologiques associés à ces analyses ne sont donc pas développés dans ce mémoire).

- Préparation des échantillons d'eau :

Les échantillons d'eau sont divisés en 4 fractions d'un maximum de 500 μl et d'un minimum de 300 μl .

- Analyses au spectromètre de masse :

Les isotopes stables de l'oxygène des échantillons d'eau sont mesurés grâce au spectromètre de masse Delta Plus Thermo - GASBENCH II au LSCE. Les fractions d'échantillons d'eau sont disposées dans des « vials » qui sont placés sur un carrousel d'une capacité de 40 vials avec des échantillons de standards internes intercalés de manière régulière. Ces standards sont PECH8 et IS1 a et b, ils ont été étalonnés en fonction du standard SMOW (Standard Mean Ocean Water). L'extraction du CO_2 des échantillons d'eau se fait via le système GazBench, où un flux d'hélium est mis en contact avec l'échantillon d'eau, afin de remplacer l'air présent dans le vial par de l'hélium mis à l'équilibre avec l'eau pendant 48 et 72h. Le CO_2 ainsi extrait de l'eau est conduit vers le spectromètre de masse, transporté par un flux d'hélium contenant un standard de CO_2 (Ref2) interne au LSCE. Les différentes molécules de CO_2 ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$, $^{12}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$) extraites de l'eau sont ionisées dans la source puis accélérées à travers un champ électrique, et déviées par un champ magnétique en fonction de leurs masses (respectivement 44g/mol, 46g/mol), puis détectées par un collecteur étalonné en fonctions de ces différentes masses. Le $\delta^{18}\text{O}$ est ensuite calculés (selon l'équation 1).

La reproductibilité de cette méthode est garantie par les mesures régulières des standards susmentionnés ($\pm 0,1\%$, $n=59$).

$$\delta_{\text{VS(standard)}} = \left(\frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 10^3 \text{ ‰}, \text{ avec } R = \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \quad (1)$$

III.3.3.2 : Préparation et analyse des foraminifères

J'ai effectué l'ensemble des analyses isotopiques sur les foraminifères au LSCE.

-Préparation des foraminifères :

Les isotopes stables du carbone et de l'oxygène ont été mesurés sur des individus morts des espèces *Anomalinoidea globulosus*, *Epistominella exigua*, *Fontbotia wuellerstorfi* et *Oridorsalis umbonatus*, sur des individus vivants et morts des espèces *Globobulimina pacifica*, *Hoeglundina elegans* et *Melonis pompilioides*. Ces mesures concernent les échantillons de toutes les stations, excepté MONO 8 où ces espèces sont absentes. Pour certaines espèces, plusieurs tailles ont été analysées. Cette stratégie analytique a été déterminée grâce aux résultats obtenus par l'étude des assemblages et sera détaillée paragraphe 1 de « III.2.3. Résultats isotopiques dans les tests des foraminifères ».

Les analyses ont été faites au LSCE, à l'aide du spectromètre de masse Isoprime GV Dual Inlet couplé à un système de préparation automatique Multicarb. Avant d'analyser les tests des foraminifères, les individus de chaque espèce ont été sélectionnés par tamisage dans les gammes <250, 250-315 et 315-450 et >450µm. La pesée par une microbalance permet de déterminer le nombre d'individus nécessaires pour l'analyse (limite inférieure de 10µg de calcite pour l'ISOPRIME). Différents nettoyages sont ensuite appliqués : bain de méthanol et passage aux ultrasons (10 à 20 secondes en fonction de la robustesse des tests) pour éliminer la matière organique et les particules présentes à l'intérieur des loges puis chauffe sous vide à 380°C pendant 45minutes pour éliminer le reste de matière organique. Cette dernière étape n'a pas été appliquée à *H. elegans* car ce foraminifère possède un test de nature aragonitique qui peut se transformer en calcite à haute température, ce qui génère des fractionnements isotopiques.

- Analyses au spectromètre de masse :

Les foraminifères sont placés dans des vials dans un carrousel portant 35 échantillons. La référence utilisée est MARGO, qui a été étalonnée par rapport au Pee Dee Belemnite (standard de référence dans les analyses de carbonates). Les tests sont dissous par de l'acide orthophosphorique (H₃PO₄) à 100% et à 90°C, le CO₂ libéré lors de la dissolution du test est analysé par l'ISOPRIME selon le même principe qu'avec le DELTA+.

III. Résultats

III.1. Résultats sur les assemblages

Les données complètes des assemblages pour les échantillons de chaque station sont présentées dans les tableaux des annexes VIII à XIII.

Pour chaque échantillon, tous les foraminifères benthiques, qu'ils soient morts ou vivants, ont été piqués afin d'être identifiés et quantifiés. Les données ainsi obtenues ont été traitées d'abord en prenant en compte tous les foraminifères mais en séparant les individus morts des vivants (suivant Murray, 2006), puis les données ont été traitées de manière plus spécifique, selon différents critères : i) abondances en foraminifères par gramme de sédiment ii) abondances relatives des différents types de tests des foraminifères en fonction de la profondeur des stations iii) répartition verticale des foraminifères dans les sédiments de chaque station iv) indices d'abondance et de diversité.

Le tableau suivant résume les totaux des foraminifères piqués pour toutes les stations :

Tableau 2: Nombre de foraminifères piqués

Totaux	Individus
Total espèces	232
Total individus	4125
Total morts	3694 (89%)
Total vivants	480 (11%)
Total fragments	1005

Les échantillons de cette étude contiennent 232 espèces et 4125 individus. Néanmoins, les individus trouvés vivants lors du carottage ne représentent que 11% du nombre total d'individus, soit 480. Les 1005 fragments ne sont pas inclus dans le nombre total d'individus (4125) car ils sont principalement composés de foraminifères agglutinés, arborescents, et de différentes tailles, ce qui nous empêche d'obtenir un nombre exact d'individus. C'est pourquoi les fragments seront toujours traités à part dans cette étude (Tableau 2).

III.1.1. Abondances totales (morts et vivants) en foraminifères

Afin d'avoir un résultat qui soit comparable entre les différentes stations, le nombre des foraminifères a été standardisé par rapport au poids du sédiment dans lequel ils ont été piqués. Il en résulte des abondances en individus par gramme de sédiment sec (Figure 5). Ces abondances sont variables d'une station à l'autre, avec un maximum de 63 f/g (foraminifères par gramme) dans l'assemblage en foraminifères morts de MONO 4, et un minimum de 0,08 f/g pour les foraminifères morts de MONO 8.

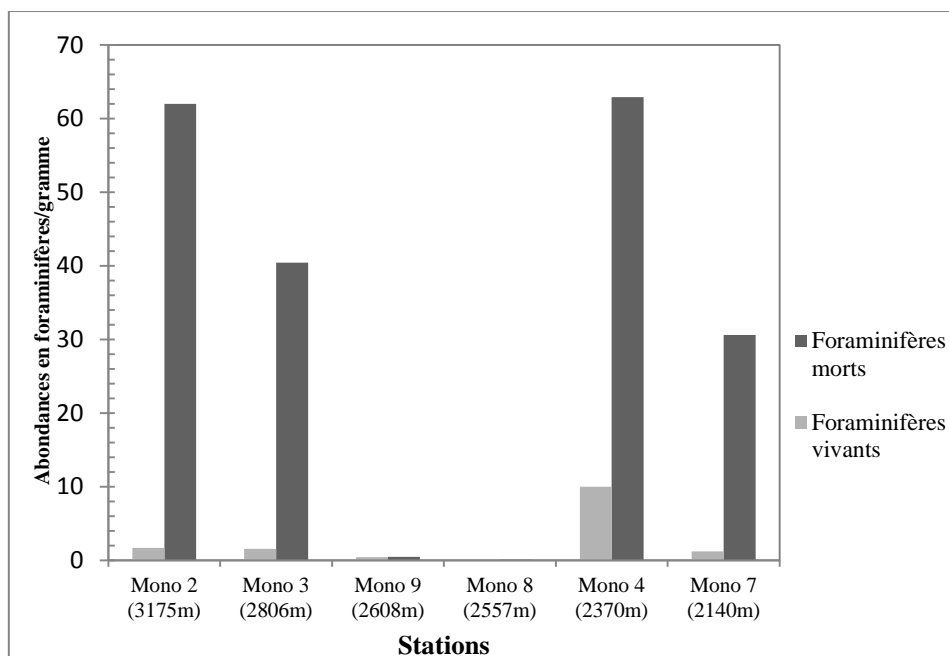


Figure 5 : Abondances en foraminifères/gramme pour toutes les stations et en fonction de la profondeur.

- Nombre d'individus en fonction de la nature du test :

Le nombre total d'individus par catégorie de tests est également présenté (Tableau 3). Dans le total des individus morts et vivants confondus, ce sont les tests de nature carbonatés qui dominent les assemblages avec 2673 individus (64,8%). Il y a aussi 1005 fragments principalement composés de foraminifères arborescents à tests agglutinés.

Plus spécifiquement, lorsque l'on compare les spécimens morts et vivants, on s'aperçoit que les individus vivants carbonatés sont moins nombreux (32%) que les types agglutinés (48%). Dans les assemblages fossiles, ce sont les tests carbonatés qui dominent largement avec 2503 individus, soit 67,7% du total des individus morts. Au sein des foraminifères carbonatés (vivants et morts), les individus à tests hyalins sont les plus nombreux avec 2407 individus soit, 96% des individus carbonatés morts, et 126 individus hyalins vivants, soit 81% des individus carbonatés vivants. Enfin, quelle que soit la nature du test, les foraminifères vivants sont toujours 5 à 10 fois moins nombreux que les foraminifères morts.

Tableau 3: Nombre d'individus piqués classés par nature du test.

Totaux	Individus	Pourcentages
Total carbonatés	2673	64,8% du total d'individus (4125)
Total agglutinés	1452	3,52% du total d'individus (4125)
Total fragments (majoritairement agglutinés)	1005	-
Total vivants carbonatés	155	32% du total des individus vivants (480)
Total vivants agglutinés	296	48% du total des individus vivants (480)
Total morts carbonatés	2503	67,7% du total des individus morts (3694)
Total morts agglutinés	1213	32,3% du total des individus morts (3694)
Total vivants hyalins	126	81% du total des individus vivants carbonatés (155)
Total morts hyalins	2407	96% du total des individus morts carbonatés (2503)
Total vivants porcelanés	29	18% du total des individus vivants carbonatés (155)
Total morts porcelanés	79	4% du total des individus morts carbonatés (2503)

III.1.2. Abondances en foraminifères vivants

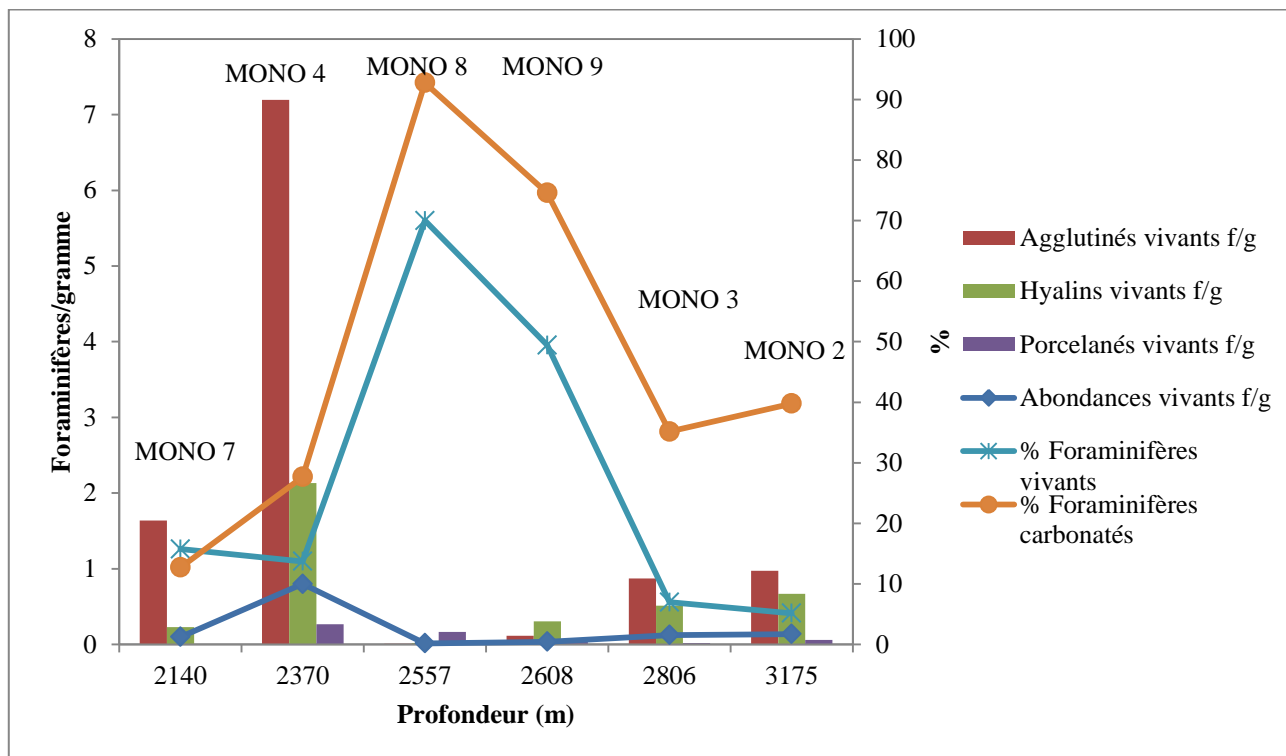


Figure 6 : Pourcentages et abondances en foraminifères vivants, par type de test, et en fonction de la profondeur de chaque station.

La variation des rapports entre les différents types de tests des foraminifères vivants, et leurs abondances en fonction de la profondeur (autrement dit d'une station à une autre) ont été calculés (Figure 6).

L'abondance en foraminifères/gramme de sédiment varie de 0,2 f/g dans MONO 8 à 1,75 f/g dans MONO 4.

Le pourcentage en foraminifères vivants (abondance relative par rapport au total mort plus vivants) varie de 5,13% dans MONO 2 à 70% dans MONO 8. Si on exclut les valeurs de MONO 8 et 9 (50%) on observe une tendance de baisse des pourcentages en foraminifères vivants avec la diminution de la profondeur, depuis MONO 7 (2140m), avec 15,75% jusqu'à MONO 2 (3175m).

Le pourcentage en foraminifères carbonatés (abondance relative par rapport au total carbonatés plus agglutinés) varie entre 12,7% dans MONO 7 et 92,7% dans MONO 8. Si on exclut les valeurs de MONO 8 et 9 (74,5%) on observe une tendance à l'augmentation des pourcentages en foraminifère de type carbonaté avec l'augmentation de la profondeur des stations, depuis MONO 7 jusqu'à MONO 2 (40%). Cette augmentation du pourcentage des foraminifères à tests carbonatés est relative à une diminution du pourcentage des foraminifères à tests agglutinés avec la profondeur.

Les abondances par natures de test (agglutinés, hyalins et porcelanés) montre d'importantes variations entre les stations. Pour les tests agglutinés les valeurs varient de 7,1 f/g (MONO 4) à 0,009 f/g (MONO 8). On observe que ce sont les agglutinés qui dominent dans toutes les stations excepté MONO 8 et 9.

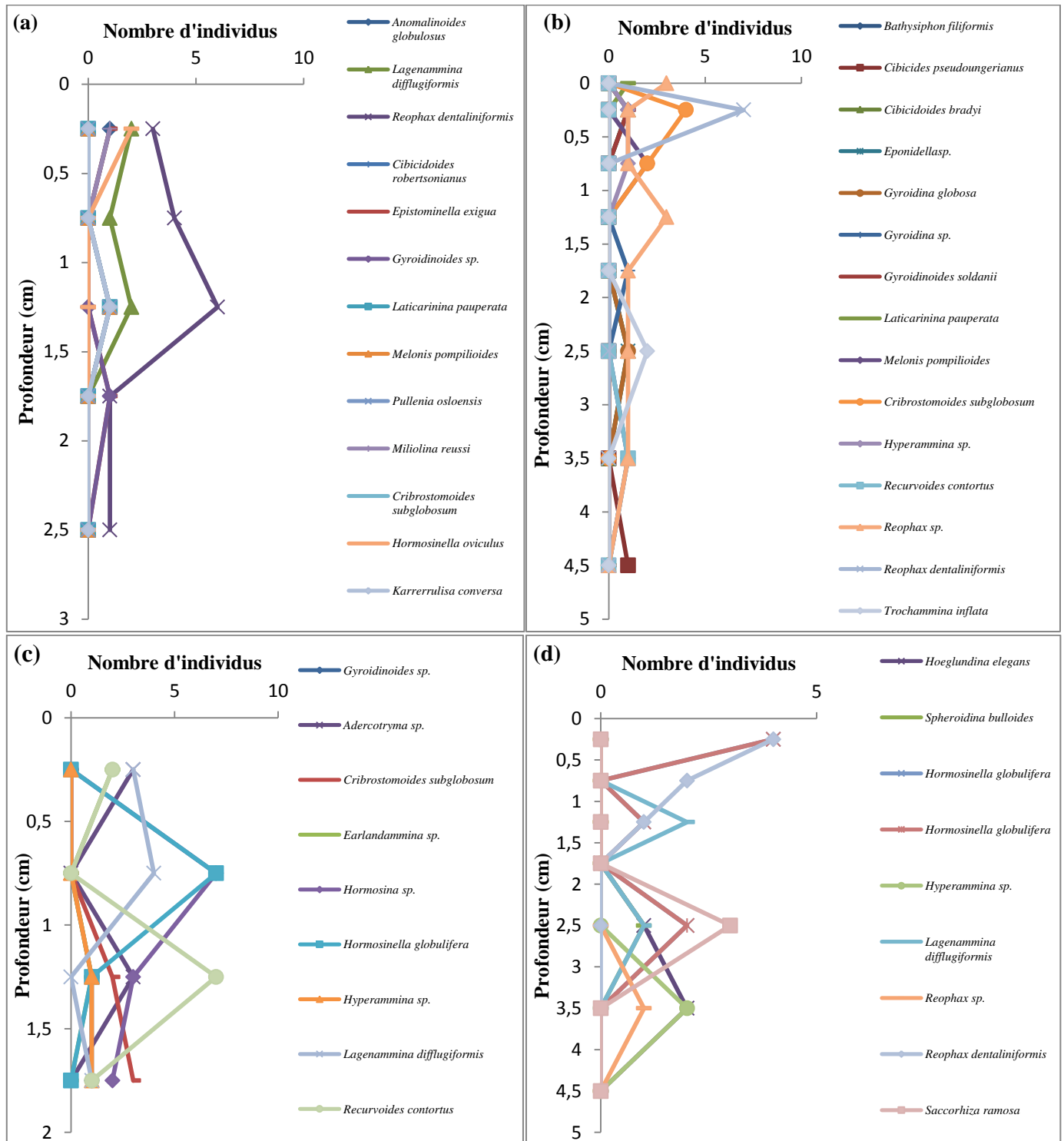
Pour les tests hyalins les valeurs varient de 2,1 f/g (MONO 4) à 0,01 (MONO 8).

Pour les tests porcelanés les valeurs varient de 0,26 f/g (MONO 4) à 0 f/g (MONO 7). L'abondance en foraminifères porcelanés vivants diminue avec l'augmentation de la profondeur des stations, depuis MONO 4 jusqu'à MONO 2 (0,06 f/g).

- Profils verticaux d'abondances en foraminifères vivants

Les foraminifères qui étaient vivants lors du carottage ont été identifiés et comptés. L'un des intérêts de cette démarche est de voir l'évolution de ces assemblages en fonction de la profondeur dans le sédiment pour comprendre les facteurs qui gouvernent la répartition des foraminifères actuels et de pouvoir comparer les différences avec

l'assemblage fossile. Ces foraminifères vivants sont piqués jusqu'à une profondeur dans le sédiment qui peut être différente d'une station à une autre, suivant le contenu en foraminifères.



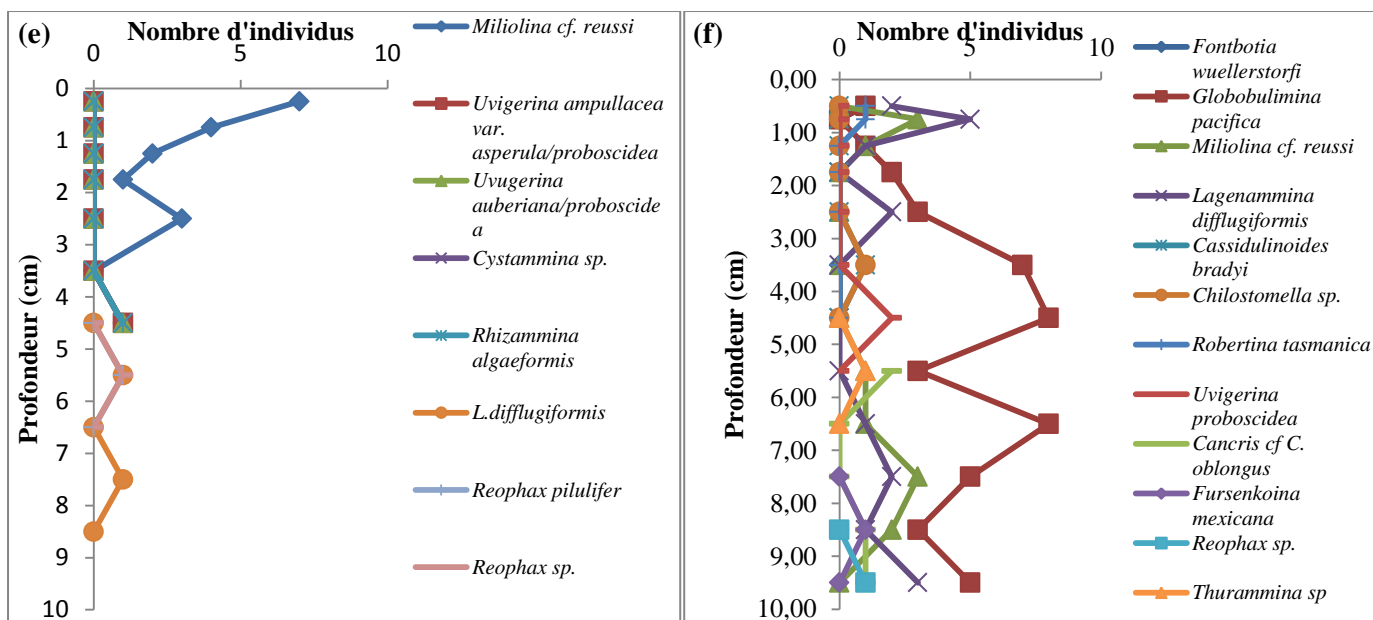


Figure 7 : Profils verticaux du contenu en foraminifères vivants de (a) MONO 2, (b) MONO 3, (c) MONO 4, (d) MONO 7, (e) MONO 8 et (f) MONO 9.

Les foraminifères de MONO 2 ont été piqués jusqu'à 3cm de profondeur dans le sédiment. Le contenu faunistique de cette station est de 24 espèces différentes et 53 individus qui se concentrent principalement dans les 2 premiers centimètres du sédiment. L'espèce *Reophax dentaliniformis* est la seule à présenter plus de 2 individus avec un pic de 7 individus dans l'échantillon 1-1,5 cm. Le genre *Reophax* possède un test agglutiné.

Les foraminifères de MONO 3 ont été piqués jusqu'à 5cm, on y dénombre 38 espèces différentes et 78 individus. Le genre le plus abondant est *Reophax* avec l'espèce *Reophax dentaliniformis* qui est la seule à dépasser les 4 individus avec un pic d'abondance dans l'échantillon 0-0,5cm. La majorité des espèces se concentre dans les 2 premiers centimètres où on trouve aussi un maximum de représentants.

Les foraminifères de MONO 4 ont été piqués jusqu'à 2cm, ce qui représente 18 espèces et 150 individus. 3 espèces ont des pics d'abondance de 7 individus dans les échantillons 0,5-1cm pour *Hormosina sp.* et *Homosinella globulifera*, et 1-1,5cm pour *Recurvoides contortus*. Ces trois espèces ont des tests agglutinés.

Les foraminifères de MONO 7 ont été piqués jusqu'à 5cm. 24 espèces et 56 individus ont été comptés. La distribution des pics d'abondance semble bimodale avec des pics dans l'échantillon le moins profond (0-0,5cm) où le maximum d'abondance de 4 individus est atteint pour les espèces *Reophax dentaliniformis* et *Homosinella globulifera*. La deuxième zone de concentration des pics se trouve entre 2 et 4cm, où l'espèce *Saccorhiza ramosa* domine. Toutes ces espèces sont des foraminifères à test agglutiné.

Pour les stations MONO 8 et 9, le piquage effectué de 0 à 5cm fait partie des résultats que j'ai obtenu pendant mon stage. Les données entre 5 et 10cm ont été acquise postérieurement par Laetitia Licari.

Au sein de MONO 8, on dénombre 8 espèces et 26 individus. L'unique espèce présente de 0 à 4cm est *Miliolina cf. reussi*, avec un maximum de 7 individus dans l'échantillon 0-0,5cm. A partir de 4cm d'autres espèces de foraminifères vivants sont présentes *Cystammina sp.*, *L. difflugiformis*, *Rhizammina algaeformis*, *Reophax pilulifer*, *Reophax sp.*, *Uvigerina auberiana* et *Uvigerina proboscidea*. Ces espèces ont des tests carbonatés hyalins excepté *M. cf. reussi*. qui possède un test porcelané et *Cystammina sp.* qui possède un test agglutiné.

Dans MONO 9, la distribution verticale des espèces est bimodale avec des pics d'abondance qui se concentrent dans premier centimètre où l'espèce *Lagenammina difflugiformis* (test agglutiné) domine avec 5 individus. La deuxième zone d'abondance s'étend entre 2 et 10cm avec l'espèce *Globobulimina pacifica* (test carbonaté hyalin) qui domine avec 46 individus, et deux pics de huit individus à 4,5 et 6,5cm.

Les photographies de ces espèces sont présentées dans les annexes V, VI et VII.

