

Université d'Angers

LPG-Angers

Faculté des Sciences

2/11 boulevard Lavoisier

02 Bd Lavoisier

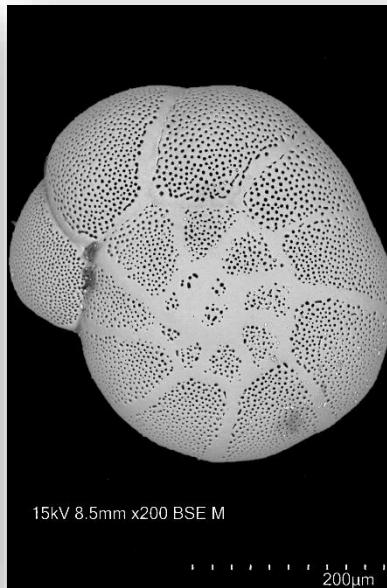
49045 Angers

Date du stage : **03 avril – 02 Juin 2023**

Soutenance : **23 Juin 2023**



DISTRIBUTION DES COMMUNAUTES DE FORAMINIFERES BENTHIQUES DE L'ETANG DE BERRE



Rapport de stage de Master 1 BEE

Parcours : Mer Anthropisation Diagnostic

Présenté par **Anaïs Herbomez**

Promotion : 2022-2023

Encadrante : **Christine Barras**

Tutrice : **Aurelia Mouret**

DISTRIBUTION DES COMMUNAUTES DE FORAMINIFERES BENTHIQUES DE L'ETANG DE BERRE

Résumé : Les lagunes sont sujets à des phénomènes d'eutrophisation naturelle. Cependant, depuis plusieurs décennies, celles-ci sont devenues des milieux anthropisés dont l'étude et le suivi sont nécessaires. L'Etang de Berre située au Nord-Ouest de Marseille est sujet à cette anthropisation (industries, usine hydraulique). A travers 11 prélèvements réalisés à la benne en Janvier 2023, une première étude des communautés de foraminifères a été réalisée. Au total, 1186 foraminifères ont été prélevés après lavage du sédiment et observation sous loupe binoculaire. Les espèces dominantes de l'étang sont : *Ammonia spp.*, *Haynesina germanica* et *Eggerelloides scaber*. Les densités standardisées pour 50cm³ varient d'environ 5,83 individus (PS13) à 132,5 individus (PS31). L'analyse approfondie des *Ammonia spp.* a permis d'identifier trois espèces : *Ammonia veneta* (T1), *Ammonia aberdoveyensis* (T2) et *Ammonia confertitesta* (T6). Les deux espèces hyalines majeures sont communes dans les lagunes méditerranéennes. La faible quantité de foraminifères retrouvés au centre de l'étang peut s'expliquer par les conditions sous-oxygénées du milieu liées à la stratification des eaux. Les faunes plus diversifiées au Sud-Ouest par les apports d'eau salée par le canal de Caronte et la dominance de *Haynesina germanica* au Nord par les apports d'eaux douces de la centrale hydraulique et des cours d'eau.

Mots-clefs : lagune, eutrophisation, foraminifère, méditerranée, distribution spatiale

Abstract : Lagoons are subject to natural eutrophication. However, for several decades, these have become anthropized habitats that need to be studied and monitored. The Etang de Berre in the north-west of Marseille is subject to this anthropization (industries, water plant). Through 11 samples taken at the dump in January 2023, a first study of foraminiferous communities was carried out. A total of 1186 foraminifers were collected after washing the sediment and observation under binocular magnifying glass. The dominant pond species are *Ammonia spp.*, *Haynesina germanica* and *Eggerelloides scaber*. Standardized densities over 50cm³ range from approximately 5.83 individuals (PS13) to 132.5 individuals (PS31). In-depth analysis of *Ammonia spp.* identified three species: *Ammonia veneta* (T1), *Ammonia aberdoveyensis* (T2) and *Ammonia confertitesta* (T6). The two major hyaline species are common in Mediterranean lagoons. The small number of foraminifers found in the center of the pond can be explained by the sub-oxygenated conditions of the environment related to water stratification. The fauna is more diversified in the South-West by the supply of salt water by the Caronte Canal and the dominance of *Haynesina germanica* in the North by the supply of fresh water from the hydroelectric power station and the rivers.