III.1.3. Abondances en foraminifères morts

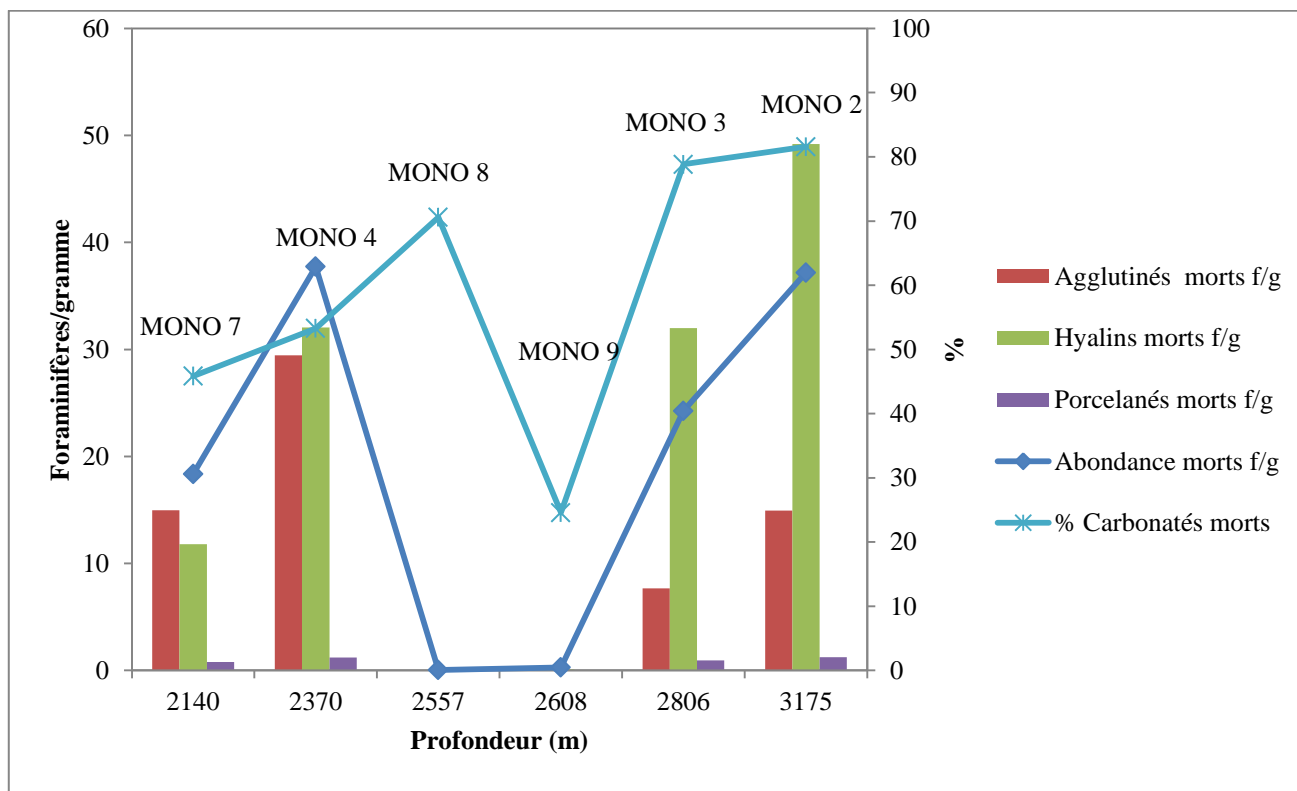


Figure 8 : Pourcentages et abondances en foraminifères morts, par type de test, et en fonction de la profondeur de chaque station.

La variation des rapports entre les différents types de tests des foraminifères morts ainsi que leurs abondances en fonction de la profondeur (autrement dit d'une station à une autre) sont également présentés (Figure 8).

L'abondance en foraminifères/gramme de sédiment varie de 0,08 f/g dans MONO 8 à 63 f/g dans MONO 4.

Le pourcentage en foraminifères carbonatés (abondance relative par rapport au total carbonatés plus agglutinés) varie entre 24,5% dans MONO 9 et 81,5% dans MONO 2. Si on exclut la valeur de MONO 9 on observe une tendance d'augmentation des pourcentages en foraminifère de type carbonaté avec l'augmentation de la profondeur des stations, depuis MONO 7 (47,8%) jusqu'à MONO 2. Cette augmentation du pourcentage des foraminifères à tests carbonatés est à mettre en relation avec une diminution du pourcentage des foraminifères à tests agglutinés avec la profondeur.

Les abondances par natures de test (Agglutinés, Hyalins et porcelanés) montre des grandes variations entre les stations. Pour les tests agglutinés les valeurs varient de 29,4 f/g (MONO 4) à 0,03 f/g (MONO 8).

Pour les tests hyalins les valeurs varient de 49,2 f/g (MONO 2) à 0,018 f/g (MONO 8). Ce sont les foraminifères morts à tests hyalin qui dominent les assemblages excepté dans MONO 7 et 8. Si on exclut les valeurs de MONO 8 et 9 (0,1 f/g) on observe une augmentation des abondances en foraminifères à tests hyalins avec l'augmentation de la profondeur des stations, depuis MONO 7 (11,8 f/g) jusqu'à MONO 2.

Pour les tests porcelanés les valeurs varient de 1,2 f/g (MONO 2) à 0 f/g (MONO 8).

III.1.3.1 Les foraminifères morts dominants de chaque station

Afin de normaliser la comparaison entre chaque station, seul le premier centimètre de sédiment a été étudié pour définir les espèces dominantes dans les assemblages en foraminifères morts (Annexe 14). Les pourcentages des individus dominants sont établis à partir du total d'individus pour le premier centimètre de chaque station (Annexe 14) excepté pour MONO 8 car il n'y avait pas de foraminifères morts dans les échantillons du premier centimètre de cette station.

L'assemblage en foraminifères morts du 1^{er} cm de MONO 2 est dominé par l'espèce *E. exigua* (6,8%), suivie d'*A. globulosus* (6,1%) et *F. wuellerstorfi* (5,7%).

L'assemblage en foraminifères morts du 1^{er} cm de MONO 3 est dominé par l'espèce *E. exigua* (18,3%), suivie d'*O. umbonatus* (6,9%) et *F. wuellerstorfi* (6,7%).

L'assemblage en foraminifères morts du 1^{er} cm de MONO 4 est dominé par l'espèce *Bulimina. aculeata* (5,3%), suivie d'*Uzbekistania charoides* (3,8%) et *L. difflugiformis* (4,6%).

L'assemblage en foraminifères morts du 1^{er} cm de MONO 7 est dominé par l'espèce *Karrerrulina conversa* (5,5%), suivie de *B. aculeata* (5,5%) et *Cyclammina trullissata* (4,6%).

L'assemblage en foraminifères morts du 1^{er} cm de MONO 9 est dominé par l'espèce *L. difflugiformis* (67,9%).

III.1.3.2 Foraminifères morts de MONO 3

Les résultats des assemblages sur individus morts sont détaillés pour une seule station, MONO3, car les échantillons de MONO3 sont les seuls dont le contenu a été piqué jusqu'à la profondeur de 5cm (Figure 9).

Le profil vertical d'abondance en foraminifères morts est présenté depuis l'interface (couche d'eau directement au-dessus du sédiment contenant du matériel en suspension) jusqu'à 5 cm de profondeur dans le sédiment (Figure 9). On constate la présence d'un nombre important d'espèces, dont une qui domine dans chaque échantillon : *Epistominella exigua*. Les deux autres espèces les plus abondantes sont *Oridorsalis umbonatus* et *Fontbotia wuellerstorfi*. Les abondances et le nombre d'espèces sont variables entre les différents échantillons, avec un minimum 165 individus dans l'échantillon 0-0,5cm, et un maximum de 280 individus dans l'échantillon 4-5cm. Le nombre d'espèces est le plus élevé dans l'échantillon 4-5cm avec 54 espèces différentes. L'échantillon 0-0,5cm le moins riches en espèces avec 23 espèces différentes.

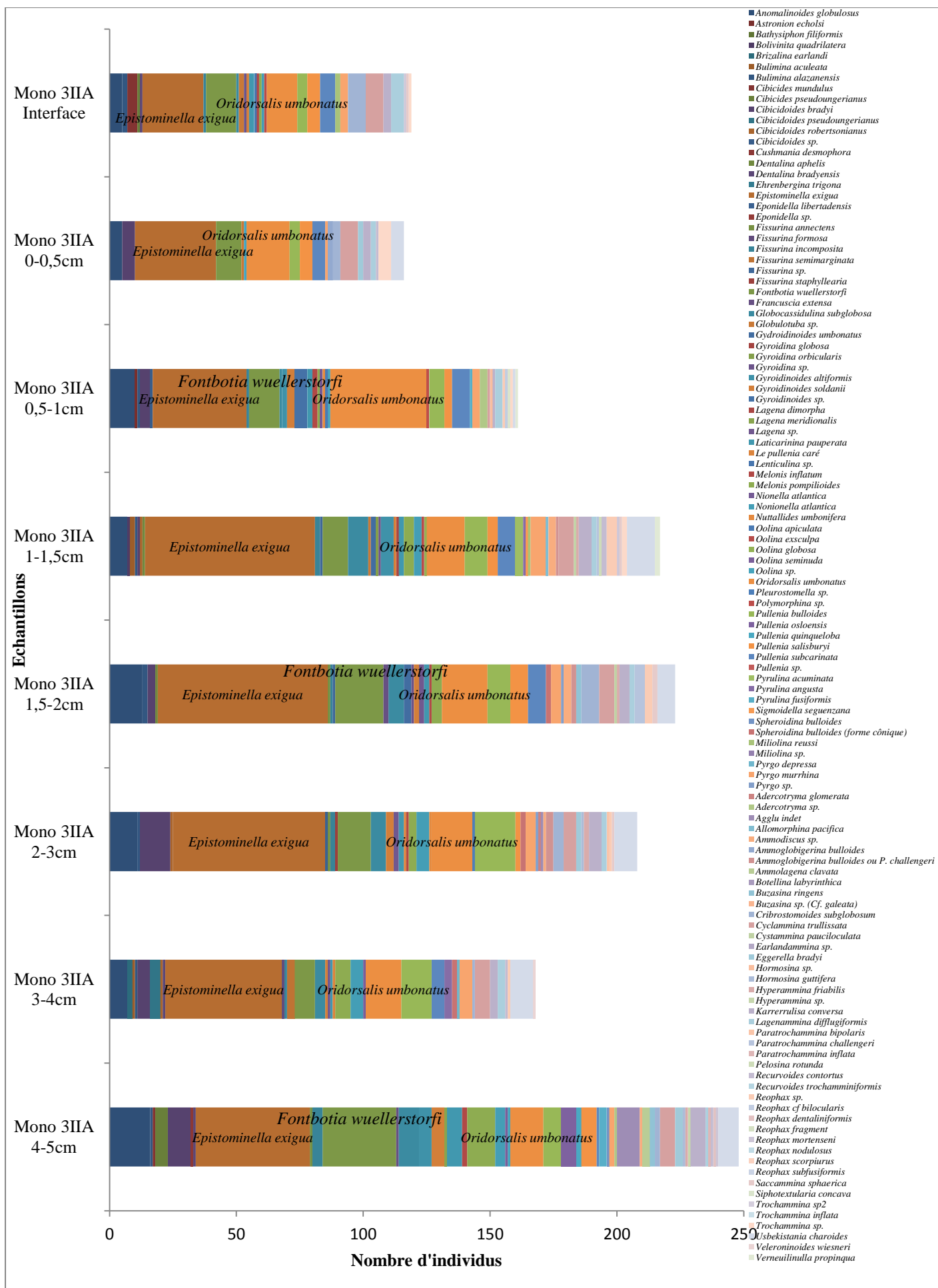


Figure 9 : Profil vertical du contenu en foraminifères morts de MONO 3.

III.2. Résultats des mesures isotopiques

III.2.1 Isotopes de l'eau de fond

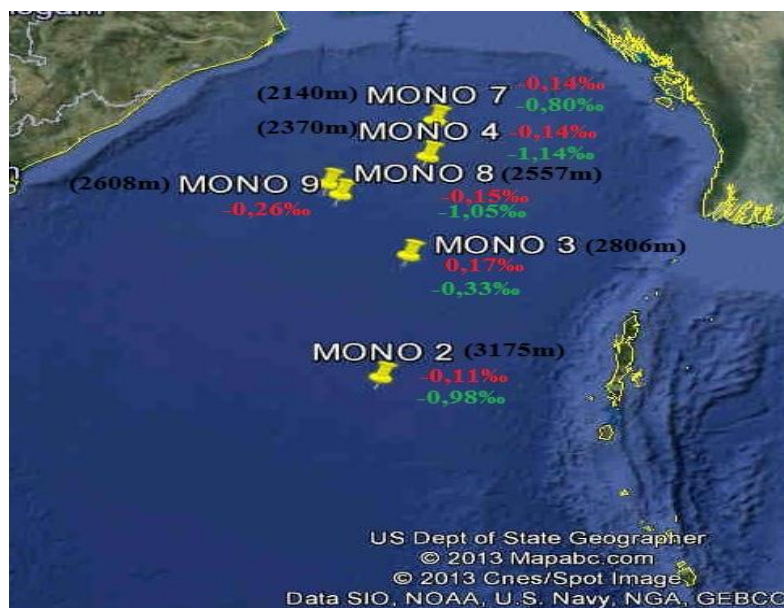
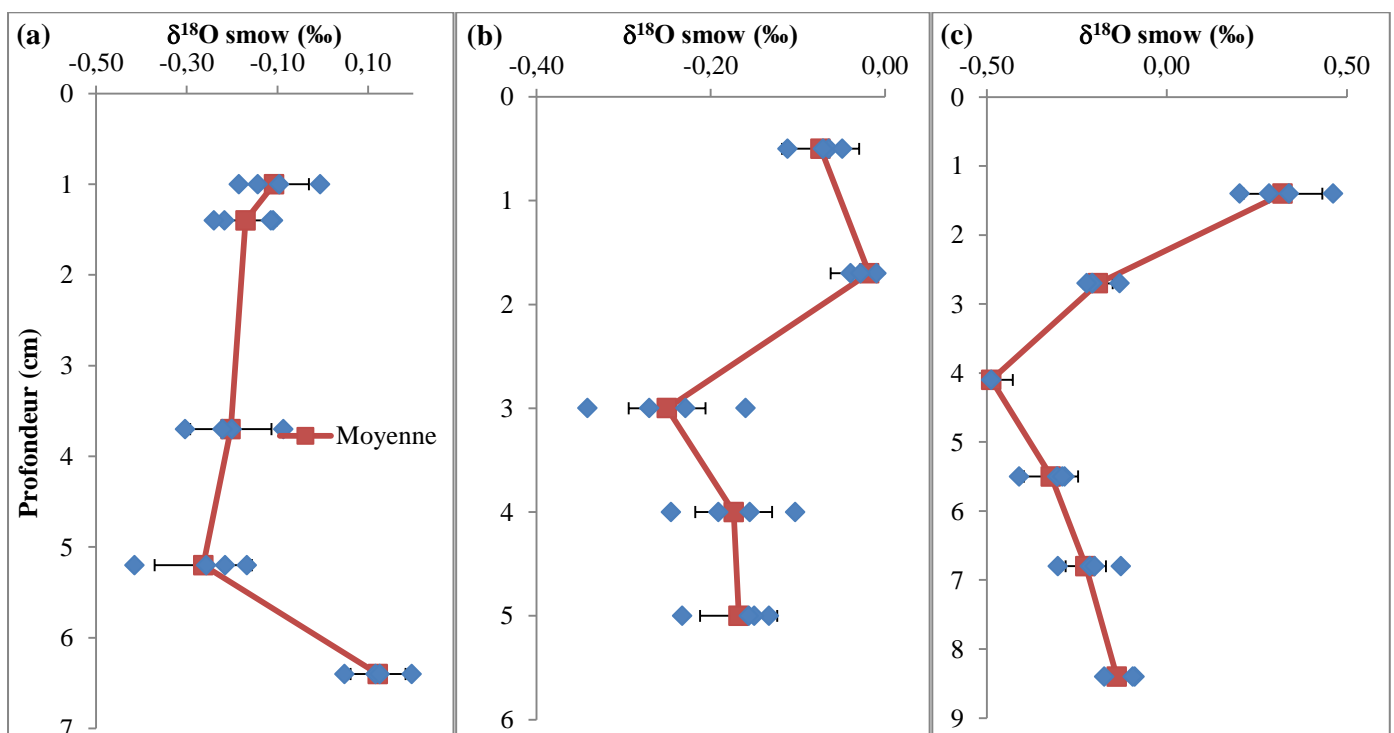


Figure 10 : $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau de fond des six stations.

Les analyses ont été menées sur les 6 stations étudiées dans le cadre de ce travail. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de fond varient de -0,26‰ au niveau de MONO 9 à 0,17‰ au niveau de MONO 3. Les valeurs de MONO 2, 4, 7 et 8 sont respectivement -0,11‰, -0,14‰, -0,14‰ et -0,15‰.

Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ varient de -1,14‰ au niveau MONO 4 à -0,33‰ dans l'eau de fond de MONO 3. Les valeurs de MONO 2, 7, 8 sont respectivement -0,98‰, -0,80‰, -1,05‰. La valeur obtenue pour l'eau de fond au niveau de MONO9 étant de YY, très éloignée des valeurs connues pour l'eau de fond des océans (variations comprises entre -Z et -P), elle n'a pas été retenue pour la discussion. En l'absence de problème analytique pendant la mesure, il semble que cela soit lié à un problème d'échantillonnage ou de conservation de l'échantillon avant l'analyse.

III.2.2. Isotopes de l'eau interstitielle



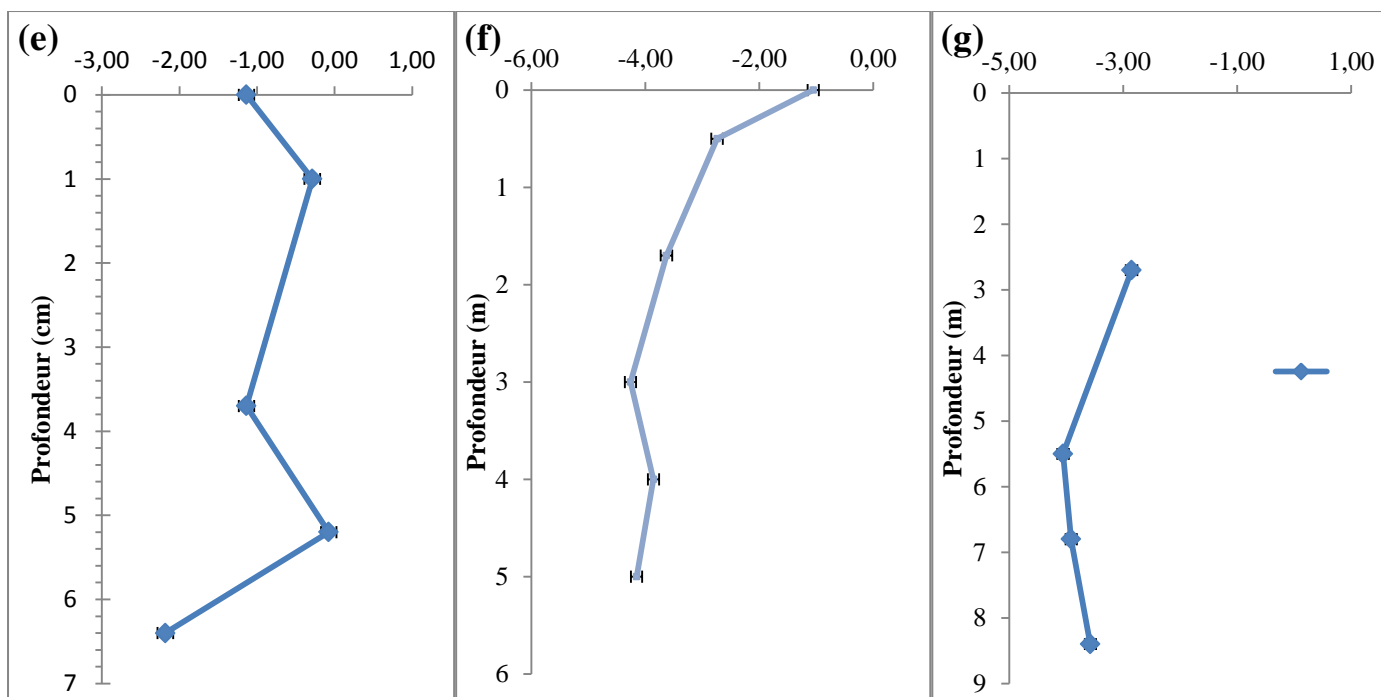


Figure 11 : Profils verticaux du $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau interstitielle des stations MONO 4 (a, e), MONO 8 (b, f) et MONO 9 (c, g).

Au vu des difficultés techniques associées au prélèvement des sédiments de surface par carottier d'interface aux profondeurs échantillonnées (> 1000m), seules 3 stations ont permis de faire des prélèvements d'eau interstitielle dans la colonne sédimentaire.

$\delta^{18}\text{O}$:

Au niveau de la station MONO 4, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ varient entre -0,41 et 0,20 ‰. Les valeurs moyennes sont de -0,11±0,08‰ à 1cm, -0,17±0,07‰ à 1,4cm, -0,20±0,09‰ à 3,7cm, -0,26±0,11 à 5,2cm, et 0,12±0,06‰ à 6,4cm de profondeur. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ sont identiques suivant le profil en tenant compte de la variabilité, excepté à 6,4 cm où la valeur est de 0,12±0,06‰.

Au niveau de la station MONO 8, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ varient entre -0,34 et 0 ‰. Les valeurs moyennes sont de -0,07±0,03‰ à 0,5cm, -0,02±0,02‰ à 1,7cm, -0,25±0,08‰ à 3cm, -0,17±0,06‰ à 4cm, et -0,17±0,04‰ à 5cm de profondeur. Les valeurs sont plus élevées dans les 2 premiers centimètres avec un maximum de 0,02±0,02‰ à 1,7cm. De 3 à 5cm les valeurs sont similaires autour de 0,2±0,05‰

Au niveau de la station MONO 9, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ varient entre -0,49 et 0,46 ‰. Les valeurs moyennes sont de 0,32±0,11‰ à 1,4cm, -0,19±0,04‰ à 2,7cm, -0,32±0,06‰ à 5,5cm, -0,23±0,07‰ à 6,8cm, et -0,14±0,06‰ à 8,6cm.

$\delta^{13}\text{C}$:

Au niveau de la station MONO 4, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ varient entre -2,18‰ à 6,4cm et -0,08‰ à 5,2cm sans tendance observable.

Au niveau de la station MONO 8, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ varient entre -4,15‰ à 5cm et -1,05‰ à 0cm. Il y a une nette tendance de diminution en fonction de la profondeur, la pente de cette décroissance est forte dans les tous premiers centimètres du sédiment, puis elle devient faible en profondeur.

Au niveau de la station MONO 9, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ varient entre -4,05‰ à 5,5cm et -2,85‰ à 2,7cm. Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ diminuent avec la profondeur dans le sédiment jusqu'à 5,5cm, puis les valeurs augmentent légèrement avec la profondeur de 5,5cm à 8,5cm, avec respectivement -4,05‰ et -3,58‰.

III.2.3. Résultats isotopiques dans les tests des foraminifères

Les mesures de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{18}\text{O}$ ont été effectuées sur les tests fossiles des espèces *A. globulosus*, *E. exigua*, *F. wuellerstorfi* et *O. umbonatus*, provenant des échantillons de MONO 2, 3, 4, 7. Des mesures ont aussi été effectuées

sur les tests d'individus vivants et morts pour les espèces *M. pompilioides* et *H. elegans* de la station MONO 7, ainsi que des individus vivants des espèces *G. pacifica* et *F. wuellerstorfi* de la station MONO 9. La stratégie de sélection de ces espèces pour les analyses isotopiques a été guidée à la fois par les résultats des assemblages faunistiques, déterminant le type d'espèces et leur nombre pour chaque échantillon, mais aussi suivant leur intérêt pour les futures études paléocéanographiques. Les détails de ces critères de choix sont détaillés ci-dessous :

- *F. wuellerstorfi* : Cette espèce est très étudiée pour reconstituer la chimie de l'eau de fond dans le passé (e.g., Schmiedl et al., 2004). Ceci est en partie dû au fait que ce foraminifère est strictement épibenthique, suspensivore. Les individus *F. wuellerstorfi* vivent parfois quelques centimètres au-dessus du sédiment en se fixant sur des promontoires (Murray, 2006). De plus, l'effet vital de cette espèce est bien documenté dans la littérature (McCorkle, 1990, Fontanier, 2008). Enfin, cette espèce est présente dans les échantillons de toutes les stations excepté MONO 8 ce qui rend son étude plus aisée dans le cadre de ce travail.

- *A. globulosus* : Cette espèce a été choisie car elle est épibenthique comme *F. wuellerstorfi*. L'originalité de ce travail repose sur le peu de données existant pour cette espèce. *A. globulosus* est très présente dans les échantillons, associée à *F. wuellerstorfi* ce qui rend possible la comparaison entre ces deux espèces dans toutes ces stations et en couvrant un large panel d'environnements différents. Seuls les individus morts de cette espèce ont été analysés.

- *E. exigua* : Cette espèce est une espèce associée au phyto-détritus (Smart et al., 2008). Or, dans la Baie du Bengale, ces apports en phytodétritus liés à la production primaire sont fortement influencés par la mousson, ce qui rend cette espèce particulièrement intéressante dans le cadre de ce travail. Seuls les individus morts de cette espèce ont été analysés.

- *O. umbonatus* : Cette espèce est décrite comme endobenthique, largement répandue dans les océans, et de ce fait très utilisée pour les études paléocéanographiques notamment lorsque les foraminifères du genre *Cibicidoides* sont absents (Rathmann et al., 2008). Seuls les individus morts de cette espèce seront analysés.

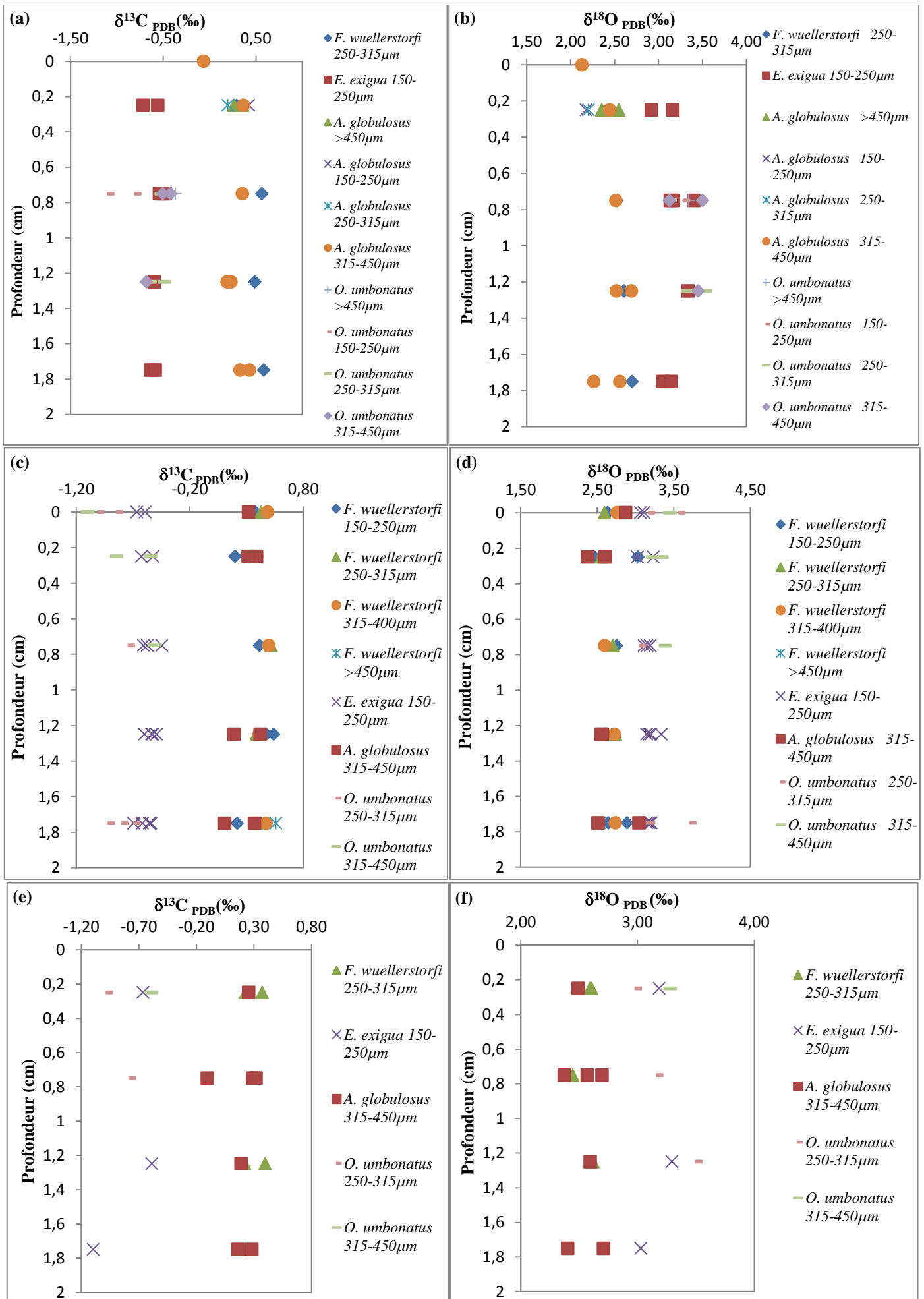
- *M. pompilioides* : Cette espèce fait partie de l'endofaune peu profonde, et elle a aussi été choisie afin d'effectuer des comparaisons entre individus morts et vivants.

- *H. elegans* : cette espèce possède un test de nature aragonitique. Elle est décrite comme étant épibenthique (Fontanier et al., 2005), néanmoins les individus vivants de *H. elegans* étaient présents à des profondeurs supérieures à 3cm dans les échantillons de cette étude. Sur cette espèce il sera aussi possible d'effectuer des comparaisons entre spécimens morts et vivants.

- *G. pacifica* : cette espèce fait partie de l'endofaune profonde, c'est une espèce très étudiée pour reconstituer les caractéristiques chimiques de l'eau interstitielle (McCorkle et al., 1990). Seuls les individus vivants de cette espèce ont été analysés.

Ces analyses isotopiques ont été effectuées sur des gammes de taille différentes lorsque cela a été possible (présence de différentes classes de tailles des tests et nombre suffisant d'individus), avec comme objectif de mieux contraindre l'effet de taille sur le signal isotopique. Les mesures isotopiques n'ont été effectuées que sur les individus morts des deux premiers centimètres dans le sédiment. Au-delà de cette profondeur, l'interprétation est plus compliquée car les assemblages de foraminifères morts sont composés d'individus de différentes générations.

In fine, cette sélection permet de i) comparer les signaux géochimiques entre individus morts et vivants, ii) étudier le signal isotopique des tests de foraminifères vivants à différents niveaux dans le sédiment en relation avec les variations de la chimie des eaux interstitielles, iii) étudier la saisonnalité des apports en phytodétritus et ses relations avec la mousson, et iv) étudier l'effet de taille.



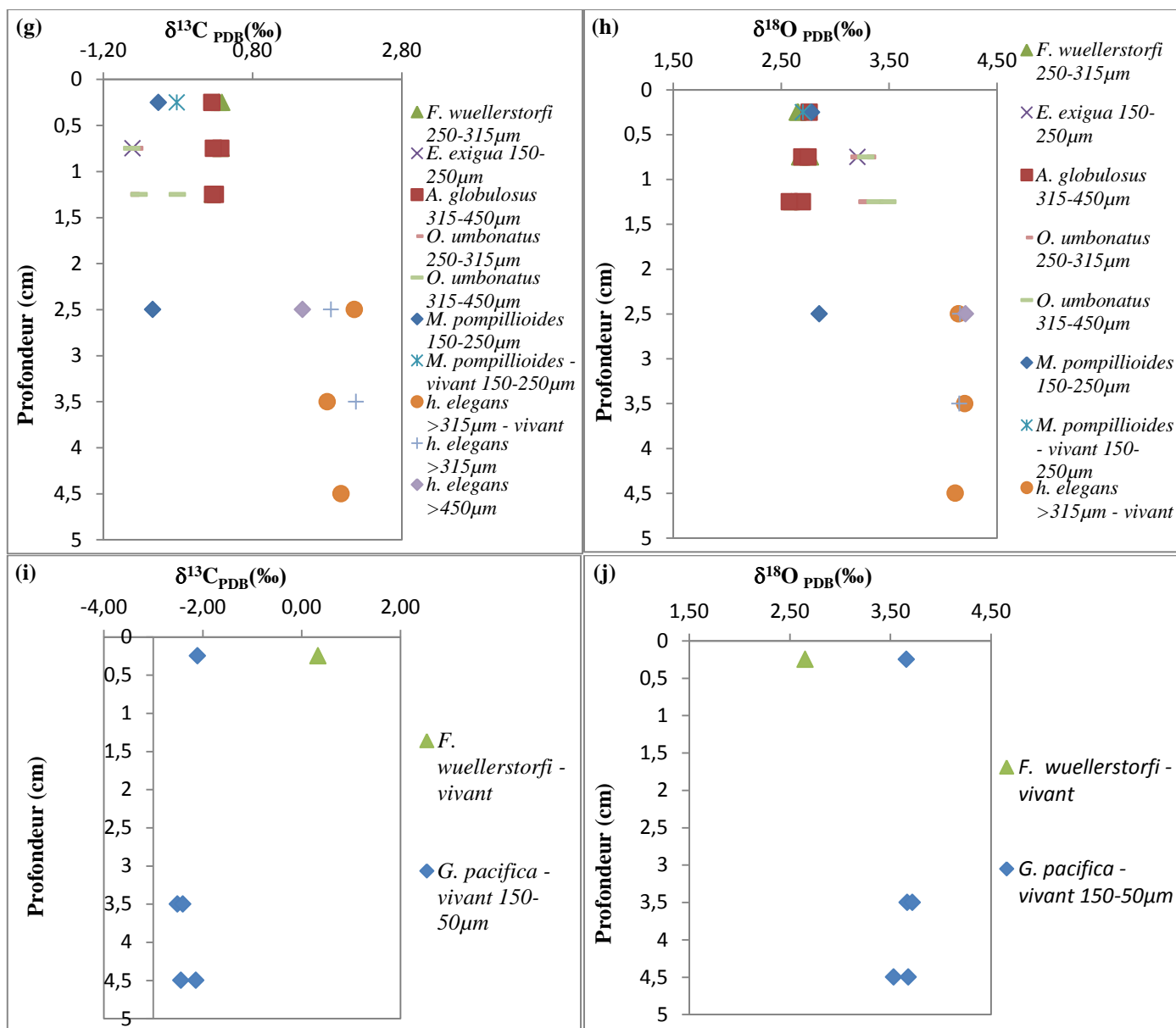


Figure 12 : Profils verticaux des analyses de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{18}\text{O}$ des stations MONO 2 (a, b), MONO 3 (c, d), MONO 4 (e, f) MONO 7 (g, h) et MONO 9 (i, j).

MONO 2 :

Les analyses de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{18}\text{O}$ ont été effectuées sur les individus morts appartenant aux espèces *A. globulosus*, *E. exigua*, *F. wuellerstorfi* et *O. umbonatus*, dans les échantillons allant de 0 à 1,75cm de profondeur dans le sédiment.

- $\delta^{13}\text{C}$ (figure 12a) :

A. globulosus : Les mesures ont été effectuées sur la gamme de taille 150-250 μm , 250-315 μm , 315-450 μm et >450 μm . Les valeurs pour cette espèce varient de -0,07‰ à 0cm à 0,43‰ à 0,25cm. A 0cm la valeur est de -0,07‰, à 0,25cm elle est entre 0,26 et 0,42‰, à 0,75 cm elle est de 0,35‰, à 1,25cm elles sont de 0,19 et 0,23‰, et à 1,75cm 0,33 et 0,43‰.

Pour la gamme 150-250 μm la valeur est de 0,42‰, pour 250-315 μm 0,2‰, pour 315-450 μm les valeurs varient entre 2,13 et 2,69‰.

E. exigua : Les mesures ont été effectuées sur la gamme de taille 150-250 μm . Les valeurs pour cette espèce varient de -0,48‰ à 0,75cm à -0,71‰ à 0,25cm. Les valeurs à 0,25cm sont -0,71 et -0,56‰, à 0,75cm elles varient entre -0,54‰, à 1,25cm elle est de -0,6‰ et à 1,75 cm les valeurs sont de -0,58 et -0,63‰.

F. wuellerstorfi : Les mesures ont été effectuées sur la gamme de taille 250-315 μm Les valeurs pour cette espèce varient de 0,59‰ à 1,75cm à 0,29‰ à 0,25cm. A 0,25cm la valeur est de 0,29‰, à 0,75cm elle est de 0,56‰, à 1,25cm elle est de 0,49‰ et à 1,75cm elle est de 0,59‰.

O. umbonatus : Les mesures ont été effectuées sur les tailles 150-250 μm , 250-315 μm , 315-450 μm et >450 μm . Les mesures ont été effectuées sur les tailles Les valeurs pour cette espèce varient de -0,37‰ à -1,10‰ à 0,75cm. A 0,75cm les valeurs varient entre -1,1 et -0,37‰, à 1,25cm les valeurs varient entre -0,68 et -0,49‰.

Pour la gamme 150-250µm les valeurs sont -1,1 et -0,81‰, pour 250-315µm elles sont entre -0,64 et -0,49‰, pour 315-450µm elles sont entre -0,68 et -0,42‰, et pour >450µm elle est de -0,37‰.

Les espèces *E. exigua* et *O. umbonatus* ont des moyennes de $\delta^{13}\text{C}$ très proches, respectivement -0,58‰ (avec un écart-type moyen de 0,05‰) et -0,61‰ (avec un écart-type moyen de 0,17‰). Et les espèces *A. globulosus* et *F. wuellerstorfi* ont aussi des moyennes proches, respectivement 0,28‰ (avec un écart-type moyen de 0,1‰) et 0,48‰ (avec un écart-type moyen de 0,09‰).

- $\delta^{18}\text{O}$ (figure 12b) :

A. globulosus : Les valeurs pour cette espèce varient de 2,69‰ à 1,5cm à 2,13‰ à 0cm. A 0cm 2,13‰, à 0,25cm 2,18-2,55‰, à 0,75cm 2,52‰, à 1,25cm 2,52‰ et 2,69‰, et à 1,75cm 2,26‰ et 2,56‰.

Pour 150-250µm 2,18‰, pour 250-315µm 2,2‰, pour 315-450µm 2,13-2,69‰ et pour >450µm 2,36‰ et 2,55‰.

E. exigua : Les valeurs pour cette espèce varient de 3,06‰ à 1,75cm à 3,4‰ à 0,75cm. A 0,25cm 2-92‰ et 3,17‰, à 0,75cm 3,14-3,4‰, à 1,25cm 3,34‰ et à 1,75cm 3,06‰ et 3,15‰.

F. wuellerstorfi : Les valeurs pour cette espèce varient de 2,46‰ à 0,25cm à 2,70‰ ç 1,75cm. A 0,25cm 2,46‰, à 0,75cm 2,53‰, à 1,25cm 2,61‰ et à 1,75cm 2,7‰.

O. umbonatus : Les valeurs pour cette espèce varient de 3,13‰ à 0,75 à 3,54‰ à 1,5cm. A 0,75cm 3,13-3,5‰ et à 1,25cm 3,34-3,54‰.

Pour 150-250µm 3-13‰ et 3,29‰, pour 250-315µm 3,13-3,54‰, pour 315-450µm 3,13-3,50‰ et pour >450µm 3,34‰.

La moyenne de $\delta^{18}\text{O}$ d'*A. globulosus* est très proche de celle de *F. wuellerstorfi* (respectivement $2,58\pm 0,15\%$ et $2,40\pm 0,08\%$), et la moyenne d'*E. exigua* proche de celle d'*O. umbonatus* (respectivement $3,17\pm 0,1\%$ et $3,32\pm 0,13\%$).

Les résultats isotopiques de MONO 2 sont identiques dans la gamme de la variabilité naturelle quelle que soit la taille analysée.

MONO 3 :

Les analyses de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{18}\text{O}$ ont été effectuées sur les individus morts appartenant aux espèces *A. globulosus*, *E. exigua*, *F. wuellerstorfi* et *O. umbonatus*, dans les échantillons allant de 0 à 1,75cm de profondeur dans le sédiment.

- $\delta^{13}\text{C}$ (figure 12c) :

A. globulosus : Les mesures ont été effectuées sur la taille 315-450µm. Les valeurs pour cette espèce varient de 0,11‰ à 1,75cm à 0,42‰ à 0,25cm. A 0cm 0,32‰, à 0,25cm 0,39‰ et 0,32‰, à 1,25cm 0,19‰ et 0,42‰, et à 1,75cm 0,11‰ et 0,37‰.

E. exigua : Les mesures ont été effectuées sur la taille 150µm-250µm. Les valeurs pour cette espèce varient de -0,45‰ à 0,75cm à -0,69 à 1,75cm. . A 0cm -0,67‰ et -0,59‰, à 0,25cm -0,63‰ et -0,53‰, à 0,75cm -0,61‰ à -0,45‰, à 1,25cm -0,6‰ à -0,49‰, et à 1,75cm -0,69‰ à -0,54‰.

F. wuellerstorfi : Les mesures ont été effectuées sur la taille 150-250µm, 250-315µm, 315-450µm et >450µm. Les valeurs pour cette espèce varient de 0,56‰ à 1,75cm à 0,20‰ à 0,25cm. A 0cm 0,38‰ à 0,48‰, à 0,25cm 0,2‰ à 0,39‰, à 0,75cm 0,41‰ à 0,51‰, à 1,25cm 0,39‰ à 0,54‰, et à 1,75cm 0,22‰ à 0,56‰.

Pour 150-250µm 0,2‰ à 0,54‰, pour 250-315µm 0,35‰ à 0,52‰, pour 315-450µm 0,39‰ et 0,5‰, et pour >450µm 0,56‰.

O. umbonatus : Les mesures ont été effectuées sur les tailles 250-315µm et 315-450µm. Les valeurs pour cette espèce varient de -0,51‰ à 0,75cm à -1,1‰ à 0cm. A 0cm -1,1‰ à -0,85‰, à 0,25cm -0,84‰ et -0,55‰, à 0,75cm -0,74‰ et -0,51‰, et à 1,75 -0,92‰ à -0,69‰.

- $\delta^{18}\text{O}$ (figure 12d) :

A. globulosus : Les valeurs pour cette espèce varient de 3,05‰ à 1,75cm à 2,38‰ à 0,25cm. A 0cm 2,87‰, à 0,25cm 2,38‰ et 2,61‰, à 1,25cm 2,55‰ et 2,57‰ et à 1,75cm 2,51‰ et 3,05‰.

E. exigua : Les mesures ont été effectuées sur les tailles Les valeurs pour cette espèce varient de 3,34‰ à 1,25cm à 3,03‰ à 0,25cm. A 0cm 3,06‰ et 3,11‰, à 0,25cm 3,03‰ et 3,23‰, à 0,75cm 3,11‰ et 3,19‰, à 1,25cm 3,15‰ à 3,34‰, et à 1,75cm 3,15‰ à 3,2‰.

F. wuellerstorfi : Les valeurs pour cette espèce varient de 3,03‰ à 0,25cm à 2,47‰ à 0,25cm. A 2,6‰ à 2,76‰, à 0,25cm 2,47‰ à 3,03‰, à 0,75cm 2,6‰ à 2,75‰, à 1,25cm 2,61‰ à 2,74‰, et à 1,75cm 2,52‰ à 2,89‰.

Pour 150-250µm 2,47-3,03‰, pour 250-315µm 2,52-2,74‰, pour 315-450µm 2,59-2,76‰.

O. umbonatus : Les valeurs pour cette espèce varient de 3,71‰ à 1,75cm à 3,05‰ à 0,75cm. A 0cm 3,17-3,57‰, à 0,25cm 3,23‰ et 3,45‰, à 0,75cm 3,05‰ et 3,39‰, à 1,75cm 3,14‰ à 3,71‰.

Pour 250-315µm 3,05-3,71‰ et pour 315-450µm 3,23-3,45‰.

Les résultats isotopiques de MONO 3 sont identiques dans la gamme de la variabilité naturelle quelle que soit la taille analysée.

MONO 4 :

Les analyses de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{18}\text{O}$ ont été effectuées sur les individus morts appartenant aux espèces *A. globulosus*, *E. exigua*, *F. wuellerstorfi* et *O. umbonatus*, dans les échantillons allant de 0 à 1,75cm de profondeur dans le sédiment.

- $\delta^{13}\text{C}$ (figure 12e) :

A. globulosus : Les mesures ont été effectuées sur la taille 315-450 μm . Les valeurs pour cette espèce varient de 0,32‰ à -0,11‰ à 0,75cm. A 0,25cm 0,25‰, à 0,75cm -0,11‰ à 0,32‰, à 1,25cm 0,19‰, et à 1,75cm 0,16‰ et 0,28‰.

E. exigua : Les mesures ont été effectuées sur la taille 150-250 μm . Les valeurs pour cette sont de -0,66‰ à 0,25cm, -0,59‰ à 1,25cm, et -1,1‰ à 1,75cm.

F. wuellerstorfi : Les mesures ont été effectuées sur la taille 250-315 μm . Les valeurs pour cette espèce varient de 0,4‰ à 0,22‰ à 1,25cm. A 0,25cm 0,37‰ et 0,23‰, à 0,75cm 0,31‰, à 1,25cm 0,22‰ et 0,4‰.

O. umbonatus : Les mesures ont été effectuées sur les tailles 250-315 μm et 315-450 μm . Les valeurs pour cette espèce varient de -0,59‰ à 0,25cm à -1,3‰ à 1,25cm. A 0,25cm -0,98‰ et -0,59‰, à 0,75cm -0,79‰, et 1,25cm -1,3‰.

Pour 250-315 μm -1,3‰ à -0,79‰, et pour 315-450 μm -0,59‰.

On constate que les valeurs entre *A. globulosus* et *F. wuellerstorfi* et entre *E. exigua* et *O. umbonatus* sont proches.

- $\delta^{18}\text{O}$ (figure 12f) :

A. globulosus : Les valeurs pour cette espèce varient de 2,71‰ à 1,75cm à 2,37‰ à 0,75cm. A 0,25cm 2,4‰, à 0,75cm 2,37‰ à 2,7‰, à 1,25cm 2,6‰, à 1,75cm 2,4‰ et 2,71‰.

E. exigua : Les mesures ont été effectuées sur les tailles Les valeurs pour cette espèce sont de 3,19‰ à 0,25cm, 3,30‰ à 1,25cm et 3,03‰ à 1,75cm.

F. wuellerstorfi : Les valeurs pour cette espèce varient de 2,62‰ à 1,25cm à 2,45‰ 0,75cm. A 0,25cm 2,61‰ et 2,59‰, à 0,75cm 2,45‰, et à 1,25cm 2,62‰ et 2,6‰.

O. umbonatus : Les valeurs pour cette espèce varient de 2,98‰ à 0,25cm à 3,5‰ à 1,25cm. A 0,25cm 2,98‰ et 3,28‰, à 0,75cm 3,17‰ et à 1,25 3,5‰.

Pour 250-315 μm 2,98-2,50‰ et pour 315-450 μm 3,28‰.

Les résultats isotopiques de MONO 4 sont identiques dans la gamme de la variabilité naturelle quelle que soit la taille analysée.

MONO 7 :

Les analyses ont été effectuées sur des foraminifères morts appartenant aux espèces : *A. globulosus*, *E. exigua*, *F. wuellerstorfi*, *H. elegans*, *M. pompilioides* et *O. umbonatus*. Ainsi que sur des individus vivants appartenant aux espèces *H. elegans* et *M. pompilioides*. La profondeur dans le sédiment va de 0,25 à 4,5cm.

- $\delta^{13}\text{C}$ (figure 12g) :

A. globulosus : Les mesures ont été effectuées sur la taille 315-450 μm . Les valeurs pour cette espèce varient de 0,38‰ à 0,75cm à 0,26‰ à 0,25cm. A 0,25cm 0,26‰, à 0,75 0,38‰ et 0,28‰, à 1,25cm 0,3‰ et 0,27‰.

E. exigua : La valeur de $\delta^{13}\text{C}$ pour cette espèce est de -0,81‰ à 0,75cm.

F. wuellerstorfi : Les mesures ont été effectuées sur la taille 250-315 μm . Les valeurs pour cette espèce varient de 0,39‰ à 0,25cm à 0,26‰ à 1,25cm. A 0,25cm 0,39‰ et 0,35‰, à 0,75cm 0,38‰ et 0,37‰, et à 1,25cm 0,26‰.

H. elegans (vivants) : Les mesures ont été effectuées sur la taille 315-450 μm . Les valeurs pour cette espèce sont 2,17‰ à 2,5cm, 1,47‰ à 2,5cm, et 2,19‰ à 3,5cm.

H. elegans (morts) : Les mesures ont été effectuées sur la taille 315-450 μm et >450 μm . les valeurs sont à 2,5cm de 1,85‰ pour 315-450 μm et 1,47‰ pour >450 μm . à 3,5cm la valeur est de 2,19‰ (315-450 μm).

M. pompilioides (vivant): La valeur est de -0,21‰, à 0,25cm.

M. pompilioides (morts) : Les valeurs pour cette espèce sont -0,46‰ à 0,25cm à -0,54‰ à 2,5cm.

O. umbonatus : Les mesures ont été effectuées sur les tailles 250-315 μm et 315-450 μm . Les valeurs pour cette espèce varient de -0,21‰ à -0,82‰ à 1,25 cm. A 0,75cm -0,82‰ à -0,78‰, à 1,25cm -0,82‰ à -0,21‰.

Pour 250-315 μm -0,82‰ à -0,78, pour 315-450 μm -0,82‰ à -0,21‰.

Les valeurs de *M. pompilioides* sont proches de celles du couple *E. exigua* et *O. umbonatus*, avec très peu de différence entre l'individu vivant et les deux mesures sur les individus morts (respectivement -0,21‰, -0,46‰ et -0,54‰). En ce qui concerne *H. elegans*, les valeurs sont supérieures aux valeurs des autres espèces de 1,8‰ pour les individus morts, et 2‰ pour les individus morts.

- $\delta^{18}\text{O}$ (figure 12h) :

A. globulosus : Les valeurs pour cette espèce varient de 0,38‰ à 0,75cm à 0,26‰ à 0,25cm. A 0,25cm 2,76‰, à 0,75cm 2,69‰ et 2,75‰, à 1,25cm 2,7‰ et 2,58‰.

E. exigua Les mesures ont été effectuées sur la taille 150-250 μm . La valeur de $\delta^{18}\text{O}$ pour cette espèce est de 3,21‰.

F. wuellerstorfi : Les mesures ont été effectuées sur la taille 250-315 μm . Les mesures ont été effectuées sur les tailles. Les valeurs pour cette espèce varient de 2,77‰ à 0,75cm à 2,6‰ à 1,25cm. A 0,25cm 2,65‰ et 2,66‰, à 0,75cm 2,67‰ et 2,77‰ et à 1,25cm 2,6‰.

H. elegans (vivants) : Les valeurs pour cette espèce sont 4,15‰ à 2,5cm, 4,21‰ à 2,5cm, et 4,15‰ à 3,5cm.

H. elegans (morts) : Les valeurs sont à 2,5cm de 4,16‰ pour 315-450 μm et 4,21‰ pour >450 μm . à 3,5cm la valeur est de 4,15‰ (315-450 μm).

M. pompilioides (vivant) : La valeur est de 2,71‰, à 0,25cm.

M. pompilioides (morts) : Les valeurs pour cette espèce sont 2,78‰ à 0,25cm à 2,85‰ à 2,5cm.

O. umbonatus : Les valeurs pour cette espèce varient de 3,49‰ à 1,25cm à 3,15‰ à 0,75cm.

Les variations intra-spécifiques sont très peu marquées, notamment pour *H. elegans*. La différence entre morts et vivants est aussi très faible. A 0,75cm 3,15‰ 3,3‰, à 1,25cm 3,22‰ et 3,49‰.

Les résultats isotopiques de MONO 7 sont identiques dans la gamme de la variabilité naturelle quelle que soit la taille analysée.

MONO 9 :

Les mesures ont été effectuées sur l'unique individu vivant de *F. wuellerstorfi* présent dans ces échantillons, et sur des individus vivants de l'espèce *G. pacifica*. La profondeur dans le sédiment va de 0,25 à 4,5cm.

- $\delta^{13}\text{C}$ (figure 12i) :

F. wuellerstorfi : Cette espèce possède une valeur de 0,33‰.

G. pacifica : Les mesures ont été effectuées sur la taille 150-250 μm . Les valeurs pour cette espèce varient de -2,1‰ à 0,25cm à -2,51‰ à 3,5cm. A 0,25cm -2,1‰, à 3,5cm -2,51‰ et -2,40‰, à 4,5cm -2,14‰ et -2,44‰.

- $\delta^{18}\text{O}$ (figure 12j) :

F. wuellerstorfi : Cette espèce possède une valeur de 2,65‰.

G. pacifica : Les valeurs pour cette espèce varient de 3,53‰ à 4,5cm à 3,72‰ à 3,5cm. A 0,25cm 3,66‰, à 3,5cm 3,67‰ et 3,72‰, à 4,5cm 3,53‰ et 3,68‰.

Les résultats isotopiques de MONO 9 sont identiques dans la gamme de la variabilité naturelle quelle que soit la taille analysée.

IV. Discussion

Les résultats obtenus en termes d'assemblages et de composition isotopique de l'eau de fond et interstitielle, ainsi que sur les foraminifères benthiques, sont discutés en fonction des principaux paramètres d'influence au niveau du site d'étude. Tout d'abord, je montrerai les liens que l'on peut établir entre les assemblages et la signature isotopique des eaux et des foraminifères. Puis, je m'intéresserai à différents paramètres environnementaux tels que l'impact de la dissolution et le rôle des apports détritiques et de matière organique sur les assemblages ainsi que sur la composition chimique des eaux et des foraminifères, en synthétisant l'ensemble des informations portées par ces différents outils pour discuter de chacun de ces paramètres.

IV.1. Relations entre signal isotopique de l'eau et des foraminifères

IV.1.1. Comparaison entre individus morts et vivants

Le but de ce travail était de mieux comprendre l'enregistrement isotopique par les foraminifères en comparant l'information portée par les spécimens vivants avec la signature des eaux de fond et interstitielle. Malheureusement, cette comparaison ne peut concerner que 6 individus de l'espèce *H. elegans* et 2 individus de *M. pompilioides* de la station MONO 7 à cause de la pauvreté des sédiments en individus vivants. Le $\Delta\delta^{13}\text{C}_{\text{mort-vivant}}$ est de -0,2‰ pour *M. pompilioides*. Pour *H. elegans* le $\Delta\delta^{13}\text{C}_{\text{mort-vivant}}$ varie entre -0,38‰ à 3,5cm et +0,52‰ à 2,5cm dans le sédiment. Ces différences entre individus morts et vivants peuvent être expliquées par différents processus tels que i) la variabilité

spatiale des concentrations en $\delta^{13}\text{C}$ dans l'eau interstitielle à profondeur à l'intérieur du sédiment égale (Tachikawa et al., 2002) ; ii) la bioturbation provoquée par la méiofaune et la macrofaune car la bioturbation rend la chimie de l'eau interstitielle homogène (Schmiedl et al., 2004).

Pour *H. elegans*, le $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{mort-vivant}}$ est de 0,05‰ à 3,5cm, et -0,09‰ à 2,5cm de profondeur dans le sédiment. Pour *M. pompilioides*, ... Ceci tend à montrer que le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau interstitielle est beaucoup moins variable en profondeur dans le sédiment par rapport au $\delta^{13}\text{C}$. Ceci est en accord avec les profils verticaux de $\delta^{18}\text{O}$ dans l'eau interstitielle dont les variations sont essentiellement associées au $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de fond (Figure 12).