Keywords : lagoon, eutrophication, foraminifera, Mediterranean, spatial distribution

Certificat de non-plagiat :



ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Anaïs Herbomez

Je, soussigné (e),
déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport ou mémoire.

Signature :

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Herbomez'.

Remerciement :

Tout d'abord un grand merci à Christine BARRAS de m'avoir accepté en tant que stagiaire au sein du laboratoire LPG d'Angers. Merci également à Edouard METZGER, Magali SCHWEIZER d'avoir signé ma convention de stage.

Un grand merci à Sophie SANCHEZ de m'avoir formé en lavage et en piquage durant le stage.

Une nouvelle fois merci à Christine BARRAS d'avoir été à l'écoute et pédagogue pendant toute la durée de mon stage. Merci également à elle, de m'avoir permis d'aller en mission à St-Chamas pendant 1 semaine. J'ai pu grâce à elle rencontrer Sylvain Rigaud, membre du Conseil Scientifique du Syndicat mixte du GIPREB, Alexis stagiaire en Master 2 et Louison qui est en thèse. Merci à eux de m'avoir accueilli dans leur équipe. Un grand merci à Sylvain pour toutes ses connaissances sur l'étang de Berre ainsi que notre petite virée en fin de journée à la pêche aux palourdes. Merci également à Alexis de m'avoir fourni des fonds de carte QGIS pour mon rapport. Un grand merci à Damien LEMOIGNE et Sophie QUINCHARD de nous avoir accompagné et aidé pendant la mission.

Une nouvelle fois merci à Damien LEMOIGNE de nous avoir aidé pour la taxonomie de mon étude et le changement des cellules MEB (qui a du surement être pénible pour lui).

Enfin, un grand merci à l'ensemble des stagiaires M1 avec qui j'ai cohabité pendant 2 mois en salle G002. Nos journées podcast tueurs en série et nos pauses de 15h vont me manquer. Un énorme merci à Ninon, Mathias, Elina, Océane, Enzo, Matéo et Mathis pour m'avoir aidé pour les traitements de données et soutenu pendant toute la durée de ce stage.

Sommaire

Préambule	
I. Introduction	1
II. Matériel et Méthodes	1
1. Site d'étude : Etang de Berre.....	1
2. Stratégie et méthodes d'échantillonnage	2
3. Méthodes d'analyse en laboratoire	2
A. Lavage des échantillons	3
B. Piquage et taxonomie des foraminifères	3
4. Traitement des données	3
III. Résultats.....	3
A. Densité totale des foraminifères.....	3
B. Richesse spécifique et indices de diversité	3
C. Espèces majeures	3
IV. Discussion	4
V. Conclusion.....	5
VI. Bibliographie	
VII. Sitographie	
VIII. Annexe	

Listes des figures et tableaux :

Figure 1 : Schéma d'une lagune côtière

Figure 2 : Cartographie des paramètres environnementaux au moment de la mission d'échantillonnage et de l'anthropisation de l'Etang de Berre.

Figure 3 : Histogrammes cumulés des densités des espèces majeures de foraminifères benthiques standardisées pour 50cm³.

Figure 4 : Histogrammes cumulés de la densité standardisée pour 50cm³ des différentes espèces d'Ammonia.

Tableau 1 : Richesse spécifique et indices de Shannon et d'Equitabilité

Préambule

La structure d'accueil de mon stage est le Laboratoire de Planétologie et Géosciences (LPG) qui est localisé à l'UFR sciences d'Angers. Ce laboratoire est rattaché à deux autres UFR sciences : Nantes et Le Mans et sont tous rattachés au CNRS. Plusieurs thèmes de recherches sont abordés au sein du laboratoire dont « **Systèmes Littoraux et Marins** » dans lequel s'intègre mon stage. Ce thème de recherche est lui-même divisés en trois sous thèmes : fonctionnement des écosystèmes marins actuels, paléo-océanographie et enfin **continuum Terre-mer** dans lequel s'insère mon sujet de stage.

Les échantillons traitées dans le rapport ont été prélevés par **Sylvain Rigaud Maitre de conférences à l'Université de Nîmes** et membre du Conseil Scientifique du Syndicat mixte du Groupement d'Intérêt Public pour la Réhabilitation de l'Etang de Berre (**GIPREB**). Ce syndicat mixte met en œuvre la réhabilitation du milieu aquatique de l'étang de Berre afin de retrouver un écosystème équilibré de lagune méditerranéenne profonde. L'Observatoire du GIPREB répond à plusieurs problématiques dont le contrôle des apports par les bassins versants, le contrôle de l'eutrophisation, la contamination et le niveau de réponse des biocénoses et habitats.