Ces résultats tendent à montrer que le $\delta^{13}\text{C}$ enregistré par les foraminifères benthiques dépend fortement de la profondeur à laquelle le foraminifère a précipité son test à l'intérieur du sédiment. En fonction des espèces, cette profondeur peut être variable au cours de la vie du foraminifère ou au contraire, être très restreinte. Ce travail montre que le choix de l'espèce de foraminifère benthique pour rendre compte du $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau est donc crucial, notamment pour les applications paléocéanographiques. En revanche, ce travail montre que les tests de foraminifères benthiques présentent une variabilité moins importante pour le $\delta^{18}\text{O}$; cependant, la validité du $\delta^{18}\text{O}$ doit être discutée en comparant les valeurs obtenues avec celles de la calcite à l'équilibre (voire paragraphe IV.1.4.).

IV.1.2. Impact de la taille sur les résultats isotopiques

Les études précédentes montrent que l'effet de taille pour les foraminifères benthiques est moins important que pour les foraminifères planctoniques qui peuvent au cours de leur cycle de reproduction migrer verticalement dans la colonne d'eau (Schmiedl et al., 2004). Néanmoins un effet de taille chez les foraminifères benthiques a déjà été observé (Schumacher et al., 2010). Cet effet de taille est lié au métabolisme des foraminifères (respiration). Pour les individus juvéniles, la respiration est plus élevée alors que la respiration des spécimens adultes étant moins intense, la calcification est plus lente, et les valeurs isotopiques sont plus proches de l'équilibre avec la chimie de l'eau de leur milieu de vie. Il a été estimé que le $\delta^{13}\text{C}$ augmente avec la taille des tests de foraminifères benthiques avec un pas de 1‰ par 100µm (Schumacher et al., 2010). Néanmoins, tous les auteurs n'obtiennent pas les mêmes résultats, et certains travaux montrent que l'effet de taille est inexistant chez les foraminifères benthiques (Tachikawa et al., 2002; Schmiedl et al., 2004). Nos résultats montrent clairement que les signaux isotopiques de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ ne varient pas en fonction de la taille du test.

IV.1.3. Effet de microhabitat et $\delta^{13}\text{C}$

Les foraminifères enregistrent les caractéristiques de l'eau de leur milieu de vie lors de la calcification du test. *F. wuellerstorfi* est une espèce épibenthique qui enregistre la signature de l'eau de fond en $\delta^{13}\text{C}$ sans écart significatif (Shackleton, 1977, McCorkle et al., 1997, Tachikawa et Elderfield, 2002). Les résultats des analyses isotopiques dans les stations où la comparaison entre *F. wuellerstorfi* et *A. globulosus* est possible (figure 7 a, b, c, d, e, f, g, h) montrent qu'*A. globulosus*, qui fait aussi partie de l'épifaune, et montre lui aussi des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ proches *F. wuellerstorfi*.

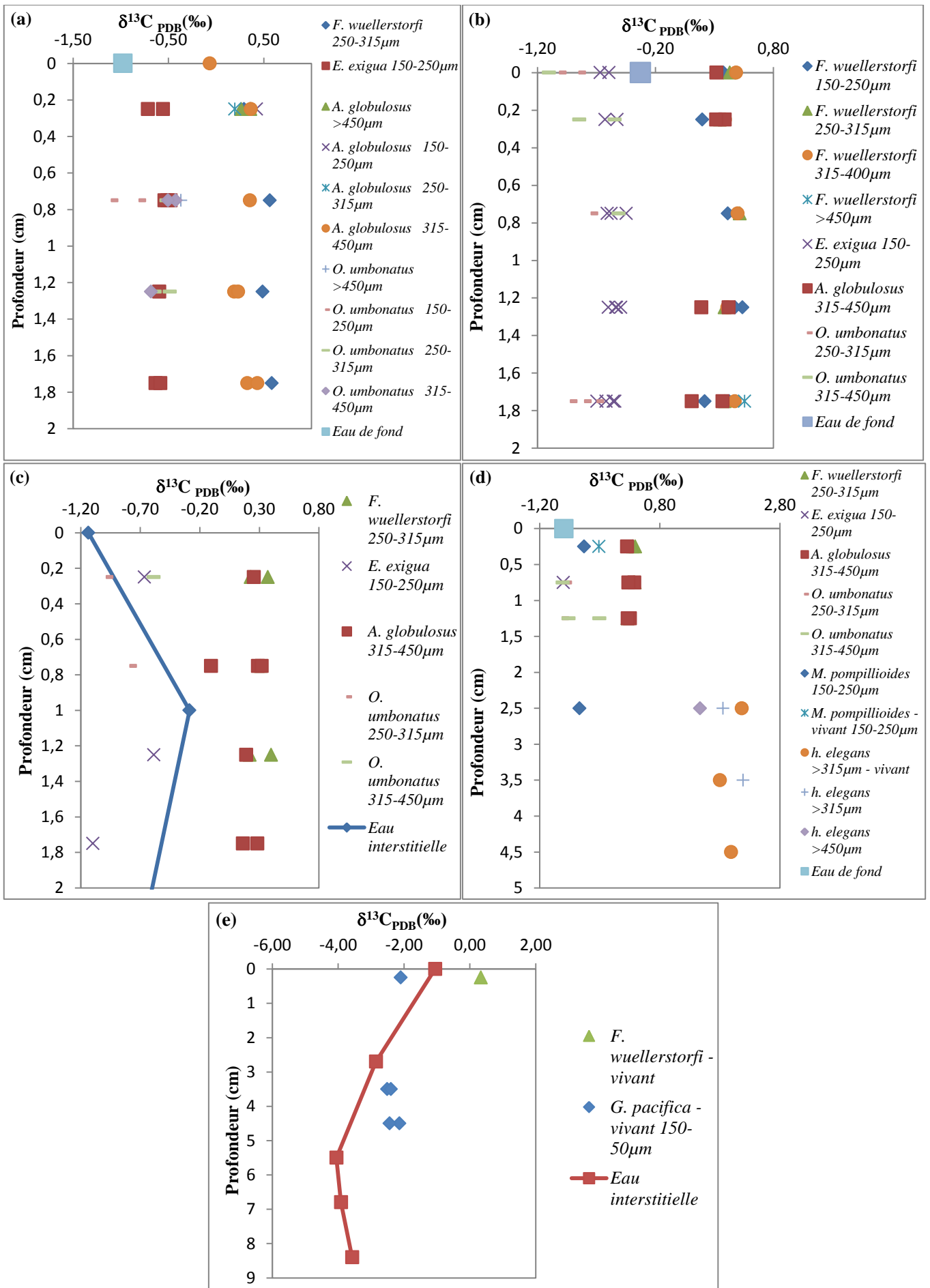


Figure 13 : Comparaison entre le $\delta^{13}\text{C}$ des tests de l'eau de fond dans MONO 2 (a), MONO 3 (b) et MONO 7 (d), et interstitielle dans MONO 4 (c) et MONO 9 (e).

Afin d'étudier l'effet de l'habitat sur les signatures isotopiques, il est nécessaire de comparer la signature en $\delta^{13}\text{C}$ entre les tests et l'eau.

- Comparaison du $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau de fond et des tests :

MONO 2 (Figure 13a) : à 0cm de profondeur dans les sédiments de MONO 2, l'écart en $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau de fond (-0,98‰) et du test d'*A. globulosus* est de 0,91‰. A 0,25 cm, nous observons que l'écart entre l'eau de fond et les valeurs d'*E. exigua* et *O. umbonatus* sont de 0,3‰, l'écart avec *A. globulosus* et *F. wuellerstorfi* est de 1,3‰.

MONO 3 (Figure 13b) : Dans cette station la valeur en $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau de fond (-0,33‰) se trouve entre les valeurs d'*E. exigua* et *O. umbonatus* (écart de 0,3‰ environ) et d'*A. globulosus* et *F. wuellerstorfi* (écart de 0,7‰ environ).

MONO 7 (Figure 13d) : L'écart entre la valeur de l'eau de fond dans cette station (-0,8‰) à 0,25cm est de 0,59‰ avec *M. pompilioides* (vivant), 0,34‰ avec *M. pompilioides* (mort), et 0,5‰ avec *A. globulosus* et *F. wuellerstorfi*.

Cette comparaison entre foraminifères et eau de fond montre une variabilité du $\delta^{13}\text{C}$ qui n'est pas la même d'une espèce à une autre. Nous remarquons que l'écart dépasse rarement les 1‰, et que dans notre étude c'est *E. exigua* et *A. globulosus* qui ont les valeurs toujours plus négatives que celles des espèces de l'épifaune : *A. globulosus* et *F. wuellerstorfi*. Plus profondément dans MONO 7, les valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ des individus vivants et morts d'*H. elegans* sont en moyenne supérieures à celles de *F. wuellerstorfi* d'1,5‰. Pourtant, les individus vivants d'*H. elegans* ont été trouvés à plus de 3cm de profondeur dans le sédiment, ce qui indiquerait qu'ils aient une préférence pour le milieu endobenthique, bien que cette espèce ait été décrite comme épibenthique dans Tachikawa et al., 2002 et Fontanier et al., 2005. Cet écart peut s'expliquer par la nature des tests d'*H. elegans*, en aragonite, car lors de la précipitation de ces tests aragonitiques, des fractionnements importants se produisent provoquant un enrichissement en ^{13}C (Tachikawa et al., 2002).

- Comparaison du $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau interstitielle et des tests :

MONO 4 (Figure 13c) : Le profil de $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau interstitielle de MONO 4 est très différent de celui de MONO 8 et 9 (Figure 11). Ceci est sûrement dû à un problème de prélèvement. En effet, la colonne sédimentaire s'était effondrée dans le tube lors de la manipulation de cette carotte à bords du Marion Dufresne. Ceci a mélangé et homogénéisé le profil isotopique de l'eau interstitielle. La comparaison de ces valeurs avec celles des tests est donc délicate.

MONO 9 (Figure 13e). A 0cm, j'ai utilisé la valeur de $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau de fond de MONO 8 car celle de MONO 9 (-6,39‰) est en-dehors des valeurs connues pour les masses d'eau de fond (qui varient de -1,14‰ dans MONO 4 à -0,33 dans MONO 3). On peut considérer que la valeur de $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau de fond de MONO 9 est proche de celle de MONO 8 car ces deux stations sont proches, elles sont à la même profondeur, et possèdent des profils de $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau interstitielle identiques. On remarque que l'écart entre le $\delta^{13}\text{C}$ de *F. wuellerstorfi* (vivant) et celui de l'eau de fond est de 0,28‰. Ceci montre que *F. wuellerstorfi* reproduit le signal isotopique de l'eau de fond en accord avec les travaux précédents (Shackleton, 1977, McCorkle et al., 1997, Tachikawa et Elderfield, 2002, Fontanier et al., 2008).

Les valeurs de *G. pacifica* (vivants) en $\delta^{13}\text{C}$ sont plus négatives que celle *F. wuellerstorfi* avec une différence de 2‰. Ceci s'explique par le gradient négatif de $\delta^{13}\text{C}$ dans l'eau interstitielle. Ces valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ de *G. pacifica* ne varient pas avec la profondeur dans le sédiment, ce qui montre que cette espèce calcifie à une profondeur précise dans le sédiment, en fonction de leur préférences écologiques, puis se distribuent verticalement dans le sédiment par géotaxie (McCorkle et al., 1997). Ce gradient de $\delta^{13}\text{C}$ est influencé par la décomposition de la matière organique à l'intérieur du sédiment, créant ainsi un gradient négatif de concentration en ^{13}C entre les sédiments superficiels et les sédiments profonds (Figure 11f, g et 13). La pente de ce gradient varie en fonction du taux de décomposition qui est lui-même tributaire de la quantité et de la qualité de la matière organique, ainsi que du taux d'oxygène dissous dans l'eau interstitielle (McCorkle et al., 1985).

La composition isotopique des tests de foraminifères endobenthiques est représentative de la signature isotopique de l'eau de fond et interstitielle, la signature en $\delta^{13}\text{C}$ des tests est donc principalement marquée par l'habitat du foraminifère. Il existe néanmoins des écarts qui peuvent être expliqués par :

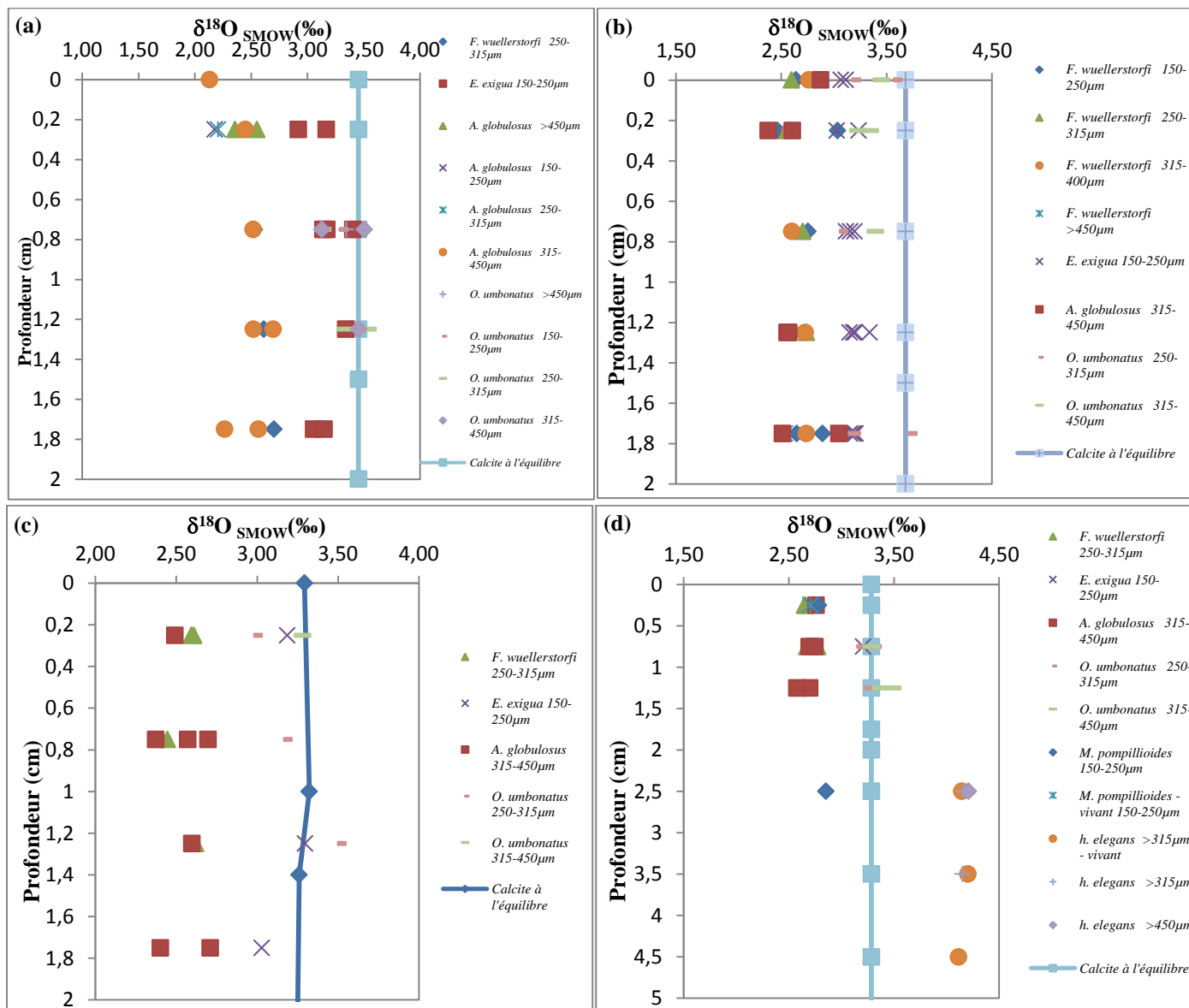
- L'effet vital : l'effet vital a une influence non négligeable sur le $\delta^{13}\text{C}$, Ainsi il a été démontré que l'effet vital sur les individus de *G. pacifica* n'est pas à exclure, et qu'il aurait pour conséquence de rendre le signal en ^{13}C des tests des individus de cette espèce encore plus négatif (Loubere et al., 2011).

- La dissolution du CaCO_3 dans le sédiment qui modifie le signal isotopique de l'eau.

- La préservation des tests, car la dissolution des tests calcitiques provoque des fractionnements qui vont modifier la signature isotopique des tests. Ce facteur ne peut concerner que les tests fossiles (MONO 2, 3, 4 et 7).

IV.1.4. Effet vital et $\delta^{18}\text{O}$

L'effet vital pour le $\delta^{18}\text{O}$ est l'écart entre la valeur isotopique du test et celle de la calcite à l'équilibre, cet écart est principalement causé par l'incorporation de CO_2 métabolique « léger » lors de la précipitation carbonatée (Wefer et al., 1991). La magnitude de cet effet vital est proportionnelle à la quantité de CO_2 métabolique incorporé dans le « pool » interne de CO_2 dans le protoplasme (Erez, 1978).



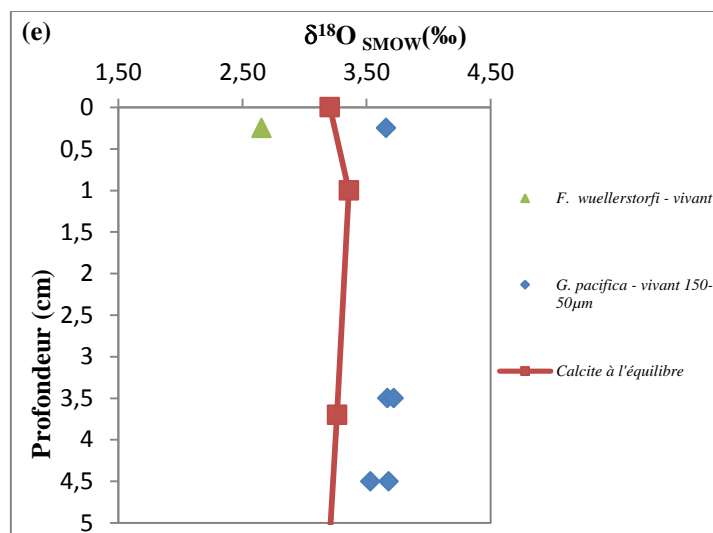


Figure 14 : Profils verticaux du $\delta^{18}\text{O}$ mesuré sur les tests (points libres), comparé avec le $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite à l'équilibre calculé à partir du $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de fond pour MONO 2, MONO 3 (b) et MONO 7 (d), et à partir de l'eau interstitielle pour les stations MONO 4 (c) et MONO 9 (e) (points liés).

Pour quantifier l'impact de l'effet vital sur l'enregistrement du signal isotopique de $\delta^{18}\text{O}$ lors de la calcification des tests des foraminifères benthiques, il est nécessaire de comparer le signal des tests avec le signal que montre la calcite à l'équilibre. Cette comparaison peut se traduire de la manière suivante: Effet vital = $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{test}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{calcite à l'équilibre}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{test}}$, où les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite à l'équilibre sont calculées à partir de l'équation (4) :

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{calc.éq.}} = \frac{2.78 \times 10^6}{T^2} - 33.0857 + (\delta^{18}\text{O}_{\Sigma\text{CO}_2} - 0.27) \quad (4)$$

Avec :

- T : température de l'eau (en kelvin). Les températures utilisées sont celles des eaux de fond mesurées à l'aide de la CTD (Annexe I). La température de l'eau de fond n'était pas disponible pour MONO 7, j'ai donc utilisé celle de la station la plus proche : MONO 4.

- $\delta^{18}\text{O}_{\Sigma\text{CO}_2}$: Correspond au $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau. Celui-ci a été mesuré sur les eaux de fond de toutes les stations, et sur les eaux interstitielles des stations MONO 4, 8 et 9 (Figure 11).

Tableau 4 : Valeurs moyennes de $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{tests}} \text{‰}$ des foraminifères de chaque station.

	$\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{tests}} \text{‰}$ MONO 2		
<i>F. wuellerstorfi</i>	<i>A. globulosus</i>	<i>E. exigua</i>	<i>O. umbonatus</i>
-0,877759974	-1,051322649	-0,286014738	-0,135760029

	$\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{tests}} \text{‰}$ MONO 3		
<i>F. wuellerstorfi</i>	<i>A. globulosus</i>	<i>E. exigua</i>	<i>O. umbonatus</i>
-1,010185951	-1,03161361	-0,513275216	-0,355979077

	$\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{tests}} \text{‰}$ MONO 4		
<i>F. wuellerstorfi</i>	<i>A. globulosus</i>	<i>E. exigua</i>	<i>O. umbonatus</i>
-0,728606242	-0,754038884	-0,132259489	-0,070864196

$\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{tests}}\text{‰}$			
MONO 7			
<i>F. wuellerstorfi</i>	<i>A. globulosus</i>	<i>E. exigua</i>	<i>O. umbonatus</i>
-0,6147028	-0,589890201	-0,076373754	0,018675201
<i>H. elegans</i>	<i>H. elegans vivant</i>	<i>M. pompilioides</i>	<i>M. pompilioides vivant</i>
0,887668482	0,868798336	-0,466509198	-0,581693072

$\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{tests}}\text{‰}$	
MONO 9	
<i>F. wuellerstorfi</i>	<i>G. pacifica</i>
-0,663654725	0,334029341

Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$, ainsi que la température varient très peu en profondeur dans le sédiment, c'est pourquoi j'ai utilisé les valeurs de $\delta^{18}\text{O}_{\text{cal.éq.}}$ de l'eau de fond pour effectuer les profils verticaux dans les stations où l'eau interstitielle n'a pas été échantillonnée (MONO 2, 3 et 7). Pour MONO 4 et 9 j'ai utilisé les températures de l'eau de fond pour calculer la calcite à l'équilibre de l'eau interstitielle. Les profils verticaux du $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite à l'équilibre sont comparés au $\delta^{18}\text{O}$ des tests (Figure 14 et Tableau 4).

Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de fond sont globalement homogènes (Si on excepte MONO 3 avec 0,17‰, elles varient de -0,26‰ au niveau de MONO 9 à -0,11‰ dans MONO 2) ce qui signifie que les eaux de fond de ces stations appartiennent à la même masse d'eau, excepté au niveau de MONO 3.

Les stations MONO 4 et 9 (Figure 14c, e) et MONO 8 (Figure 11) sont les seules dont l'eau interstitielle a été prélevée et analysée. Dans MONO 4 l'eau a été homogénéisée à cause des perturbations liées à la manipulation de la carotte, mais ceci n'a pas d'incidence sur le $\delta^{18}\text{O}$ qui est homogène dans le sédiment, entre l'eau de fond et l'eau interstitielle. Dans MONO 8 la valeur de l'eau de fond (-0,15‰) est en accord avec les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau interstitielle qui varient de -0,34‰ à 0‰. Pour MONO 9, la valeur de l'eau de fond (-0,26‰) est aussi incluse dans la variabilité des valeurs de l'eau interstitielle (de -0,49‰ à -0,13‰) en exceptant l'échantillon d'eau interstitielle à 1,4cm de profondeur dans le sédiment dont la valeur en $\delta^{18}\text{O}$ est de 0,3‰. Cette valeur adhérente est due à un fractionnement avec l'air après le prélèvement, car cet échantillon n'a pas été conditionné de la même manière que les autres échantillons (l'eau a été mise dans un vial trop grand, avec beaucoup d'air au-dessus de cette eau). J'ai donc exclu cette valeur de mes calculs.

Les $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{test}}$ varient d'une espèce à une autre, car l'effet vital varie beaucoup en fonction de l'espèce. En moyenne, pour les individus de toutes les stations, c'est l'espèce *O. umbonatus* qui est la plus proche de la calcite à l'équilibre avec un $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{test}} = -0,07\text{‰}$. Les espèces ayant l'effet vital le plus important sont *H. elegans* et *A. globulosus* avec respectivement $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{test}} = 0,88\text{‰}$ et $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{test}} = 0,85\text{‰}$.

Il est intéressant de noter que *F. wuellerstorfi* et *A. globulosus* montrent un effet vital important avec -0,77‰ en moyenne pour *F. wuellerstorfi* et -1,05‰ en moyenne pour *A. globulosus*. La valeur de $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{test}}$ *F. wuellerstorfi* est proche de celle obtenue dans une étude similaire (-0,84‰, Fontanier et al., 2008).

Il en est de même pour *E. exigua* et *O. umbonatus*, qui montrent eux aussi un effet vital similaire entre eux, mais très faible, avec -0,2‰ en moyenne pour le premier, et -0,13‰ pour le second. Il a été proposé que les foraminifères épibenthiques ont un effet vital plus accentué que les foraminifères endobenthiques (Schmiedl et al., 2004). Cette différence indiquerait que *E. exigua* et *O. umbonatus* vivent plus profondément dans le sédiment qu'*A. Globulosus* et *F. wuellerstorfi*, en accord avec les données des assemblages et la littérature (Smart et al., 2008). La comparaison entre *O. umbonatus* et *E. exigua*, indiquerait qu'*O. umbonatus* est plus endobenthique qu'*E. exigua*. Cela concorde parfaitement avec ce qui a été observé et discuté sur les courbes de courbes de $\delta^{13}\text{C}$.

Enfin, le $\Delta\delta^{18}\text{O}$ de *G. pacifica* montre un $\Delta\delta^{18}\text{O}_{\text{test}} = 0,33\text{‰}$, en accord avec des études précédentes (McCorkle et al., 1990, Fontanier et al., 2008).

Ainsi, l'écart provoqué par l'effet vital est assez constant au sein des individus d'une même espèce. Il peut aussi être différent d'une espèce à une autre. Ces caractéristiques font que cet écart peut être contraint pour chaque espèce, afin d'être pris en compte lors des études de paléo-propriétés des eaux.

IV.2. Impact de la dissolution

La dissolution des tests carbonatés des foraminifères dépend de la saturation en ions carbonates de l'eau. Cette concentration en ions carbonates diminue avec la pression, donc avec la profondeur. Ceci explique les états de préservation plus faible dans les stations les plus profondes. En parallèle, le CO_2 relâché lors de l'oxydation de la matière organique dans le sédiment affecte lui aussi la concentration en ions carbonates dans l'eau de fond et l'eau interstitielle. Cette dissolution, qui est supra-lysoclinale (la lysocline se situe à 3700–3900m et la CCD à 4500-4800m, Kessarkar et al., 2005) dans le cas de ces stations, dépend du rapport $\text{CaCO}_3/\text{C}_{\text{org}}$. (Emerson and Bender, 1980).

IV.2.1. Evidences faunistiques

Pour observer l'effet de la dissolution sur les assemblages il est nécessaire d'étudier les variations d'abondances et d'abondances relatives entre les différents types de tests en fonction de la profondeur des stations, car les tests de foraminifères, selon leurs natures, ne réagissent pas de la même façon face à la dissolution. Auparavant, je discute brièvement de la validité de l'approche employée.

- Validité de l'approche : Perturbations liées au carottage et à l'échantillonnage

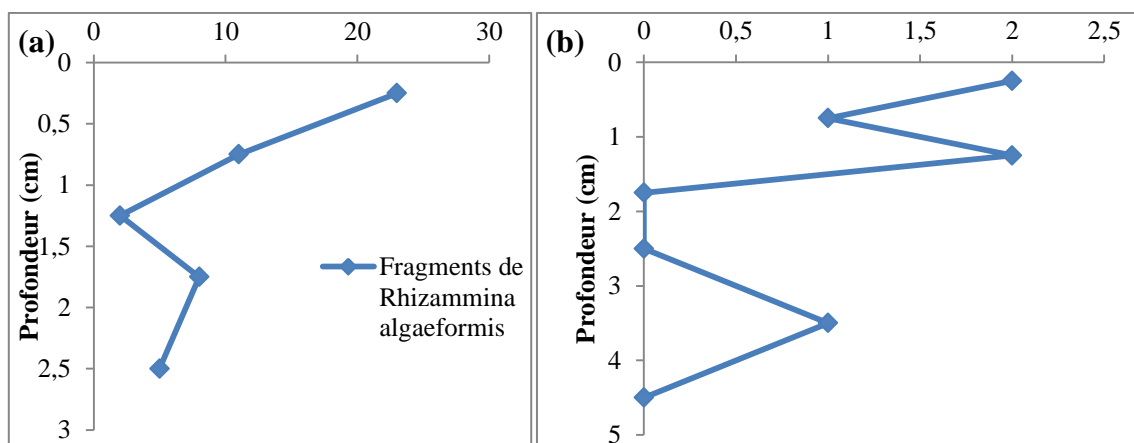


Figure 17 : Profils verticaux de fragments d'individus vivants de *Rhizammina algaeformis* dans (a) MONO 2 et (b) MONO 7.

Des perturbations associées au carottage ou à l'échantillonnage peuvent être décelées grâce aux fragments d'individus vivants de *R. algaeformis*. Cette espèce agglutinée est arborescente suspensivore, elle est donc strictement épibenthique. Pourtant des fragments d'individus vivants étaient parfois présents en profondeur dans le sédiment (Figure 17, a et b). La présence de ces fragments d'individus vivants à ces profondeurs dans le sédiment ne peut être associée à leur mode de vie, aussi il est possible que ces fragments tubulaires se soient enfoncés dans le sédiment très meuble lors du carottage, ou lors du découpage des tranches de carotte de chaque échantillon de sédiment. Néanmoins, la présence d'une zonation des espèces de foraminifères en fonction de la profondeur dans le sédiment confirme qu'ils étaient vivants au moment du prélèvement des échantillons (Jorissen et al., 1995) et que la perturbation liée au carottage est négligeable. Aussi, les profils de répartition des espèces en fonction de la profondeur peuvent être interprétés en toute fiabilité en termes de préférence écologique.

-Abondances relatives entre les différents types de tests

Les foraminifères produisent des tests de différentes natures : hyalins (le test est perforé, translucide. Ex : *F. wuellerstorfi*), porcelané (le test est lisse, imperforé, opaque. Ex : *P. murrhina*) et agglutiné (le test est composé de grains détritiques, ou de tests d'autres foraminifères, prélevés sur leur lieu de vie et cimentés par de la calcite. Ex : *R. algeaformis*). Il existe aussi des foraminifères à tests chitineux. Ces derniers ont peut-être été détruits lors du premier passage à l'étuve du sédiment (voir matériel et méthode).

Les rapports entre différents types de tests donnent des indications sur les conditions physico-chimiques de leur habitat. Les tableaux 2 et 3 montrent que les assemblages en foraminifères vivants sont dominés par des espèces agglutinées, alors que les assemblages fossiles sont dominés par des foraminifères carbonatés. Il y a donc une perte d'information, car les spécimens agglutinés se conservent mal, certaines espèces comme les espèces du genre *Reophax spp.* ne fossilisent pas (Murray et al., 2011). On observe à partir de la figure 8 une augmentation du pourcentage en test carbonatés morts avec l'augmentation de la profondeur des stations qui est synonyme de diminution du pourcentage en foraminifères agglutinés. Or l'abondance en foraminifères agglutinés fossiles dépend de la préservation (Murray, 2006). Les eaux sont certes en moins en moins saturées en ions carbonates avec la profondeur, mais cette baisse en foraminifères agglutinés est surtout liée la fragilité de leurs tests, qui se désagrègent rapidement post-mortem. Le potentiel de fossilisation des espèces agglutinées est faible, excepté pour certaines espèces qui incorporent du CaCO₃ dans la matrice organique liant les grains et qui deviennent « fossilisables ».

Les foraminifères à tests porcelanés sont aussi très sensibles à la dissolution (Griveaud, 2007). La figure 8 montre que les pourcentages en foraminifères porcelanés diminuent avec la profondeur, ils suivent la même tendance que les foraminifères agglutinés. Ainsi, les foraminifères porcelanés dans nos échantillons indiquent que la dissolution devient de plus en plus importante dans nos échantillons.

De plus, j'ai aussi remarqué que les individus morts des genres *Uvigerina spp.* et *Bulimina spp.* étaient les plus affectés par la dissolution, et ce même dans les stations les moins profondes. Ceci est dû au fait que ces genres font partie de l'endofaune, et la dissolution au sein du sédiment est accentuée par le CO₂ relâché dans l'eau interstitielle lors de la décomposition de la matière organique ensevelie.

- Assemblages des foraminifères vivants

Dans notre étude, des profils verticaux des foraminifères vivants en fonction de la profondeur dans le sédiment sont présentés dans les figures 7, a-d. A partir de ces figures, trois microfaunes ont été reconnues : l'épifaune qui correspond au premier centimètre, l'endofaune peu profonde aux 3 centimètres suivants et l'endofaune profonde en dessous du 4^{ème} centimètre. Ces profils permettent aussi de déterminer quelles espèces dominent les assemblages de chaque station.

Au niveau de la station MONO 2 (Figure 7a), ce sont *R. dentaliniformis* et *L. difflugiformis* qui dominent, la profondeur des pics d'abondance de ces espèces indique qu'elles font partie de l'endofaune peu profonde. Pour MONO 3 (Figure 7b) ce sont aussi des foraminifères à tests agglutinés qui dominent : *R. dentaliniformis*, *C. subglobosum* et *Reophax. sp.* Les pics d'abondance se concentrent dans le premier centimètre du sédiment. Au niveau de MONO 4 (Figure 10c) ce sont *Hormosina sp.* et *H. globulifera*, et *R. contortus* qui dominent. Au niveau de MONO 7 (Figure 7d) ce sont les espèces *A. foliacea* et *R. dentaliniformis* qui dominent. Pour MONO 8 (Figure 7e) c'est l'espèce *Miliolina cf. reussi*. Enfin, au niveau de MONO 9 (Figure 7f) Ce sont les espèces *G. pacifica* *L. difflugiformis* qui domine l'assemblage.

Tous les assemblages en foraminifères vivants sont dominés par des foraminifères agglutinés, excepté dans les stations MONO 8 et 9. Il a été proposé que les foraminifères à tests agglutinés abondent dans des eaux sous-saturées en ions carbonates (Murray et al., 2011). C'est très probablement le cas dans les stations de cette étude, et ceci rejoindrait les observations et la discussion à propos de la mauvaise préservation de certains foraminifères après leur mort.

IV.2.1.2. Les indices de diversité et d'homogénéité et leur signification

Deux indices ont été calculés sur les données d'assemblages de ces stations en utilisant le logiciel PAST.

- L'indice 1-D de Simpson (Simpson, 1949), avec D :

$$1 - D, \text{ avec } D = \sum_i \left(\frac{n_i}{n}\right)^2 \quad (3)$$

Avec n_i le nombre d'individus du taxon i , et D : dominance.

Simpson 1-D est un indice d'homogénéité, il varie de 0 à 1. Quand $1-D = 1$ cela signifie que tous les taxons ont un nombre identique de représentants, la communauté est donc homogène. Quand cet indice est égal à 0 cela signifie qu'un taxon domine l'assemblage.

- Le deuxième indice calculé est l'indice H de Shannon (Shannon, 1948). Cet indice de diversité prend en compte le nombre d'individus et le nombre de taxons (équation 2) :

$$H = - \sum_i \frac{n_i}{n} \ln \frac{n_i}{n} \quad (2)$$

Avec n_i le nombre d'individus du taxon i .

$H=0$: communauté avec un seul taxon. Une valeur élevée de H indique une communauté avec un grand nombre de taxon mais avec peu d'individus pour chaque taxon.

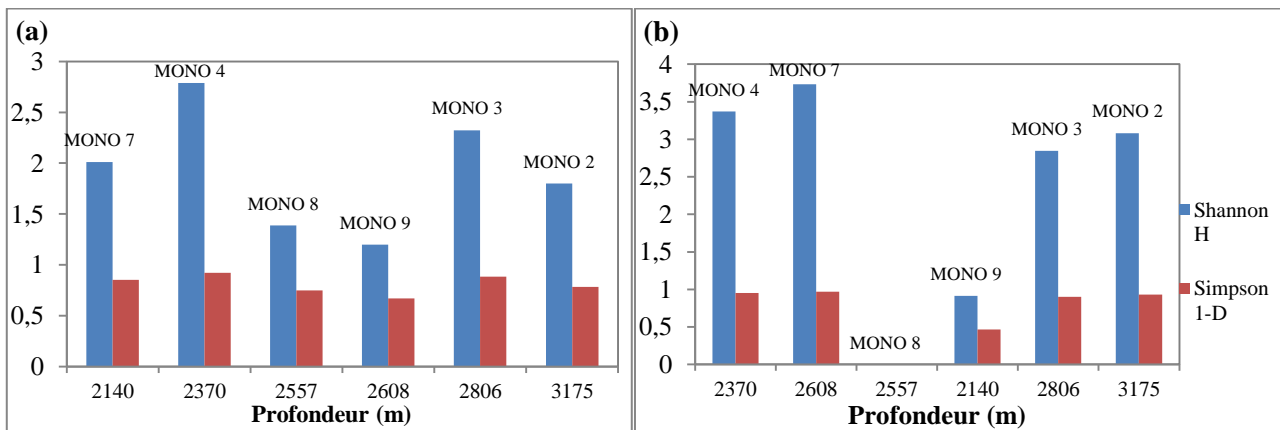


Figure 15 : Indices de diversité (a) des assemblages vivants et (b) des assemblages morts dans les différentes stations.

- Les indices des assemblages vivants

L'indice de Simpson 1-Diversité :

Les valeurs de 1-D varient entre 0,6 pour MONO 9 et 0,92 pour MONO 4 sans qu'il n'y ait de véritable tendance en fonction de la profondeur. Contrairement à ce qui a été observé chez les foraminifères morts, la diversité dans les stations MONO 8 et 9 est comparable à celle des autres stations bien que légèrement plus faible.

L'indice de Shannon H :

Les valeurs de l'indice H varient de 1,19 dans MONO 9 à 2,78 dans MONO 4. La distribution des valeurs présentes la même configuration chez les vivants et chez les morts, toutefois les valeurs sont plus faibles chez les vivants, ce qui signifie que ces populations sont moins homogènes.

- Les indices des assemblages morts

Ces indices ont été calculés pour le premier centimètre de toutes les stations.

L'indice de Simpson 1-Diversité :

Mis à part les résultats de MONO 8 et 9, on observe que les valeurs de cet indice sont très similaires et varient de 0,90 (MONO 3) à 0,96 (MONO 4) sans tendance en fonction de la profondeur des stations et indiquant que les assemblages en foraminifères morts pour ces stations sont très homogènes. Ceci s'explique par le fait que les assemblages morts

sont constitués d'un mélange de plusieurs générations successives de foraminifères, qui ont sans doute été mélangés par la bioturbation de la macrofaune et de la méiofaune benthique au cours du temps. Dans le cas de MONO 8, l'absence de foraminifères benthiques morts dans le premier centimètre ne permet pas de calculer d'indices. Au niveau de MONO 9 la valeur obtenue est de 0.46, cette valeur faible indique que la population est moins homogène comparée aux populations des autres stations.

L'indice de Shannon H :

Il y a une corrélation positive entre l'indice H et l'indice 1-D, car plus une espèce domine, moins la population est homogène. Ceci signifie que les populations les plus homogènes telles qu'au niveau de MONO 4 ($H = 3,7$) sont celles où le nombre de taxons est le plus élevé et avec relativement peu d'individus au sein d'un taxon. Inversement dans le cas de MONO 9 l'indice H est le plus faible ($H = 0,91$) donc cette station possède la population la moins homogène. On observe une tendance avec la profondeur d'eau car les stations les plus profondes sont moins homogènes que les stations les moins profondes.

IV.2.2. Influence sur le signal isotopique

L'influence de la dissolution sur le signal isotopique peut être observée en étudiant le cas d'*E. exigua*. Les individus d'*E. exigua* sont tous inclus dans la gamme 150-250 μm . Mais cela ne suffit pas à expliquer l'homogénéité relative des valeurs isotopiques en $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$. Plusieurs explications sont possibles :

Premièrement, le nombre d'individus analysés n'est pas le même pour toutes les espèces. *E. exigua* possède le plus d'individus sur lesquels des mesures ont été effectuées, notamment dans MONO 2 et 3 où cette espèce domine l'assemblage des foraminifères morts (Figure 9). Ceci pourrait expliquer pourquoi cette homogénéité est plus forte dans MONO 2 et 3 que dans MONO 4.

En plus du nombre d'individus, la préservation a probablement joué un rôle dans cette homogénéité. Les tests des individus d'*E. exigua* étaient en excellent état. Pourtant cette espèce est connue pour la fragilité de son test, qui est très léger, fin, translucide et de petite taille (<250 μm). A cause de ces caractéristiques les individus de cette espèce sont très sensibles à la dissolution (Smart et al., 2008). Or nous avons observé à partir des assemblages que les stations MONO 2 et 3, où *E. exigua* est dominante, sont très peu favorables aux foraminifères sensibles à la dissolution tels que les foraminifères à tests porcelanés. La deuxième espèce dominante dans ces stations les plus profondes est *O. umbonatus*, dont les individus présentaient des tests beaucoup moins bien préservés que les tests d'*E. exigua*. Pourtant les tests d'*O. umbonatus* sont plus massifs et plus lourds, donc potentiellement plus résistants à la dissolution. Ce paradoxe pourrait s'expliquer par le fait que les individus d'*E. exigua* sont composés de générations très récentes, les anciennes n'ayant pas fossilisé. En revanche les représentants de l'espèce *O. umbonatus* sont composés d'un mélange d'individus de différentes générations récentes et anciennes. Ce mélange de générations, et la dissolution qu'auraient pu subir les individus anciens d'*O. umbonatus* pourrait peut-être expliquer la répartition plus homogène des valeurs d'*E. exigua* dans MONO 2 et 3. Par extension ce phénomène de mélange de différentes générations pourrait aussi expliquer l'absence d'effet de taille chez *O. umbonatus* ainsi que chez *A. globulosus* et *F. wuellerstorfi*.

Pour s'affranchir des biais liés à la dissolution et au mélange de générations successives, il faut observer l'effet de taille sur des individus vivants. Malheureusement, le nombre limité d'individus vivants dans nos échantillons n'ont pas permis d'avoir le matériel nécessaire pour ce genre de comparaison.

Les tests d'*E. exigua* sont les plus homogènes en termes de taille et de valeurs isotopiques, mais on ne peut pas expliquer cette faible dispersion des valeurs par un effet de taille ou de préservation uniquement, car cette homogénéité n'est présente que dans les stations où il y avait le plus d'individus disponibles pour être analysés.

Enfin la comparaison entre l'état des tests d'*E. exigua* et d'*O. umbonatus* indiquerait que les populations d'*E. exigua* sont plus récentes, elles ont donc connu des conditions chimiques moins variées et ont subi moins de dissolution.

Il est toutefois important d'effectuer des mesures sur des assemblages morts afin de récolter une information à long terme, mais aussi d'avoir une idée sur l'altération taphonomique (Murray, 2006).

IV.3. Rôles des apports de sédiment et des flux de matière organique

IV.3.1. Apports détritiques

Nous avons observé qu'il n'y a pas de tendance en fonction de la profondeur pour les foraminifères morts, ceci est probablement lié aux taux de sédimentation qui sont différents d'une station à une autre et d'une période de l'année à une autre. La sédimentation est plus élevée dans les stations proches du canyon sous-marin, telles que MONO 8 et MONO 9 ce qui a pour effet de diluer les assemblages fossiles (par exemple moins de 1f/g dans MONO 8). On peut avoir une idée de ces taux de sédimentation en comparant les fractions inférieure à 63µm de chaque station (Annexe IV). Le pourcentage moyen de chaque station est de 61%, 67%, 93%, 98%, 99.9% et 99.9% pour MONO 2, 3, 4, 7, 8 et 9, respectivement. Cette fraction détritique est plus importante dans les stations proches du chenal sous-marin (à l'Est, MONO 8 et 9) ou proches du delta (au Nord MONO 7). Les stations les plus distales sont MONO 2 et 3, elles possèdent la fraction détritique la moins importante. On peut conclure que ces stations ont un contenu en foraminifères morts/gramme le moins dilué, de ce fait l'abondance dans ces stations est surestimée par rapport à MONO 4, 7, 8 et 9. Si le taux de sédimentation était le même dans toutes les stations, il aurait été probable de voir une tendance plus claire dans les abondances des morts en fonction de la profondeur, dont les variations seraient tributaires à la fois des modifications des paramètres environnementaux et de la dissolution.

Au niveau du site de MONO 8, le nombre d'individus de *M. cf. reussi* diminue rapidement avec la profondeur, avec un pic d'abondance dans le premier centimètre. Cette station possède des caractéristiques particulières, de 0 à 4 cm aucun individu mort n'est présent, il n'y quasiment aucun foraminifère planctonique qui a sédimenté, et l'assemblage en foraminifères vivants n'est constitué que d'individus de l'espèce *M. cf. reussi*. On trouve des individus morts au-delà de 4 cm uniquement. De plus la fraction inférieure à 63µm de l'échantillon représente plus de 99,9% du poids total des échantillons. Ces indices indiqueraient qu'un événement sédimentaire brutal s'est produit au niveau de cette station, comme par exemple le dépôt d'une turbidite. Cet événement sédimentaire ne peut être que récent, car il ne contient que des foraminifères vivants. Le fait qu'il n'y ait que des foraminifères vivants d'une seule espèce avec un profil vertical d'abondance qui décroît avec la profondeur signifie qu'ils étaient vivants lors du prélèvement des carottes. Ceci implique que i) cette turbidite est récente (moins de quelques mois), et ii) *M. cf. reussi* est probablement une espèce pionnière car c'est la première à avoir recoloniser ce milieu perturbé.

D'un point de vue de la dynamique du milieu, les foraminifères agglutinés arborescents suspensivores sont de bons indicateurs d'intensité des courants car des travaux précédents montrent que leur abondance augmente avec la dynamique de la circulation (Jorissen, 1995, Muray, 2006). Les différences d'abondances de fragments d'arborescents morts entre les stations profondes et peu profondes ne peuvent être interprétés à cause des biais induits par la dissolution et la dilution par les apports sédimentaires qui sont différents dans chaque station (Figure 16). Aussi, je ne discuterai que des variations d'abondances des spécimens vivants. Les fragments d'arborescents vivants sont plus abondants au niveau de MONO 2 avec 5 fragments/gramme de sédiment ce qui indiquerait que les courants de fond cette station sont les plus importants. Pour les sites MONO 8 et 9, les abondances sont proches de 0 fragment/gramme, et ceci indiquerait que ces foraminifères ne supportent pas les perturbations sédimentaires violentes qui se produisent à proximité du canyon sous-marin.

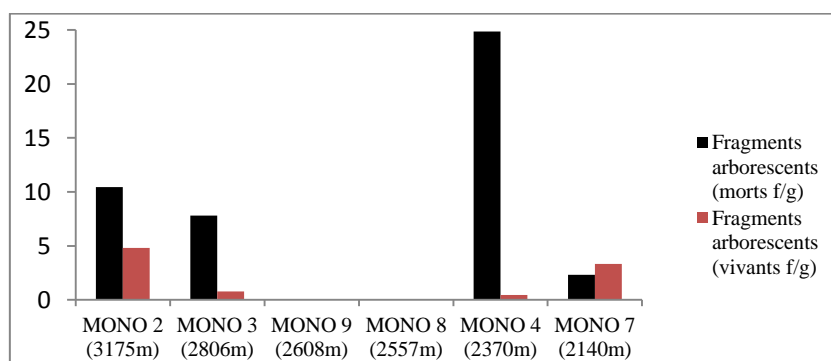


Figure 16 : Abondances en fragments de foraminifères arborescents morts et vivants de chaque station.

En conclusion, les abondances en foraminifères morts dans les stations proximales ou proches du chenal sous-marin sont diluées, en revanche dans les stations MONO 2 et 3, les abondances en foraminifères morts sont surestimées par rapport aux autres stations. De plus, les assemblages en foraminifères morts dans MONO 2 et 3 sont probablement composés d'individus plus anciens que ceux des autres stations.

IV.3.2. Flux de matière organique

Les mesures en C_{org} ont été effectuées au CEREGE par Laetitia Licari sur deux échantillons de toutes les stations (Figure 18).

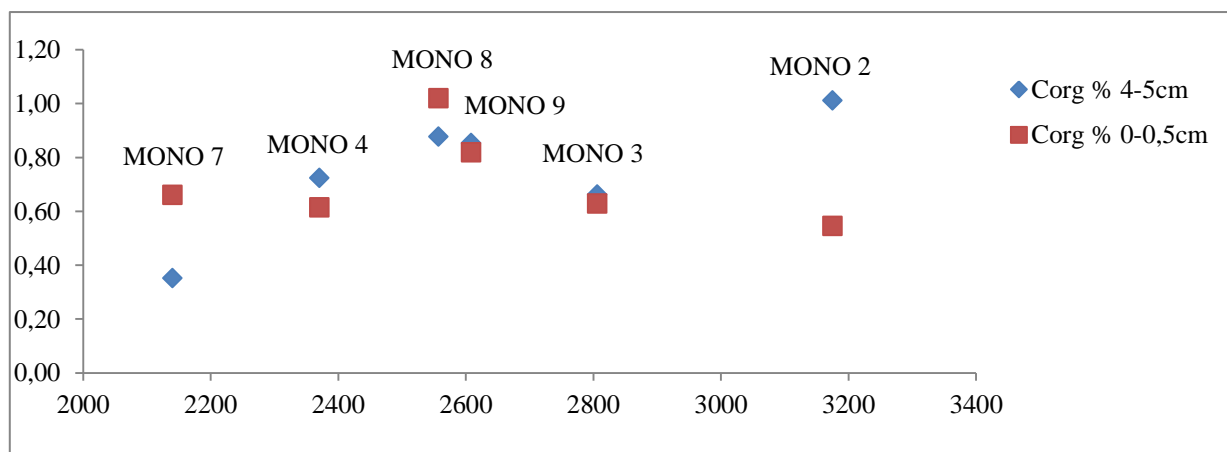


Figure 18 : Pourcentage de C_{org} de chaque station dans le premier demi-centimètre et à 4,5cm.

Le taux de C_{org} du premier centimètre dans le sédiment varie en fonction de la profondeur des stations, le taux le plus bas est mesuré dans MONO 2 avec 0,55%, puis il augmente avec la diminution de la profondeur jusqu'à atteindre un maximum dans MONO 8 à 1%. Au niveau de MONO 4 et 7, le taux de matière organique est de 0,61 et 0,67%. Cette tendance est liée à la conservation de la matière organique dans la colonne d'eau ce qui explique que plus de matière organique arrive aux stations les moins profondes, où le flux organique y est plus fort (Tachikawa et al., 2002).

A 4,5cm de profondeur, la variation du taux de C_{org} varie en fonction de la profondeur, mais contrairement au sédiment superficiel, le taux de C_{org} augmente avec la profondeur océanique. Les profils CTD montrent qu'entre MONO 7 et 2 (entre 2000 et 3000m de profondeur) le taux d'oxygène dissous varie peu (Annexe I). L'explication possible de ces faibles taux de C_{org} dans les stations les moins profondes (MONO 4 et 7), à 4,5cm de profondeur dans le sédiment, pourrait être due à une consommation de cette matière organique par une méiofaune plus abondante, car ces stations présentent les taux de foraminifères vivants les plus importants.

De plus, en comparant les abondances en foraminifères arborescents vivants (Figure 16) avec le C_{org} du premier demi-centimètre de chaque station, on remarque que ces abondances sont les plus faibles dans les stations les plus eutrophiques, excepté dans MONO 7. En effet, ces foraminifères arborescents suspensivores, abondent dans des zones où les conditions trophiques sont peu favorables (Jones et Charnock 1985).

IV.3.2.1. Mise en évidence du rôle de la matière organique

- Assemblages des foraminifères vivants

Les assemblages en foraminifères vivants représentent un instantané des conditions environnementales au niveau de chaque station. La distribution verticale des foraminifères dans le sédiment dépend des nutriments et de l'oxygène disponibles dans le milieu (Jorissen et al., 1995, Murray, 1996, Fontanier et al., 2002) comme proposé dans le modèle TROX, ainsi que la qualité de la matière organique (Figure 1).

Comme indiqué dans les tableaux 1, 2 et 3, le nombre de foraminifère vivants est jusqu'à 10 fois inférieur à celui des foraminifères morts. Ceci peut s'expliquer par i) un possible problème d'échantillonnage. En effet les quantités de

sédiment par échantillon sont faibles, et la fraction <63µm représente entre 45 et 99,9% du poids des échantillons (Annexe IV). ii) d'une possible perte des espèces de foraminifères à tests fragiles lors du séchage à l'étuve du sédiment (Smart et Gooday, 1997). Mais aussi iii) les conditions globalement oligotrophes à cette saison (Mai-Juin), entre le bloom d'hiver et celui d'été. L'apport important en sédiment peut aussi constituer un élément perturbateur, notamment pour les espèces épibenthiques (Murray, 2006). Les conditions optimales pour le développement d'une faune benthique sont réunies dans les sédiments de la station MONO 4 où l'abondance en foraminifères vivants est la plus importante (Figure 5).

En fonction de ces facteurs et des besoins écologiques que peuvent avoir les différentes espèces de foraminifères, des microfaunes ont été définies (Gooday, 1986).

- Assemblages des foraminifères morts

Les assemblages en foraminifères morts en fonction de la profondeur dans le sédiment de la station MONO 3 donnent un aperçu de l'évolution des conditions écologiques dans le temps. Ces assemblages sont dominés par des espèces surtout épibenthiques (dont *F. wuellerstorfi*), avec très peu d'endofaune. De plus l'espèce dominante dans tout le profil vertical de MONO 3 est *E. exigua*. Ces caractéristiques confirment que les conditions sont oligotrophes, marquée par une saisonnalité des apports en matière organique d'origine marine (phytoplancton). Ceci indique que ce signal de saisonnalité peut être préservé dans les assemblages, et les variations de cette saisonnalité au cours du temps peuvent être étudiées.

IV.3.2.2. Corg associé aux apports détritiques

Pour le premier centimètre dans le sédiment, les taux de Corg les plus importants sont trouvés au niveau de MONO 8 et MONO 9. Ceci est cohérent avec le fait que la matière organique dans la baie du Bengale est essentiellement d'origine détritique et se dépose lors d'évènements turbiditiques (Galy, 2007), en accord avec d'autres études de canyons sous-marins (Schmiedl et al., 2004). Ces résultats sont aussi cohérents avec les observations faunistiques effectuées sur MONO 9 car le genre *Globobulimina* (et la présence de foraminifères endobenthiques en général) est souvent associé aux conditions eutrophiques (Fontanier et al., 2003, Fontanier et al., 2008). Par ailleurs, les taux en matière organique sont souvent élevés dans les turbidites, (Rathburn et al., 1996), comme observé pour la station MONO 8 ($C_{org} = 1\%$). On remarque aussi que le pourcentage en C_{org} en dessous de cette turbidite, à 4,5cm est légèrement plus faible ($C_{org} = 0,8\%$).

Au sein de MONO 9, c'est *G. pacifica* qui domine l'assemblage des vivants. Les pics d'abondances de *G. pacifica* se trouvent à 5 et 7 centimètres dans le sédiment, ce qui confirme que cette espèce est endobenthique profonde. De plus, MONO 9 est la seule station qui contient les 3 différentes microfaunes, avec dans l'épifaune *M. cf. reussi* ainsi que l'unique individu vivant de l'espèce *F. wuellerstorfi* de toutes les stations. Au-delà de 4cm de profondeur dans le sédiment on trouve des individus de l'espèce *L. difflugiformis* qui sont endobenthiques peu profonds. Enfin, *G. pacifica* présente un pic d'abondance à 5 cm de profondeur. Des travaux précédents ont montré que les individus du genre *Globobulimina spp.* ont été trouvés à des concentrations en oxygène dissous en-dessous de la limite de détection (McCorkle et al., 1996, Fontanier et al., 2002, Geslin et al., 2004, Fontanier et al., 2008), ce qui signifie que dans MONO 9 la concentration en oxygène pourrait être nulle dès 0-3cm de profondeur. Ceci serait dû à des apports importants en matière organique, qui en s'oxydant aurait consommé l'oxygène de l'eau interstitielle.

MONO 9 est une station où les apports en sédiments terrigènes sont très importants, la fraction inférieure à 63µm constitue plus de 99% du poids total des échantillons. Les apports terrigènes sont importants dans MONO9 car cette station se trouve très proche du chenal de sédimentation.

IV.3.2.3. Corg lié à la productivité primaire

Les mesures isotopiques sur les tests de foraminifères sont présentées dans la figure 12. On distingue deux ensembles composés des valeurs de *A. globulosus* et *F. wuellerstorfi* avec des valeurs proches et positives, et *E. exigua* et *O. umbonatus* avec des valeurs proches et négatives. Les valeurs proches entre *A. globulosus* et *F. wuellerstorfi* indiquent qu'*A. globulosus* enregistre le $\delta^{13}C$ de la même manière que *F. wuellerstorfi*. *E. exigua* et *O. umbonatus* ont

des valeurs négatives car ce sont deux espèces qui se développent lors d'apports importants en phytodétritus durant les floraisons phytoplanctoniques dans la zone photique. Pendant ces blooms, la matière organique qui se dépose sur le fond océanique va se décomposer et libérer du CO₂ appauvri en ¹³C. Ce CO₂ va diluer le ¹³C de l'eau de fond. *E. exigua* et *O. umbonatus* abondent lorsque se produit ce phénomène, et enregistrent cet appauvrissement de l'eau en ¹³C. De plus ces deux espèces contrairement à *A. globulosus* et *F. wuellerstorfi*, vivent plus profondément dans le sédiment (jusqu'à 4cm de profondeur pour *O. umbonatus* dans nos échantillons) où l'eau interstitielle est encore plus appauvrie en ¹³C que l'eau de fond à cause du pourcentage en matière organique qui y est souvent plus élevé que dans le sédiment superficiel. *O. umbonatus* est décrit comme endobenthique (Rathburn et al., 1994 ;Rathmann et al., 2008) et cette espèce enregistrerait alors le signal isotopique de l'eau interstitielle (Rathmann et al., 2008) plutôt que celui de l'eau de fond. Les individus vivants d'*E. exigua* étaient présents jusqu'à 2 cm de profondeur dans le sédiment seulement. Il serait probable qu'*E. exigua* enregistre un signal d'eau interstitielle moins profonde ou même d'eau de fond, ce qui expliquerait pourquoi les moyennes de $\delta^{13}\text{C}$ sur cette espèce soit toujours moins négatives que celle d'*O. umbonatus*.

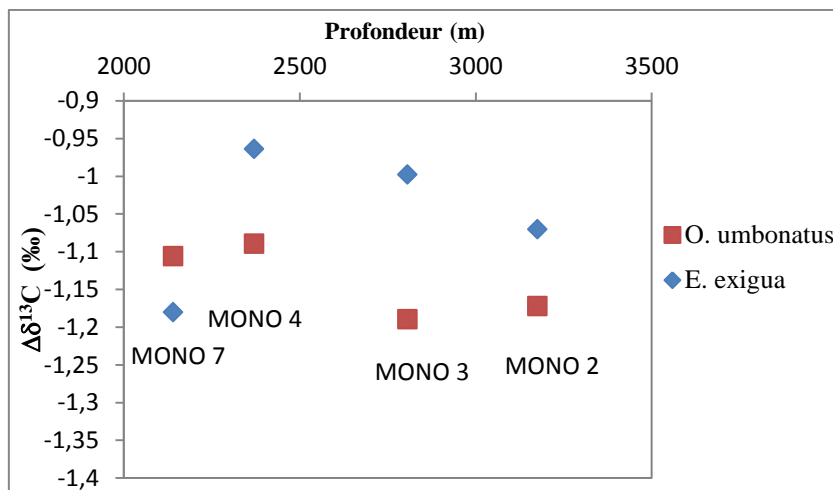


Figure 19 : $\Delta\delta^{13}\text{C}$ Entre *F. wuellerstorfi* et le couple *O. umbonatus* et *E. exigua* pour toutes les stations.

Afin de mieux comprendre l'écart de valeurs entre les différentes espèces, le $\Delta\delta^{13}\text{C}$ espèce endobenthique ou saisonnière – espèce épibenthique (Figure 19) peut être utilisé comme un indicateur de l'intensité des apports saisonniers en phytodétritus (Mackensen et al., 2000; Eberwein, 2006; Fontanier et al., 2006, Smart et al., 2008). En effet, plus l'apport en phytodétritus est élevé plus il y a un écart entre le $\delta^{13}\text{C}$ *F. wuellerstorfi* et le $\delta^{13}\text{C}$ *E. exigua*, car *E. exigua* profite des blooms phytoplanctoniques pour se développer et se multiplier. Les calculs montrent un écart moyen de -1,05‰ entre *E. exigua* et *F. wuellerstorfi* (Figure 19). Les mêmes calculs entre *O. umbonatus* et *F. wuellerstorfi* donnent un écart moyen de -1,14‰. Ceci indique que i) *O. umbonatus* a la même stratégie trophique d'*E. exigua* et ii) *O. umbonatus* a probablement une profondeur de calcification dans le sédiment qui est légèrement supérieure à celle d'*E. exigua*.

Enfin, il ne semble pas y avoir de relation entre profondeur de station et $\Delta\delta^{13}\text{C}$. pourtant le flux en phytodétritus devrait être plus important dans les stations les plus proches du delta du Gange/Brahmapoutre où le bloom en phytoplancton semble plus important (Figure 4). De plus il devrait y avoir moins de matière organique qui arrive au niveau des stations les plus profondes lors des blooms, car la colonne d'eau où une grande partie de la matière organique est reminéralisée y est plus large. Ceci montre, une fois de plus, que d'autres facteurs doivent être pris en compte lors de la comparaison entre stations, notamment la dilution des individus morts dans le sédiment. En effet ces mesures ont été effectuées sur des individus morts d'*E. exigua*, de *F. wuellerstorfi* et d'*A. globulosus*. L'abondance des individus morts est tributaire des apports sédimentaires comme expliqué dans l'étude comparative des assemblages. Ainsi les foraminifères benthiques de MONO 2 et 3 sont moins dilués par les apports terrigènes. Les assemblages dans ces deux stations sont potentiellement composés d'individus, provenant d'un mélange de plusieurs générations, ce qui peut avoir pour effet d'atténuer l'écart de $\delta^{13}\text{C}$ entre les différentes espèces.

V. Conclusion et perspectives

Le but de ce travail était de déterminer et tester sur des archives sédimentaires des traceurs écologiques et isotopiques à partir des foraminifères benthiques, pour comprendre les facteurs environnementaux qui influencent ces traceurs dans l'océan moderne afin de les utiliser à des fins de reconstitutions paléocéanographiques. Plus précisément, le site étudié, la Baie du Bengale, est une zone d'importance pour déterminer les variations de la mousson dans le passé à différentes échelles de temps, afin de mieux appréhender les changements climatiques futurs. Aussi, la connaissance précise des traceurs employés pour reconstituer la variation de la mousson dans le passé est fondamentale pour valider et interpréter les enregistrements paléoclimatiques.

Ce travail a porté sur l'étude des sédiments d'interface et des échantillons d'eau de fond et interstitielle de 6 stations situées à différentes profondeurs d'eau dans le Nord de la Baie du Bengale (MONO 2, 3175m; MONO 3, 2806m; MONO 4, 2373m; MONO 7, 2140m; MONO 8, 2549m; MONO 9, 2608m). L'étude des assemblages a concerné les 10 premiers centimètres des 6 stations, soit 4125 individus et 232 espèces de foraminifères benthiques. Les principaux résultats ont montré que l'abondance en foraminifères vivants est faible, et cette abondance diminue avec la profondeur des stations. Les tests porcelanés sont aussi de moins en moins abondants avec la profondeur. Les foraminifères agglutinés ne fossilisent pas toujours, provoquant un biais taphonomique important. Les assemblages morts sont dominés dans MONO 2 et 3 par *E. exigua* et *O. umbonatus*. Les analyses isotopiques des eaux de fond donnent des valeurs homogènes en $\delta^{18}\text{O}$ (excepté pour MONO3, située à la jonction entre la Baie du Bengale et la Mer d'Andaman), variant entre -0,26‰ et -0,11‰ sans tendance particulière en fonction de la profondeur. Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ sont comprises entre -1,14‰ et -0,33‰ (excepté MONO9 à -6‰), témoignant d'une masse d'eau de signature négative en $\delta^{13}\text{C}$. Les profils isotopiques de l'eau interstitielle de trois stations (MONO 4, 8 et 9) ont pu être étudiés. Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau interstitielle donnent des résultats contrastés, avec des valeurs cohérentes avec l'eau de fond dans les premiers centimètres (1cm pour MONO 4, 0,5cm pour MONO 8 et 2,7cm pour MONO 9), puis des valeurs significativement plus négatives pour les profondeurs plus importantes. Les données de $\delta^{13}\text{C}$ montrent peu de variabilité en fonction de la profondeur pour MONO 4, et diminuent avec la profondeur pour MONO 8 et MONO 9. Les analyses de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^{13}\text{C}$ sur les foraminifères benthiques ont été menées sur les espèces *A. globulosus*, *E. exigua*, *F. wuellerstorfi*, *G. pacifica*, *H. elegans*, *M. pompiloides*, *O. umbonatus* des 5 premiers centimètres 6 stations. Quand cela a été possible, des mesures sur individus morts et vivants ont été menés (*F. wuellerstorfi*, *G. pacifica*, *H. elegans*, *M. pompiloides* des stations MONO 7 et 9) et plusieurs classes de tailles ont été analysées. Les principaux résultats obtenus dans ce travail montrent que les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^{13}\text{C}$ sont très peu influencées par l'effet de la taille et ce, quelle que soit l'espèce analysée. Par ailleurs, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^{13}\text{C}$ varient peu en fonction de la profondeur à l'intérieur du sédiment pour chaque espèce. Enfin, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^{13}\text{C}$ de *F. wuellerstorfi* et *A. globulosus* d'une part, et de *E. exigua* et *O. umbonatus* d'autre part sont proches pour l'ensemble des stations.

Ces résultats ont été interprétés suivant les principaux facteurs environnementaux gouvernant la répartition des foraminifères benthiques dans le sédiment ainsi que la signature isotopique des eaux. Tout d'abord, les relations entre le signal isotopique des eaux et des foraminifères benthiques ont été discutées. Malheureusement, peu de données nous ont permis de comparer les signatures entre individus morts et vivants en raison de la faible abondance des individus vivants, et donnent des résultats contrastés : le $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^{13}\text{C}$ de spécimens morts et vivants de *M. pompiloides* sont proches, tandis que les valeurs obtenues sur *H. elegans* sont significativement variables, ce qui montre que cette espèce peut occuper différents microhabitats au cours de son cycle de vie, et enregistre ainsi des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ variable. Pour l'ensemble des espèces, l'impact de l'effet de taille sur le signal isotopique a pu être écarté. La comparaison entre le $\delta^{13}\text{C}$ des foraminifères benthiques et des eaux ont permis de montrer que le principal facteur de contrôle du $\delta^{13}\text{C}$ enregistré par les espèces est l'effet de microhabitat. En effet, *F. wuellerstorfi* et *A. globulosus* qui occupent le même microhabitat de type épifaune semble enregistrer le signal isotopique de l'eau profonde, tandis que *G. pacifica* et *O. umbonatus* qui sont caractéristiques de l'endofaune ont des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ plus négatives et proches du signal des eaux interstitielles. Par ailleurs, *E. exigua* et *O. umbonatus* sont clairement influencées par la saisonnalité des apports en matière organique, ce qui s'enregistre dans le signal de $\delta^{13}\text{C}$ mais également dans leur répartition dans les assemblages. Le $\delta^{18}\text{O}$ semble principalement contrôlé par le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau dans lequel vit le foraminifère et par l'effet vital lors de la précipitation du test. Le résultat majeur de ce travail est

d'avoir défini que l'espèce *A. globulosus* présente un effet vital proche de *F. wuellerstorfi*, qui varie peu en fonction des stations, témoignant ainsi du fort potentiel de cette espèce à être utilisée dans les études paléocéanographiques.

Le couplage entre données sur les assemblages et les signatures isotopiques a permis de mettre en évidence les facteurs environnementaux d'influence majeurs au niveau du site d'étude. L'effet de la dissolution et de la préservation a été clairement identifié grâce à la comparaison entre *E. exigua* et *O. umbonatu* durant laquelle nous avons observé que les tests d'*E. exigua* étaient en meilleur état. Ce processus a également été identifié grâce à l'étude des signaux isotopiques, en effet la variabilité inter-individuelle d'*E. exigua* était bien plus faible que celle d'*O. umbonatus*. Par ailleurs, les flux de sédiments terrigènes ont également une influence majeure sur les conditions de vie des foraminifères benthiques, d'une part par les apports massifs type turbidite qui perturbent le système écologique (comme identifié au niveau de la station MONO 8). Par ailleurs, ces apports continentaux contrôlent le flux de matière organique d'origine détritique arrivant au sédiment. Ce flux de matériel détritique est imprimé dans les assemblages, par exemple les fragments en foraminifères vivants arborescents qui abondent dans les stations les plus oligotrophes, en revanche la station MONO 9 qui est la seule à posséder une endofaune profonde possède un taux de C_{org} élevé (près d'1%). Enfin, l'impact de la saisonnalité des apports en matière organique produite par les blooms de phytoplancton en surface est aussi identifié dans les assemblages grâce à la présence des espèces *E. exigua* et *O. umbonatus* ainsi que dans le $\delta^{13}C$ de ces deux espèces qui montrent des valeurs négatives qui sont due aux apports importants en phytodétritus.

Ce travail était un pré-requis indispensable avant d'entamer toute étude paléocéanographique basée sur les assemblages et la géochimie des tests de foraminifères benthiques. En complément des analyses menées sur les échantillons de cette étude, d'autres traceurs vont pouvoir être explorés, en particulier sur les espèces de l'épifaune telles que *A. globulosus*, tels que les rapports B/Ca et Mg/Ca respectivement comme traceurs de la teneur en ions carbonates et de la température des masses d'eau de fond. De plus amples investigations sur l'effet de la dissolution peuvent également être menées sur les échantillons de MONO 7 qui possède des individus appartenant aux espèces *B. aculeata*, *U. proboscidea* et *U. auberiana* marqués par de nombreux indices de dissolution.

Synonymies et références taxonomiques des espèces citées dans ce manuscrit et présentes dans les assemblages

- *Ammomarginulina foliacea* = *Lituola* (*Haplophragmium*) *foliaceum* (Brady, 1881) = *Eratidus foliaceus* (Brady, 1881, Jones, 1994, pl. 33, fig. 20)
- *Anomalinoides globulosus* = *Anomalina globulosa* (Chapman and Parr, 1937, pl. 6, fig.17) = *Cibicidoides globulosus* (Chapman and Parr, 1937, Jones, 1994, pl. 94, fig. 4, 5)
- *Bulimina aculeata* (d'Orbigny, 1826, pl. 3, figs. 5, 6, Jones, 1994, pl. 51, fig. 7)
- *Cribrostomoides subglobosum* (Cushman, 1910, Jones 1994, pl. 34, fig. 8) = *Cribrostomoides subglobosus* (Sars) = *Lituola subglobosa* (Sars, 1868, figs 17.7, 8, Jones 1994, pl. 34, fig. 8).
- *Cyclammina trullissata* (Brady, 1879, Jones, 1994, pl. 40, fig. 13).
- *Cystammina* sp. (Jones, 1994, pl. 41, fig. 2)
- *Epistominella exigua* (Brady, 1884, Jones, 1994, pl. 103, fig. 14) = *Pulvinulina exigua* (Brady, 1884, pl. 4, figs. 18, 19)
- *Fontbotia wuellerstorfi* (Schwager, 1866) = *Cibicides wuellerstorfi* (Schwager, 1866) = *Anomalina wuellerstorfi* (Schwager, 1866, pl. 5, figs. 8, 9)
- *Globobulimina pacifica* (Cushman, 1927, pl. 3, fig. 10)
- *Hoeglundina elegans* (d'Orbigny, 1826, Jones, 1994, pl. 105, Fig. 5)
- *Hormosinella globulifera* (Brady, 1879, Jones, 1994, pl. 2 fig. 7)
- *Karrerrulina conversa* (Grzybowki, 1901, Jones, 1994, pl. 46, fig. 18)
- *Lagenammina difflugiformis* (Brady, 1879, Jones, 1994, pl. 30, fig. 1)
- *Melonis pompilioides* (Fichtel and Moll, 1798, Jones, 1994, pl.109, Fig. 10)
- *Miliolina* cf. *reussi* (Bogdanovich, 1947, Loeblich and Tappan, 1987, pl. 354, figs. 7-12)
- *Oridorsalis umbonatus* (Reuss, 1851) = *Rotalia umbonata* (Reuss, 1851, pl. 6, fig. 11)
- *Pyrgo murrhina* (Schwager, 1866, Jones, 1994 pl. 2, fig. 11)
- *Recurvoides contortus* (Earland, 1934, p. 91, pl. 10, figs. 7-19)
- *Reophax dentaliniformis* (Brady, 1881) = *Nodulina dentaliniformis* (Brady, 1881, Jones, 1994, pl. 30, figs. 21, 22)
- *Reophax pilulifer* = *Reophax pilulifera* (Brady, 1884, Murray & alve, 2011 fig. 19.12)
- *Rhizammina algaeformis* (Brady, 1879, Jones, 1994, pl.28, fig. 6)
- *Saccorhiza ramosa* (Brady, 1879, Jones, 1994, pl.1, figs. 11, 12)
- *Uvigerina auberiana* (d'Orbigny, 1839, Jones, 1994, pl. 75, figs. 6, 8)
- *Uvigerina proboscidea* (Schwager 1866, pl. 3, figs 16-18) = *Siphouvigerina ampullaceal* (Brady, 1884, Jones, 1994, pl. 75 fig. 10)
- *Uzbekistania charoides* = *Glomospira charoides* (Jones and Parker, 1860, Jones, 1994, pl. 38, fig. 16)

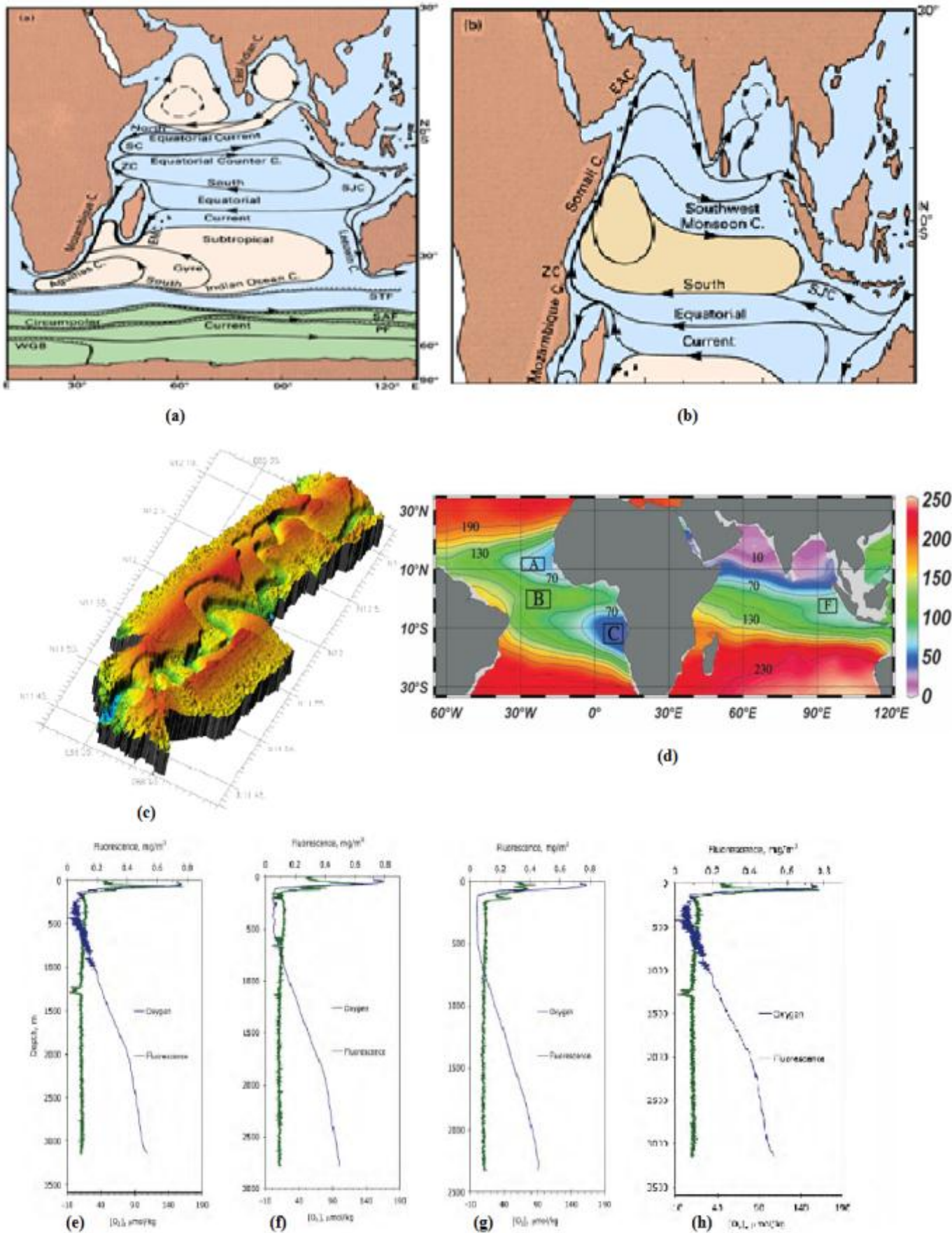
Références Bibliographiques

- Antoine D., André J.M., Morel A., Oceanic primary production 2. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll, *Global Biogeochemical cycles*, vol. 10, no. 1, pages 57-69, 1996.
- Basov I.A., Khusid T.A., Biomass of benthic foraminifera in sediments of the Sea of Okhotsk. *Oceanology*, 23, 489–495, 1983.
- Bentov S., Brownleeb C., Erez J., The role of seawater endocytosis in the biomineralization process in calcareous foraminifera, *PNAS*, vol. 106, no. 51, 21500–21504, 2009.
- Bernhard, J.M. and Sen Gupta, B. Foraminifera of oxygen-depleted environments, p. 200-216, 1999.
- Colin C., Reconstitution du régime de l'érosion des chaînes himalayennes et birmanes au cours des deux derniers cycles climatiques (300 derniers ka.). Thèse de doctorat, Université Paris XI Orsay, 272 pp., 1997.
- Eberwein A., Mackensen A., Regional primary productivity differences off Morocco (NW-Africa) recorded by modern benthic foraminifera and their stable carbon isotopic composition: *Deep-Sea Research, Part I*, v. 53, p. 1379–1405, 2006.
- Emerson, Jahnke, Bender, Froelich, Klinkhammer, Bowser, and Setlock Early diagenesis in sediments from the eastern equatorial Pacific, 1. Pore water nutrient and carbonate results. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 49, p 57-80, 1980.
- Erez, J., Vital effect on stable-isotope composition seen in foraminifera and coral skeletons. *Nature* 273, 199–202, 1978.
- Fontanier C., Jorissen F.J., Licari L., Alexandre A., Anschutz P., Carbonel P., Live benthic foraminiferal faunas from the Bay of Biscay: faunal density, composition, and microhabitats, *Deep-Sea Research I*, 49, 751–785, 2002.
- Fontaniera C., Jorissen F.J., Chaillou G., David C, Anschutz P., Lafon V., Seasonal and interannual variability of benthic foraminiferal faunas at 550m depth in the Bay of Biscay, *Deep-Sea Research I* 50 457–494, 2003.
- Fontaniera C., Jorissen F.J., Chaillou G., Anschutz P., Grémare A., Griveaud C., Live foraminiferal faunas from a 2800m deep lower canyon station from the Bay of Biscay: Faunal response to focusing of refractory organic matter, *Deep-Sea Research I* 52, 1189–1227, 2005.
- Fontanier C., Mackensen A., Jorissen F.J., Anschutz P., Licari L., Griveaud C., Stable oxygen and carbon isotopes of live benthic foraminifera from the Bay of Biscay: Microhabitat impact and seasonal variability, *Marine Micropaleontology*, 58, 159– 183, 2006.
- Fontugne M. R., Duplessy J. C, Variations of the monsoon regime during the upper quaternary : evidence from carbon isotopic record of organic matter in north indian ocean sediment cores, *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 56, 69-88, 1986.
- Galy V., France-Lanord C., Beyssac O., Faure P., Kudrass H., Palhol F., Efficient organic carbon burial in the Bengal fan sustained by the Himalayan erosional system, *Nature*, 450, 407-411, 2007.
- Geslin E., Heinz P., Jorissen F., Hemleben Ch., Migratory responses of deep-sea benthic foraminifera to variable oxygen conditions: laboratory investigations, *Marine Micropaleontology*, 53, 227– 243, 2004.
- Gooday A.J.. Meiofaunal foraminiferans from the bathyal Porcupine Seabight (north east Atlantic); size structure, standing stock, taxonomic composition, species diversity and vertical distribution in the sediment. *Deep-Sea Research*, 33:1345-1373, 1986.
- Griveaud C., Influence des conditions écologiques sur la composition isotopique ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) du test de foraminifères benthiques actuels, Thèse de doctorat, École doctorale d'Angers, 326 pp., 2007.

- Gupta B.K.S., Modern Foraminifera, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 371, 2002.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D., PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9pp, 2001.
- Jones R.W. & Charnock M.A, 'Morphogroups' of agglutinating foraminifera, their life positions and feeding habits and potential applicability in (paleo)ecological studies. *Revue de Micropaleontologie*, 4, 311–320,1985.
- Jones, R. W., The Challenger Foraminifera. Oxford University Press, Oxford, 1-149, 1994.
- Jorissen F., Henko C. de Stigter, Widmark J.G.V., A conceptual model explaining benthic foraminiferalmicrohabitats, *Marine Micropaleontology*, 26, 3-1.5, 1995.
- Kessarkar P.M., Purnachandra Rao V., Ahmad S.M., Patil S.K., Kumar A., Anil Babub G., Chakraborty S., Soundar Rajan R., Changing sedimentary environment during the Late Quaternary: Sedimentological and isotopic evidence from the distal Bengal Fan Deep-Sea Research I 52,1591–1615, 2005.
- Loeblich, A.R. and Tappan, H., Foraminiferal Genera and their Classification. New York, Van Nostrand Reinhold Company, 970 pp, 1987.
- Loubere P., Jacobsen B., Kristensen D.K., Husum K., Jernas P., Richaud M., The structure of benthic environments and the paleochemical record of foraminifera, *Deep-Sea Research I*, 58, 535–545, 2011.
- Mackensen A., Hubberten H.W., Bickert T., Fischer G., Fütterer D.K, The $\delta^{13}\text{C}$ in benthic foraminiferal tests of *Fontbotia wuellerstorfi* (schwager) relative to the $\delta^{13}\text{C}$ of dissolved inorganic carbon in southern ocean deep water: implications for glacial ocean circulation models, *Paleoceanography*, vol. 8, no. 5, 587-610, 1993.
- Mackensen A., Schumacher S., Radke J., Schmidt D.N., Microhabitat preference and stable carbon isotopes of endobenthic foraminifera: clue to quantitative reconstruction of oceanic new production?, *Marine Micropaleontology*, 40, 233-258, 2000.
- Mackensen A., Licari L., Carbon Isotopes of Live Benthic Foraminifera from the South Atlantic: Sensitivity to Bottom Water Carbonate Saturation State and Organic Matter Rain Rates, (Wefer G., Mulitza S., Ratmeyer V.), Eds Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo 623-644, 2003.
- McCorkle D.C., Emerson S.R., Quay P.D., Stable carbon isotopes in marine porewaters, *Earth and Planetary Science Letters*, 74, 13-26, 1985.
- McCorkle D.C., Keigwin L.D., The influence of microhabitats on the carbon isotopic composition of deepsea benthic foraminifera, *Paleoceanography*, 5 n°2, 161-185, 1990.
- McCorkle D.C., Corlis B.H., Farnham C.A., Vertical distributions and stable isotopic compositions of live (stained) benthic foraminifera from the North Carolina and California continental margins, *Deep-Sea Research I*, 44 n°6, 983-1024, 1997.
- Murray J.W., Ecology and applications of benthic foraminifera. Cambridge University Press, 426pp, 2006.
- Murray J.W., Alve E., The distribution of agglutinated foraminifera in NW European seas: Baseline data for the interpretation of fossil assemblages, *Palaeontologia Electronica*, vol. 14, 2, 14-41, 2001.
- Rathburn A. E., Corliss B. H, Tappa K. D, Lohmann K. C., Comparisons of the ecology and stable isotopic compositions of living (stained) benthic foraminifera from the Sulu and South China Seas, *Deep-Sea Research I*, Vol. 43, No. 10, 1617-1646,1996.
- Rathmann S., Kuhnert H., Carbonate ion effect on Mg/Ca, Sr/Ca and stable isotopes on the benthic foraminifera *Oridorsalis umbonatus* off Namibia, *Marine Micropaleontology*, 66120–133, 2008.

- Rollion-Bard C., Erez J., Intra-shell boron isotope ratios in the symbiont-bearing benthic foraminiferan *Amphistegina lobifera*: Implications for $\delta^{11}\text{B}$ vital effects and paleo-pH reconstructions, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 1530–1536, 2010.
- Saidova Kh. M., Benthic Foraminifera Communities of the Andaman Sea (Indian Ocean), *Oceanology*, vol. 48, No. 4, pp. 517–523, 2008.
- Schmiedl G., Pfeilsticker M., Hemleben C., Mackensen A., Environmental and biological effects on the stable isotope composition of recent deep-sea benthic foraminifera from the western Mediterranean Sea, *Marine Micropaleontology*, 51, 129–152, 2004.
- Schumacher S., Jorissen F., Mackensen A., Gooday A., Pays O., Ontogenetic effects on stable carbon and oxygen isotopes in tests of live (Rose Bengal stained) benthic foraminifera from the Pakistan continental margin, *Marine Micropaleontology*, 76, 92–103, 2010.
- Shackleton N.J., Carbon-13 in *Uvigerina*: tropical rainforest history and the equatorial Pacific carbonate dissolution cycles, *The fate of fossil fuel CO₂ in the ocean*, 401–427, 1977.
- Shannon, C.E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27:379–423; 623–656, 1948.
- Simpson, E. H. Measurement of diversity. *Nature* 163:688, 1949.
- Smart C.W., Gooday A.J., Recent benthic foraminifera in the abyssal northeast Atlantic ocean: relation to phytodetrital inputs, *Journal of Foraminiferal Research*, v. 21, no. 2, p. 85–92, 1997.
- Smart C.W., Abyssal NE Atlantic benthic foraminifera during the last 15 kyr: Relation to variations in seasonality of productivity, *Marine Micropaleontology*, 69, 193–211, 2008.
- Stramma L., Gregory C. Johnson, Janet Sprintall, Volker Mohrholz, Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans, *Science* 320, 655, 2008.
- Tachikawa K., Elderfield H., Microhabitat effects on Cd/Ca and $\delta^{13}\text{C}$ of benthic foraminifera, *Earth and Planetary Science Letters*, 202, 607–624, 2002.
- Tomczak, M. and J. S. Godfrey, *Regional Oceanography: An Introduction*, Second Edition, 390 pp., 2003.
- Walton W.R., Techniques for recognition of living foraminifera, *Contributions from the Cushman Foundation for Foraminiferal Research*, v. 3, p. 56–60, 1952.
- Weber M.E., M. Wiedicke-Hombach, H.R. Kudrass, H. Erlenkeuser, Bengal Fan sediment transport activity and response to climate forcing inferred from sediment physical properties, *Sedimentary Geology* 155, 361–381, 2003.
- Wefer, G., Berger, W.H., Isotope paleontology: growth and composition of extant calcareous species. *Mar. Geol.* 100, 207–248, 1991.
- Yu J., Elderfield E. Benthic foraminiferal B/Ca ratios reflect deep water carbonate saturation state. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 258, 73–86, 2007.

Annexes



Annexe I : (a) Circulation océanique de surface durant la mousson d'hiver (b) Circulation océanique de surface durant la mousson d'été (Tomczak et Godfrey, 2003) (c) Canyon sous-marin de la baie du Bengale. Source : Marion Dufresne (d) Taux d'oxygène dissous dans les océans à 400m de profondeur (Stramma et al., 2008) (e, f, g et h)

Profils verticaux de l'oxygène dissous dans la baie du Bengale dans différentes stations, respectivement MONO 2, 3, 4 et 9. Source : Marion Dufresne.



Annexe II: (a) Figure d'un multicore portant les 4 carottes d'interfaces sédiment(2)-eau de fond(1) de la station MONO 4, et (b) méthode d'extraction de l'eau interstitielle d'une carotte de la même station.

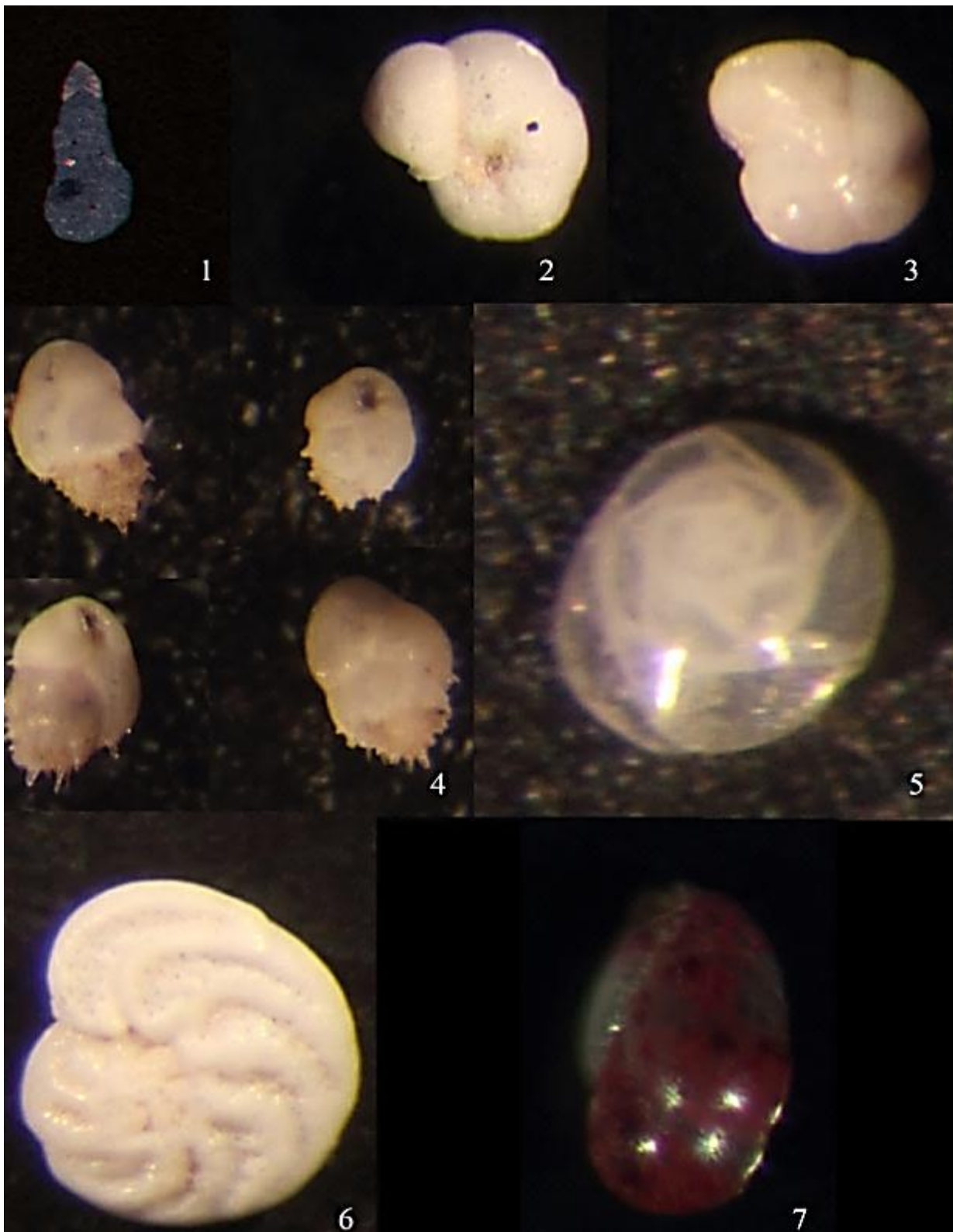


Annexe III : Interface bien préservée de station MONO 3.

Mission MONOPOL 05/02/2013

Echantillons	Poids A (g) Bécher	Poids B (g) Bécher + sédiment sec	Poids Y (g) fraction 63- 150 µm	Poids Z (g) fraction > 150 µm	Poids Z (g) fraction >150µm bis	Poids du sédiment sec	Pourcentage de la fraction 63- 150µm	Pourcentage de la fraction <63µm	Pourcentage de la fraction argileuse	Remarques
MONO2, Interface	108,402	114,6378	0,1685	0,3513	6,2358	6,2358	2,70213926	5,63359954	91,6642612	Pas de rose bengale
MONO 2, 0-0,5	117,6828	119,9946	0,155	1,1431	2,3118	2,3118	6,70473224	49,4463189	43,8489489	
MONO 2, 0,5-1	107,1146	110,6178	0,2166	1,8953	3,5032	3,5032	6,18291847	54,1019639	39,7151176	
MONO2, 1-1,5	109,3804	113,6574	0,2741	1,8349	4,277	0,1904	6,40869769	42,9015665	50,6897358	
MONO 2, 1,5-2	116,497	122,475	0,3508	1,5846	5,978	0,8167	5,86818334	26,507193	67,6246236	
MONO 2, 2-3	112,0454	122,6165	0,6194	1,7513	10,5711	2,0721	5,8593713	16,5668663	77,5737624	
MONO 2, 3-4	105,7756	116,9972	0,5319	2,0319	11,2216	1,848	4,73996578	18,1070436	77,1529907	
MONO2, 4-5	111,0286	121,4905	0,4957	1,8693	10,4619	1,6468	4,73814508	17,8676913	77,3941636	
MONO 3 II A, Inter	108,407	110,5954	0,3648	0,7701	-	2,1884	16,669713	35,1900932	48,1401937	Séparation des fractions >150 et 63-150 sous eau
MONO 3 II A, 0-0,5	117,6866	120,776	0,7768	1,4592	-	3,0894	25,1440409	47,2324723	27,6234868	Séparation des fractions >150 et 63-150 sous eau
MONO 3 II A, 0,5-1	107,1156	110,576	0,1414	0,6119	-	3,4604	4,08623281	17,6829268	78,2308404	
MONO 3 II A, 1-1,5	109,3812	116,5108	0,8384	1,0792	-	7,1296	11,7594255	15,1368941	73,1036804	
MONO 3 II A, 1,5-2	116,5002	123,079	0,2596	1,111	-	6,5788	3,94600839	16,8875783	79,1664133	
MONO 3 II A, 2-3	112,0474	120,261	0,2772	1,251	-	8,2136	3,37489043	15,2308367	81,3942729	
MONO 3 II A, 3-4	105,779	125,6405	0,9178	1,8792	1,8048	19,8615	4,62100043	18,548448	76,8305516	fraction > 150 µm dans deux pilluliers
MONO 3 II A, 4-5	111,0316	125,8735	0,6196	1,6665	1,4976	14,8419	4,17466766	21,3186991	74,5066332	fraction > 150 µm dans deux pilluliers
MONO 4, 0-0,5	110,178	112,7268	0,0693	0,2153	-	2,5488	2,71892655	8,44711237	88,8339611	
MONO 4, 0,5-1	107,8488	110,3114	0,0548	0,1523	-	2,4626	2,22529034	6,18452043	91,5901892	
MONO 4, 1-1,5	107,016	111,4524	0,1362	0,2834	-	4,4364	3,0700568	6,38806239	90,5418808	
MONO 4, 1,5-2	113,3452	118,904	0,1216	0,2372	-	5,5588	2,18752249	4,26710801	93,5453695	
MONO 4, 2-3	116,3362	128,9365	0,2223	0,2595	-	12,6003	1,76424371	2,05947477	96,1762815	
MONO 4, 3-4	108,1206	124,132	0,238	0,1366	-	16,0114	1,48644091	0,85314214	97,660417	
MONO 4, 4-5	111,8984	126,172	0,2236	0,1158	-	14,2736	1,56652842	0,81128797	97,6221836	
MONO7, Interface	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
MONO 7, 0-0,5	107,8494	114,6738	0,0775	0,1139	6,8244	6,8244	1,13563097	1,6690112	97,1953578	
MONO 7, 0,5-1	107,0088	114,3368	0,0903	0,0987	7,328	7,328	1,23225983	1,34688865	97,4208515	
MONO 7, 1-1,5	113,3434	121,4785	0,0917	0,1101	8,1351	8,1351	1,12721417	1,35339455	97,5193913	
MONO 7, 1,5-2	116,3362	119,5504	0,0287	0,0249	3,2142	3,2142	0,8929127	0,77468732	98,3324	
MONO 7, 2-3	108,1208	118,4328	0,0981	0,1157	10,312	10,312	0,95131885	1,12199379	97,9266874	
MONO 7, 3-4	111,8968	126,9825	0,1096	0,0613	15,0857	15,0857	0,72651584	0,40634508	98,8671391	
MONO 7, 4-5	116,001	130,9745	0,1076	0,0423	14,9735	14,9735	0,71860287	0,28249908	98,9988981	
MONO 8, 0-0,5	106,0018	129,0435	0,0017	0,0034	-	23,0417	0,00737793	0,01475586	99,9778662	
MONO 8, 0,5-1	104,7744	115,3108	0,0008	0,0016	-	10,5364	0,00759273	0,01518545	99,9772218	
MONO 8, 1-1,5	106,8224	116,8274	0,0016	0,0014	-	10,005	0,015992	0,013993	99,970015	
MONO 8, 1,5-2	112,1678	122,1705	0,0007	0,0015	-	10,0027	0,00699811	0,01499595	99,9780059	
MONO 8, 2-3	107,3398	125,476	0,0015	0,0058	-	18,1362	0,00827075	0,03198024	99,959749	
MONO 8, 3-4	114,279	130,4145	0,0006	0,0014	-	16,1355	0,00371851	0,00867652	99,987605	
MONO 8, 4-5	107,4618	129,464	0,0015	0,006	-	22,0022	0,0068175	0,02727	99,9659125	
MONO 9, Interface	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
MONO 9, 0-0,5	106,8214	119,8476	0,002	0,0074	-	13,0262	0,01535367	0,05680859	99,9278377	
MONO 9, 0,5-1	112,1682	121,7995	0,0013	0,0046	-	9,6313	0,01349766	0,04776095	99,9387414	
MONO 9, 1-1,5	107,3398	117,1912	-0,0001	0,0005	-	9,8514	-0,00101508	0,00507542	99,9959397	
MONO 9, 1,5-2	114,2782	124,7045	0,0003	0,0018	-	10,4263	0,00287734	0,01726403	99,9798586	
MONO 9, 2-3	107,4538	124,8175	0,0005	0,0019	-	17,3637	0,00287957	0,01094237	99,9861781	
MONO 9, 3-4	154,0235	170,5645	0,0009	0,0014	-	16,541	0,00544103	0,00846382	99,9860952	
MONO 9, 4-5	149,0745	167,816	-0,0001	0,0017	-	18,7415	-0,00053358	0,00907078	99,9914628	

Annexe IV: Poids des échantillons de chaque station. En rouge le pourcentage de la fraction inférieure à 63µm.

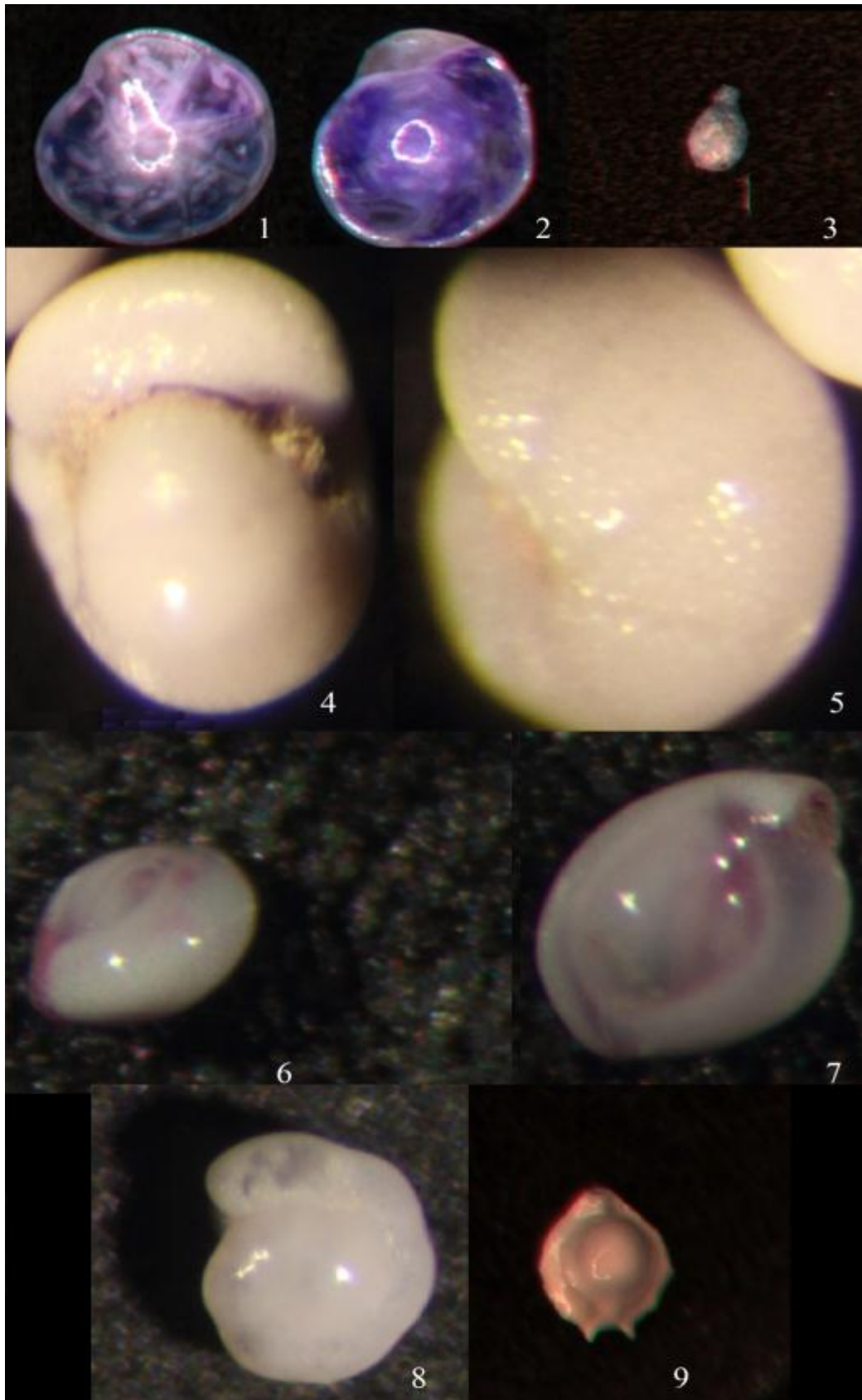


Annexe V.

1. *Ammomarginulina foliacea*
 2. *Anomalinoides globulosus*
 (face ventrale)

3. *Anomalinoides globulosus*
 (face dorsale)
 4. *Bulimina aculeata*
 5. *Epistominella exigua*

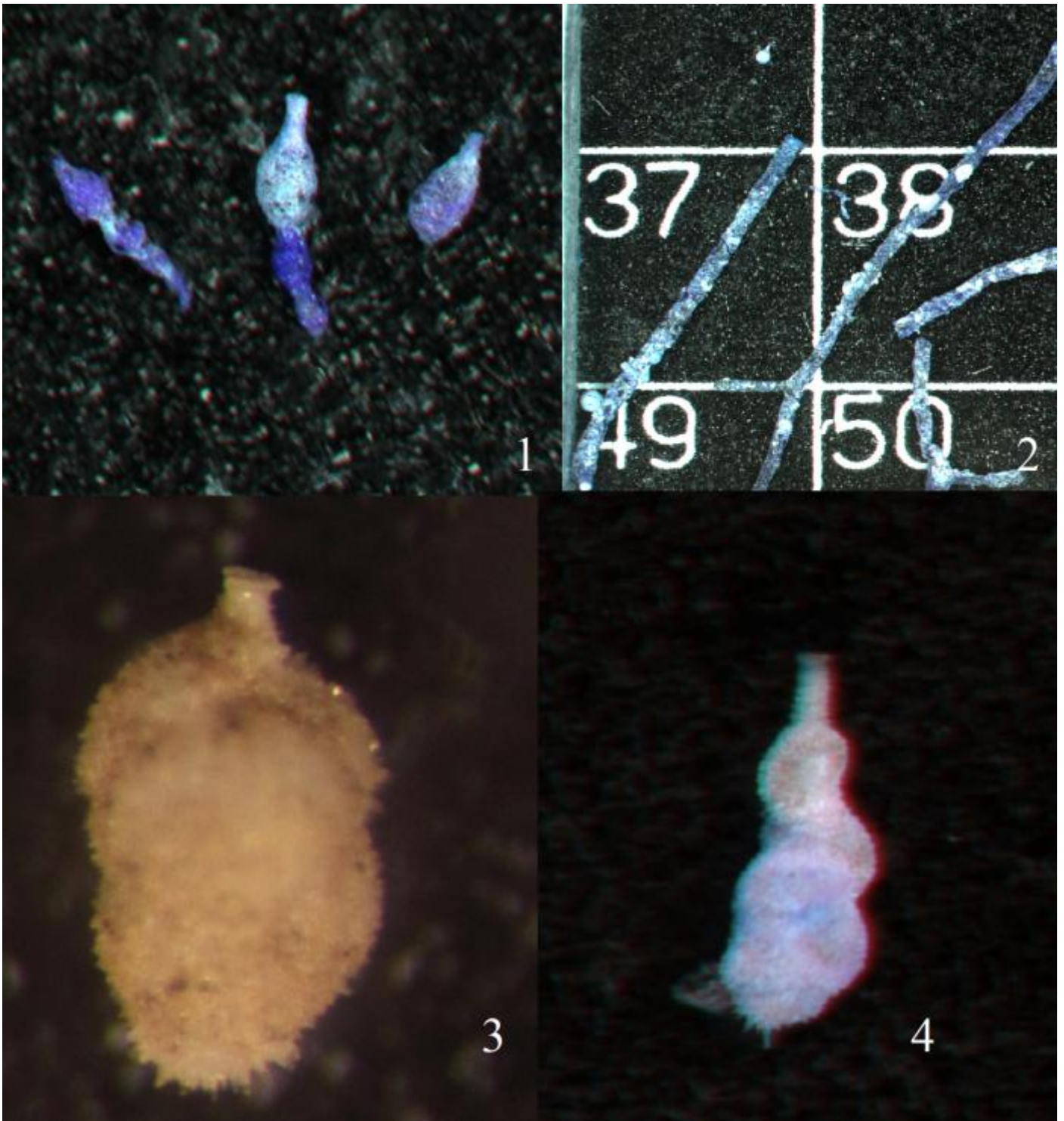
6. *Fontbotia wuellerstorfi*
 7. *Globobulimina pacifica*
 (vivant)



Annexe VI.

- 1. *Hoeglundina elegans* (face ventrale) (vivants)
- 2. *Hoeglundina elegans* (face dorsale) (vivants)
- 3. *Lagenammina difflugiformis*
- 4. *Melonis pompilioides* (vue aperturale)

- 5. *Melonis pompilioides*(vue latérale)
- 6-7. *Miliolina cf. reussi* (vivants)
- 8. *Oridorsalis umbonatus*
- 9. *Pyrgo murrhina*



Annexe VII.

- 1. *Reophax dentaliniformis* (vivants)
- 2. *Rhizammina algaeformis* (vivants)

- 3. *Uvigerina auberiana*
- 4. *Uvigerina proboscid*

Annexe VIII. MONO 2 :

MONO 2 : Espèces		Mono 2	Morts			
Carbonatés	Mono 2 interface	Mono 2 0-0,5cm	Mono 2 0,5-1cm	Mono 2 1-1,5cm	Mono 2 1,5-2cm	Mono 2 2-3cm
Anomalinoïdes globulosus	4	17	22	22	8	16
Astacolus insolitus		1				
Astronion echolsi			10			
Bulimina alazanensis		2	2			
carbo indet			4			
Cibicides pseudoungerianus			2			
Cibicoides bradyi		12	5			
Cibicoides pseudoungerianus		5				
Cibicoides robertsonianus		1	2			
Cibicoides sp.			1			
Dentalina aphelis			1			
Ehrenbergina trigona		1				
Epistominella exigua	6	18	24	24	10	31
Fissurina alveolata		1	2			
Fissurina fimbriata		2				
Fissurina formosa		1				
Fissurina incomposita		4	4			
Fissurina orbignyana			1			
Fissurina seminiformis			2			
Fissurina sp.			5			
Fontbotia wuellerstorfi	1	4	35	33	22	28
Globocassidulina subglobosa	1	5	20			
Globulotuba sp.	1	2				
Gyroidinoïdes altiformis	1		16			
Gyroidinoïdes soldanii			6			
Gyroidinoïdes soldanii (forme juvénile)			1			
Laticarinina pauperata	1	3	3			
Melonis barleeanum ou affinis		1	1			
Melonis pompilioides		1	2			
Miliolina reussi		1	5			
Oolina ou Fissurina sp.			1			
Oolina seminuda		1	1			
Orisordalis umbonatus	2	5	16			
Pullenia bulloides	1	7	17			
Pullenia osloensis		1	5			
Pullenia quinqueloba		1	9			
Pullenia salisburyi	3		10			
Pullenia subcarinata		12	15			
Pyrgo depressa	2		4			
Pyrgo murrhina	1					
Pyrgo sp.		1	1			
Pyrulina fusiformis			5			
Pyrulina gutta ou angusta	2					

Pyrulina ou Globulotuba sp.		1	1			
Pyrulina sp.			2			
Quinqueloculina venusta	2		12			
Quinqueloculina weaveri		1				
Quinqueloculina tropicalis			2			
Saracenaria volpicelli			1			
Sigmoidella seguenzana	1					
Spheroidina bulloides		5	3			
Spheroidina bulloides (forme cônica)	1	1	2			
Agglutinés						
Agglutiné indéterminé	6	35	50			
Allomorphina pacifica			1			
Ammolagena clavata			2			
Buzasina ringens			2			
Cribrostomoides subglobosum	1	1	10			
Cyclammina trullissata		1	2			
Eggerella bradyi			3			
Hormosinella distans			1			
Hormosinella globulifera		1	1			
Hormosinella globulifera ou normani	1					
Hormosina guttifera	5					
Hormosinella oviculus		1				
Hyperammina friabilis	1		1			
Karrerrulina conversa	2		4			
Lagenammina difflugiformis	4	3	3			
Portatrochammina bipolaris		1	1			
Reophax sp.		3				
Reophax dentaliniformis	4	1	8			
Reophax nodulosus		1	1			
Subreophax aduncus	1					
Thurammina compressa ou limnetis	1					
Thurammina papillata	1					
Trochammina sp1			1			
Trochammina sp2		1				
Trochammina inflata			1			
Usbekistania charoides	1	3	3			
Fragments						
Arbo droit lisse		2	10			
Arbo gros grains droit		9	12			
Arbo indet		3	8			
Arbo pas droit		7				
Hormosinella distans ou R.sp. Cf. oviculus		5				
Rhizammina algaeformis	13	8	23			
Espèces			Mono 2	Vivants		
Carbonatés		Mono 2 interface	Mono 2 0-0,5cm	Mono 2 0,5-1cm	Mono 2 1-1,5cm	Mono 2 1,5-2cm
Anomalinoïdes globulosus		-	1			

<i>Cibicidoides bradyi</i>	-			2		
<i>Cibicidoides pseudoungerianus</i>	-		1			
<i>Cibicidoides robertsonianus</i>	-			1		
<i>Epistominella exigua</i>	-	1			1	
<i>Fissurina foliformis</i>	-		1	1		
<i>Globocassidulina subglobosa</i>	-	2		2		
<i>Gyroidinoides</i> sp.	-				1	
<i>Laticarinina pauperata</i>	-			1		
<i>Melonis pompilioides</i>	-			1		
<i>Miliolina reussi</i>	-	1		1		
<i>Pullenia osloensis</i>	-			1		
<i>Pullenia quinqueloba</i>	-				1	1
<i>Spheroidina bulloides</i>	-	1	1			
<i>Spheroidina bulloides</i> (forme cônica)	-	1				
Agglutinés						
<i>Cribrostomoides subglobosum</i>	-			1		
<i>Hormosinella oviculus</i>	-	2				
<i>Karrerrulina conversa</i>	-			1		
<i>Lagenammia difflugiformis</i>	-	2	1	2		
<i>Recurvoides contortus</i>	-					1
<i>Reophax</i> sp.	-	1				
<i>Reophax dentaliniformis</i>	-	3	4	6	1	1
<i>Saccorhiza ramosa frag</i>	-			3		
<i>Saccorhiza ramosa</i>	-			1		
<i>Trochammina</i> sp2	-			2		
Fragments						
Arborescent droit	-			1		
Arborescent indéterminé	-	5				
<i>Rhizammina algaeformis</i>	-	23	11	2	8	5

Annexe IX. MONO 3:

Espèces	MONO 3							
	Mono 3IIA Interface	Mono 3IIA 0-0,5	Mono 3IIA 0,5-1cm	Mono 3IIA 1-1,5	Morts Mono 3IIA 1,5-2cm	Mono 3IIA 2-3	Mono 3IIA 3-4cm	Mono 3IIA 4-5cm
<i>Ammonia</i> sp.			1					
<i>Anomalinoïdes globulosus</i>	5	5	10	7	13	11	7	16
<i>Astronion echolsi</i>			1					
<i>Bolivinita quadrilatera</i>				1				
<i>Brizalina earlandi</i>							2	
<i>Bulimina aculeata</i>				2			1	
<i>Bulimina alazanensis</i>	2		1	1	2	1	1	1
<i>Cibicides mundulus</i>	4							1
<i>Cibicides pseudoungerianus</i>	1							5
<i>Cibicidoides bradyi</i>		5	4	1	3	12	5	9

Cibicidoides pseudoungerianus							4	
Cibicidoides robertsonianus			1		1	1		
Cibicidoides sp.			1					
Cushmania desmophora								1
Dentalina aphelis			1	1				
Dentalina bradyensis	1						1	1
Epistominella exigua	24	32	37	67	67	60	46	45
Eponidella libertadensis						1		
Fissurina annectens					1	1		1
Fissurina formosa							1	
Fissurina incomposita	1		1	2	1	2	1	4
Fissurina orbignyana								
Fissurina semimarginata							3	
Fissurina sp.				1	1			
Fissurina staphyllearia						1		
Fontbotia wuellerstorfi	12	10	12	10	19	13	8	29
Francuscia extensa					2			1
Globocassidulina subglobosa	1		1	8	6	6	4	8
Globulotuba sp.	2	1		1				
Gyroidinoides umbonatus				2	3			
Gyroidina orbicularis				1				
Gyroidina sp.	1			1	1			
Gyroidinoides altiformis			2	5				5
Gyroidinoides soldanii	1		3	1	2	3	1	5
Gyroidinoides sp.			5					
Lagena dimorpha				1				
Lagena meridionalis								1
Lagena sp.					2	2	1	
Laticarinina pauperata	1		2	1	2	1	1	6
Cf. Pllenia (forme carrée)						1	1	
Lenticulina sp.	1							
Melonis inflatum	1		2		1	1		2
Melonis pompilioides	1		1	4	4	3	6	11
Miliolina reussi	2			1				
Nionella atlantica			1					
Nonionella atlantica	1			3		5	5	4
Nuttallides umbonifera			1			1		
Oolina apiculata			1					
Oolina exsculpa	1			1				
Oolina globosa				1				
Oolina seminuda							1	1

Oolina sp.		1	1					1
Orisordalis umbonatus	12	17	6	15	18	16	14	13
Orisordalis Westi			1					
Planularia siddaliana	1			1		1		
Pleurostomella sp.						1		
Polymorphina sp.			1					
Pullenia bulloides	4	4	6	9	9	16	12	7
Pullenia osloensis								6
Pullenia quinqueloba								2
Pullenia salisburyi	5	5	3	4	7	2		6
Pullenia subcarinata	6	5	7	7	7		5	1
Pyrgo depressa							1	
Pyrgo murrhina	3	1	3	6	4	4	5	2
Pyrgo sp.					1	1		
Pyrulina acuminata				3				
Pyrulina angusta				1			3	
Pyrulina fusiformis			1					3
Quinqueloculina venusta	1		5	4	2	4	3	3
Quinqueloculina weaveri		2						
Sigmoidella seguenzana				1				
Spheroidina bulloides								1
Spheroidina bulloides (forme cônica)					2	2	2	
Agglutinés								
Adercotryma glomerata						1		
Adercotryma sp.			3					1
Agglutiné indéterminé						1		9
Allomorphina pacifica				1				
Ammodiscus sp.				3	3	1		1
Ammoglobigerina bulloides		2						
Ammoglobigerina bulloides ou P. challengerii				1	2	3		
Ammolagena clavata								3
Buzasina ringens					2			2
Cribrostomoides scitulum			3					
Cribrostomoides sp.								
Cribrostomoides subglobosum	7	3			7	4	1	2
Cyclammina trullissata	7	7	1	6	6	5	6	6
Cystammina pauciloculata				1	1			
Eggerella bradyi		2				2		3
Hormosina sp.			1					

Hormosina guttifer						1		1
Hyperammina friabilis				1	1	2		1
Hyperammina sp.								1
Karrierella bradyi			1					
Karrerrulina conversa	3	3	1	5	4	5	3	6
Lagenammina difflugiformis	5	2	3	2	2	2	3	1
Paratrochammina bipolaris						1		
Paratrochammina challengerii				1	4			
Paratrochammina inflata								1
Pelosina rotunda				1				
Recurvoides contortus		1		2			1	1
Reophax sp.			1	4	3	1	1	
Reophax cf bilocularis			1					
Reophax dentaliniformis								1
Reophax mortenseni	1			1				1
Saccammina sphaerica	1			1	2	1		
Siphotextularia concava			1					
Trochammina sp.	1	5	1	2				
Turborotalia bradyi								
Usbekistania charoides		5	1	11	7	9	9	8
Veleroninoides wiesneri							1	
Verneuilinulla propinqua			1					
Fragments								
Arborescent droit	36	1		36	31		13	8
Arborescent droit lisse								7
Arborescent indet	31	3					16	2
Arborescent pas droit	9			7	11			8
Rhabdammina linearis frag						1		
Rhabdammina linearis						1		
Rhizammina algaeformis	4	45	1		2	1		7
Espèces				Mono 3IIA	Vivants			
Carbonatés	Mono 3IIA Interface	Mono 3IIA 0-0,5cm	Mono 3IIA 0,5-1	Mono 3IIA 1-1,5cm	Mono 3IIA 1,5-2	Mono 3IIA 2-3cm	Mono 3IIA 3-4	Mono 3IIA 4-5cm
Bathysiphon foliformis		1						
carbo indet	4		1	1	1			
Cibicides pseudoungerianus								1

Cibicidoides bradyi		1				1		
Epistominella exigua	2	1	1					
Eponidellasp.						1		
Gyroidina globosa						1		
Gyroidina sp.					1		1	
Gyroidinoides soldanii		1						
Laticarinina pauperata	1							
Melonis inflatum			2					
Miliolina sp.	1							
Orisordalis umbonatus	1	1						1
Pullenia bulloides	1							
Pullenia osloensis		1						
Pullenia salisburyi		1						
Pullenia subcarinata		1			1			
Pullenia sp.	1							
Pyrulina fusiformis			1					
Quinqueloculina sp.				1				
Agglutinés								
Adercotryma sp.						1		1
Allomorphina pacifica				1				
Botellina labyrinthica	1							
Buzasina ringens			1					
Buzasina sp. (Cf. galeata)			1					
Cribrostomoides subglobosum		4	2					
Cyclammina trullissata		2						
Earlandamina sp.	1							
Hormosina sp.			1					
Hyperammina sp.		1	1				1	
Recurvooides contortus							1	
Reophax sp.	3	1	1	3	1	1	1	
Reophax dentaliniformis		7						
Reophax fragment		1						
Reophax nodulosus		1						
Reophax scorpiurus		3						
Reophax subfusiformis		2			1			
Trochammina sp.								
Trochammina sp1								
Trochammina sp2		1						
Trochammina inflata						2		
Veleroninoides wiesneri						1		
Fragments								
Arborescent pas droit	1							

Rhizammina algaeformis	2		1	5	13	2	3	10
---------------------------	---	--	---	---	----	---	---	----

Annexe X. MONO 4 :

Espèces	Mono 4			
	Mono 4 0-0,5cm	Mono 4 0,5-1cm	Morts Mono 4 1-1,5cm	Mono 4 1,5-2cm
Carbonatés				
Anomalinoïdes globulosus	2	1	8	2
Astronion echolsi				1
Bifarilaminella advena	1	2		
Brizalina striatula	2			1
Bulimina aculeata	7	22	48	44
Bulimina alazanensis	1		1	
Bulimina mexicana	1	1	5	2
carbo indet		7	11	9
Cassidulina laevigata			1	
Cassidulina ponecta				1
Cibicides mundulus			1	
Cibicidoides bradyi	5	12	14	16
Cibicidoides pseudoungerianus				1
Cibicidoides robertsonianus		1	3	
Cibicidoides sp.		3		1
Cushmania desmophora				1
Dentalina sp.			1	
Epistominella exigua	9	6	9	10
Fissurina alveolata var. semisculpya	2			
Fissurina annectens	1	1		
Fissurina incomposita	1			
Fissurina sp.	4		3	3
Fistulose polymorphinids	2			
Fontbotia wuellerstorfi	2	3	4	4
Fursenkoina sp.				1
Gavelinopsis translucena			1	
Globocassidulina subglobosa	1	10	5	1
Glomospira gordialis		1	4	1
Gyroidina sp.		3	3	
Gyroidinoïdes altiformis			2	
Gyroidinoïdes Polius				1
Gyroidinoïdes soldanii		3	8	8
Hoeglundina elegans	1			1
Lagena aspera		1		
Lagena hispidula		2		
Lagena sp.	2	1		3
Laticarinina pauperata			6	9
Lenticulina sp.		2		1
Melonis pompilioides				3
Melonis sp.			1	
Nuttallides umbonifera	1			
Orisordalis umbonatus	6	4	14	4
Osangularia bengalensis ou culter			1	2

Planularia siddaliana	2			
Pullenia bulloides	3	7	9	8
Pullenia salisburyi	1			
Pyrgo depressa		1		
Pyrgo murrhina			1	
Quinqueloculina ou Triloculina		2		
Quinqueloculina venusta		1		
Sigmoilopsis schlumbergeri	2	1	13	
Spheroidina bulloides		3		
Spheroidina bulloides (forme cônique)		1		
Uvigerina ampullacea var. asperula ou proboscidea	4	6		2
Uvigerina auberiana			7	3
Uvigerina auberiana ou proboscidea	1		1	
Uvigerina auberiana forme costulée			1	
Agglutinés				
Adercotryma glomerata	1	11		
Adercotryma sp.	3		8	6
Agglutiné indéterminé	5		8	1
Ammobaculites filiformis	1			
Ammodiscus incertus				1
Ammoglobigerina bulloides ou P. challengerii		1		
Ammolagena clavata	4	3	15	8
Ammomarginulina foliacea	1	1	1	1
Buzasina ringens	2	1	2	3
Catena piriformis		1		
Crirostomoides scitulum	2	1	1	1
Crirostomoides sp.		3		
Crirostomoides subglobosum	3	1	3	2
Cyclammina trullissata	5	3	15	12
Cystammina pauciloculata			1	
Deuterammina sp.		2	1	
Earlandammina sp.			2	3
Eggerella bradyi		1	2	3
Haplophragmoides cf. shaeriloculus		2	1	3
Haplophragmoides sp. (Cf. tenuis)	1	1	3	2
Hormosina normani				3
Hormosina pilulifera		1		
Hormosina sp.	6	5	5	7
Hormosinella distans	1	1		
Hormosinella globulifera	3	5	2	1
Hormosina guttifer	8	2	3	1
Hyperammina friabilis		2	3	
Karrerrulina conversa	6	3	1	7
Lagenammina difflugiformis	8	11	6	4
Lagenammina tubulata/longetallis				
Martinotiella communis		1	6	3
Paratrochammina challengerii	5	1	6	
Placopsilinella aurantiaca			1	
Recurvoides contortus	2	2	10	5

Recurvoides trochamminiformis			1	2
Reophax dentaliniformis		1	1	
Reophax fragment			2	
Reophax mortenseni	1		2	4
Reophax nodulosus				
Reophax pilulifer	1			1
Reophax seminvoluta		2		
Reophax subfusiformis		3		
Reophax subfusiformis ou storpiurus	1			
Saccamina sphaerica	5	4	2	
Saccorhiza ramosa frag				
Saccorhiza ramosa			3	
Subreophax aduncus	1	1		
Thuramina papillata	3	4		
Tritaxis challengerii		1	1	
Trochamina sp.		1		2
Trochamina sp1	1	1		2
Trochamina sp2		2	3	5
Trochamina sp3	1		1	
Trochamina sp4 T squamata	1			
Trochamina inflata				1
Trochamina nana	1		1	
Usbekistania charoides	12	9	12	13
Veleroninoides wiesneri	1			
Fragments				
Arborescent droit	97	4	15	1
Arbo droit lisse	8	5	14	3
Arborescent indet				5
Arborescent pas droit	9	53	62	54
Arborescent pas droit fin				
Hormosinella distans ou R.sp. Cf. oviculus		5	3	1
Rhizammina algaeformis	1	3	21	18
Espèces		MONO 4	Vivants	
Carbonatés	Mono 4 0-0,5cm	Mono 4 0,5-1cm	Mono 4 1-1,5cm	Mono 4 1,5-2cm
Anomalinoides globulosus		1		
Bathysiphon filiformis	1			
Bulimina aculeata			1	
Bulimina mexicana		1		
carbo indet	4		2	
Cassidulina jonesiana	2			
Cibicidoides bradyi	2	1	1	1
Epistominella exigua			1	
Fissurina annectens			1	
Globocassidulina subglobosa			1	
Globulotuba sp.		1		
Glomospira gordialis	1			
Gyroidina sp.	1			
Gyroidinoides Polius			1	
Gyroidinoides sp.			1	1
Miliolina reussi		1		

Miliolina subrotunda		1		
Miliolina sp.	1			
Orisordalis umbonatus	2		1	2
Pullenia bulloides			1	
Pullenia quinqueloba				1
RosalinaNeoponides À vérifier		1		
Sigmoilopsis schlumbergeri			1	
Uvigerina ampullacea var. asperula ou proboscidea	1	1	2	
Agglutinés				
Adercotryma glomerata		1		
Adercotryma sp.	3		3	
Agglutiné indéterminé			1	
Ammomarginulina foliacea			3	1
Buzasina ringens		1	1	
Cribrostomoides scitulum	4		2	
Cribrostomoides subglobosum			2	3
Cyclammina trullissata			1	
Earlandamina sp.	2		1	
Eggerella bradyi		1		
Haplophragmoides cf. shaeriloculus				1
Haplophramoides sp. (Cf. tenuis)	1			
Hormosina sp.		7	3	2
Hormosinella distans			2	
Hormosinella globulifera		7	1	
Hormosina guttifera	2		2	
Hyperammina sp.			1	1
Karrerrulina conversa		2		
Lagenammina difflugiformis	3	4		1
Lagenammina tubulata/longetallis	1			
Paratrochammina challengerii	1	1	2	
Recurvoides contortus	2		7	1
Recurvoides trochamminiformis			1	
Reophax sp.	3	1		
Reophax cf bilocularis		1		
Reophax dentaliniformis	3	1		
Reophax subfusiformis				1
Saccorhiza ramosa				1
Trochammina sp.		1		
Trochammina sp1			1	
Trochammina sp2	2			
Trochammina sp3				1
Trochammina sp4 T squamata			1	
Trochammina sp.		1	1	
Fragments				
Hormosinella distans ou R.sp. Cf. oviculus			2	1
Rhizammina algaeformis		3	1	3

Espèces			Mono 7	Morts			
Carbonatés	Mono 7 0-0,5cm	Mono 7 0,5-1cm	Mono 7 1-1,5cm	Mono 7 1,5-2cm	Mono 7 2-3cm	Mono 7 3-4cm	Mono 7 4-5cm
Anomalinoïdes globulosus	2	2					
Astronion echolsi	1						
Bifarilaminella advena	1						
Bulimina aculeata	4	27					
Bulimina mexicana	1	1					
carbo indet		6					
Cassidulina jonesiana	2	2					
Cibicides mundulus		3					
Cibicidoides bradyi	8	13					
Cibicidoides robertsonianus		3					
Dentalina aphelis	1						
Epistominella exigua	5	7					
Fissurina incomposita		2					
Fissurina sp.		3					
Fontbotia wuellerstorfi	4	4					
Globocassidulina subglobosa	3						
Gyroidinoïdes altiformis	2	3					
Gyroidinoïdes soldanii	2	1					
Lagena hispidula		1					
Lagena sp.		1					
Laticarinina pauperata	2	4					
Melonis pompilioides	4	1					
Oolina sp.		2					
Orisordalis umbonatus	2	7					
Osangularia bengalensis ou culter	1	4					
Osangularia umbonifera	2						
Procerolagena gracillima		1					
Pullenia bulloides		3					
Pullenia osloensis	1	2					
Pyrgo depressa		3					
Pyrgo murrhina		2					
Pyrulina fusiformis		1					
Sigmoilopsis schlumbergeri	4	2					
Uvigerina ampullacea var. asperula ou proboscidea	7	5					
Uvigerina auberiana forme costulée		3					
Agglutinés							
Adercotryma glomerata	7						
Adercotryma sp.		4					
Agglutiné indéterminé	7	28					
Ammodiscus sp.	5	4					
Ammolagena clavata	8	11					
Ammomarginulina foliacea	9	8					
Buzasina ringens	3	1					
Cribrostomoides subglobosum	4	7					
Cyclammina trullissata	13	13					

Cystammina pauciloculata	1	2						
Cystammina sp.		1						
Eggerella bradyi		1						
Haplophramoides sp. (Cf. tenuis)		2						
Hormosinella globulifera	13							
Hyperammina friabilis	2	2						
Hyperammina sp.		17						
Karrerrulina conversa	14	17						
Lagenammina difflugiformis	3	1						
Martinotiella communis	1	4						
Reophax dentaliniformis	5							
Reophax mortenseni	2							
Saccorhiza ramosa	3							
Thurammina albicans	1							
Usbekistania charoides	11	20						
Fragments								
Arbo droit lisse	10	1						
Arborescent droit pas lisse	40							
Arborescent pas droit	60	16						
Arborescent pas droit fin								
Rhizammina algaeformis	4	1						
Espèces		Mono 7			Vivants			
Carbonatés		Mono 7 0-0,5cm	Mono 7 0,5-1cm	Mono 7 1-1,5cm	Mono 7 1,5-2cm	Mono 7 2-3cm	Mono 7 3-4cm	Mono 7 4-5cm
carbo indet						1		
Cassidulina jonesiana	1							
Cibicidoides bradyi	1							1
Gavelinopsis translucena	1							
Hoeglundina elegans						1	2	
Lenticulina submilligera		1						
Melonis pompilioides	1					1		
Pullenia bulloides	2	1						
Pullenia osloensis	1							
Spheroidina bulloides						1		
Agglutinés								
Adercotryma sp.		1			1			
Agglutiné indéterminé							1	
Ammomarginulina foliacea	3	1				1	1	1
Cribrostomoides subglobosum		1						
Cyclammina trullissata						1		
Hormosinella globulifera	4		1			2		
Hyperammina sp.							2	
Karrerrulina conversa		1						
Lagenammina difflugiformis			2			1		
Reophax sp.							1	
Reophax dentaliniformis	4	2	1					
Saccorhiza ramosa frag			4	5	14	1	1	
Saccorhiza ramosa					3			
Thurammina albicans	1							
Thurammina papillata								1

Trochammina sp2							1
Usbekistania charoides					1		
Fragments							
Arborescent droit	1						
Arborescent pas droit	13	2					
Arborescent pas droit fin							
Rhizammina algaeformis	2	1	2			1	

Annexe XII. MONO 8:

Espèces			Mono 8	Morts			
Carbonatés	Mono 8 0-0,5cm	Mono 8 0,5-1cm	Mono 8 1-1,5cm	Mono 8 1,5-2cm	Mono 8 2-3cm	Mono 8 3-4cm	Mono 8 4-5cm
Bulimina aculeata	1						
carbo indet	1						2
Agglutinés							
Ammomarginulina foliacea							1
Cribrostomoides subglobosum		1					
Hormosina guttifera							1
Reophax sp.							1
Valvulineria rugosa							1
Espèces			Mono 8	Vivants			
Carbonatés	Mono 8 0-0,5cm	Mono 8 0,5-1cm	Mono 8 1-1,5cm	Mono 8 1,5-2cm	Mono 8 2-3cm	Mono 8 3-4cm	Mono 8 4-5cm
Miliolina reussi	7	4	2	1	3		1
Uvigerina ampullacea var. asperula ou proboscidea							1
Uvigerina auberiana ou proboscidea							1
Agglutinés							
Cystammina sp.							1
Rhizammina algaeformis							1

Annexe XIII. MONO 9 :

Espèces			Mono 9	Morts			
	Mono 9 0-0,5cm	Mono 9 0,5-1cm	Mono 9 1-1,5cm	Mono 9 1,5-2cm	Mono 9 2-3cm	Mono 9 3-4cm	Mono 9 4-5cm
Carbonatés	Morts	Morts	Morts	Morts	Morts	Morts	Morts
Fontbotia wuellerstorfi						1	
Globobulimina cf auriculata							1
Globobulimina pacifica						1	
Globobulimina Hoeglundi				1		2	
Lagena hispidula		2					
Orisordalis umbonatus	1						
Pyrgo murrhina					1		
Uvigerina ampullacea var. asperula ou proboscidea		1					

Agglutinés							
Agglutiné indéterminé	2	2					
Lagenammina difflugiformis	11	8	5			1	3
Trochammina sp2					1		
Usbekistania charoides			1				
Fragments							
Arbo droit lisse	1						
Espèces							
Carbonatés		Mono 9		Vivants		Mono 9	
		0-0,5cm	0,5-1cm	1-1,5cm	1,5-2cm	2-3cm	3-4cm
		4-5cm					
Cassidulinoides bradyi							1
Chilostomella sp.							1
Fontbotia wuellerstorfi	1						
Globobulimina pacifica	1		1	2	3	7	8
Miliolina reussi		3	1				
Robertina tasmanica	1	1					
Agglutinés							
Adercotryma sp.	1						
Lagenammina difflugiformis	2	5	1		2		
Fragments							
Rhizammina algaeformis					1		

Stations	Total d'individus morts	1ère espèce dominante	2ème espèce dominante	3ème espèce dominante
MONO 2	706	<i>E. exigua</i> (48 individus, soit 6,8%)	<i>A. globulosus</i> (43 individus, soit 6,1%)	<i>F. wuellerstorfi</i> (40 individus, soit 5,7%)
MONO 3	508	<i>E. exigua</i> (93 individus, soit 18,3%)	<i>O. umbonatus</i> (35 individus, soit 6,9%)	<i>F. wuellerstorfi</i> (34 individus, soit 6,7%)
MONO 4	548	<i>B. aculeata</i> (29, soit 5,3%)	<i>U. charoides</i> (21 soit 3,8%)	<i>L. difflugiformis</i> (19 individus, soit 4,6%)
MONO 7	565	<i>Karrerrulina conversa</i> (31 individus, soit 5,5%)	<i>B. aculeata</i> (31 individus, soit 5,5%)	<i>Cyclammina trullissata</i> (26 soit 4,6%)
MONO 9	28	<i>L. difflugiformis</i> (19 individus, soit 67,9%)	-	-

Annexes XIV : Espèces dominant les assemblages morts du premier centimètre de sédiment de chaque station.