I. Introduction :

Les lagunes sont des étendues d'eaux côtières généralement peu profondes d'origine naturelle ou anthropique (Fritz, 1983). Ces milieux sont soumis à des variations importantes de température et de salinité car ils jouent un rôle de réceptacle en eaux de mer par les graus et en eaux douces par les bassins versant (Figure 1). Les lagunes sont des milieux riches en nutriments grâce à l'apport d'eaux douces des bassins versants. Cet apport conduit le plus souvent à l'eutrophisation du milieu (Caddy, 2000).

Au fil des années, les lagunes sont devenues des sites stratégiques pour le développement industriel et deviennent le plus souvent influencées par les activités anthropiques (Marcus, 2004). Ainsi, celles-ci modifient profondément les écosystèmes benthiques et pélagiques (Pereira et al., 2010 ; Stora & Arnoux, 1983).

L'étude de ces milieux anthropisés est devenue indispensable dans le but de maintenir et de restaurer leur biodiversité. C'est dans ce contexte qu'il a fallu développer des indicateurs de qualité biologique (Diaz et al., 2004). Certains organismes vivants sont utilisés par l'homme pour évaluer la qualité du milieu comme le phytoplancton, les macroalgues ou encore pour notre étude les foraminifères.

Les foraminifères sont des organismes unicellulaires. Leur répartition est directement liée aux variations des conditions physico-chimiques du milieu (marées, salinité, température...) (Jones, 2011 ; Schönfeld et al., 2012). Certaines espèces sont capables de survivre à des conditions anoxiques (Deldicq et al., 2021), tandis que d'autres sont capables de dénitirifier (Gomaa et al., 2021). Ainsi, les foraminifères vivants reflètent les conditions du milieu dans lequel ils vivent. La conservation de leurs coquilles dans le sédiment permet d'obtenir des archives pour connaître l'état des communautés avant l'anthropisation du milieu (Dolven & Alve, 2021 ; Francescangeli et al., 2016 ; Fouet, 2022). Les foraminifères sont des organismes de très petite taille (200-1000µm) se retrouvant ainsi en forte densité dans de petits volumes de sédiments (Scott et al., 2007). De cette façon, l'effort d'échantillonnage est relativement faible pour avoir une base de données conséquentes (Frontalini & Coccioni, 2011).

Actuellement, aucune étude connue n'a été publié sur les foraminifères de l'Etang de Berre. Cette étude consiste donc à réaliser une première étude de la distribution des communautés de foraminifères benthiques de l'Etang de Berre.

II. Matériel et Méthodes :

1. Site d'étude : Etang de Berre

L'étang de Berre est situé sur la côte Méditerranéenne Française au Nord-Ouest de Marseille. Il s'étend sur 155 km² et son volume est de 980 millions de m³. Sa profondeur peut atteindre 10m et son pH varie de 7.43 à 7.74 (Figure 2). L'étang de Berre reçoit plusieurs arrivées d'eaux douces dont notamment les fleuves de la Touloubre, l'Arc et la Durançole. Ses apports du bassin versant naturel sont complétés par ceux de la centrale électrique EDF. Les échanges avec l'eau de mer se font par le canal de la Caronte (Site officiel Berre l'Etang).

Durant la révolution industrielle, l'Etang de Berre a été impacté par une pollution chimique résultant de l'activité humaine : agriculture, urbanisation, industrie (Figure 2) (Arfi 1989, GIPREB 2012). En 1929, la première raffinerie Shell a vu le jour à Berre l'Etang. L'année suivante, l'industrie aéronautique s'est développée sur le site de Marignane au Nord-Est de l'étang. Il y a eu également l'installation de plusieurs cités ouvrières en 1931. La compagnie française de pétrole s'installa à la Mède en 1934. L'Etang de Berre devient une porte pétrolière de la France avec l'installation du Port à Lavéra en 1937. De nombreux logements ont été construit pour répondre à l'urbanisation et le tourisme en 1950. Enfin, en 1962 il y a eu la création de la première zone industrielle de France à Vitrolles (Site officiel Etang de Berre).



Figure 1 : Schéma d'une lagune côtière (source : RSL).

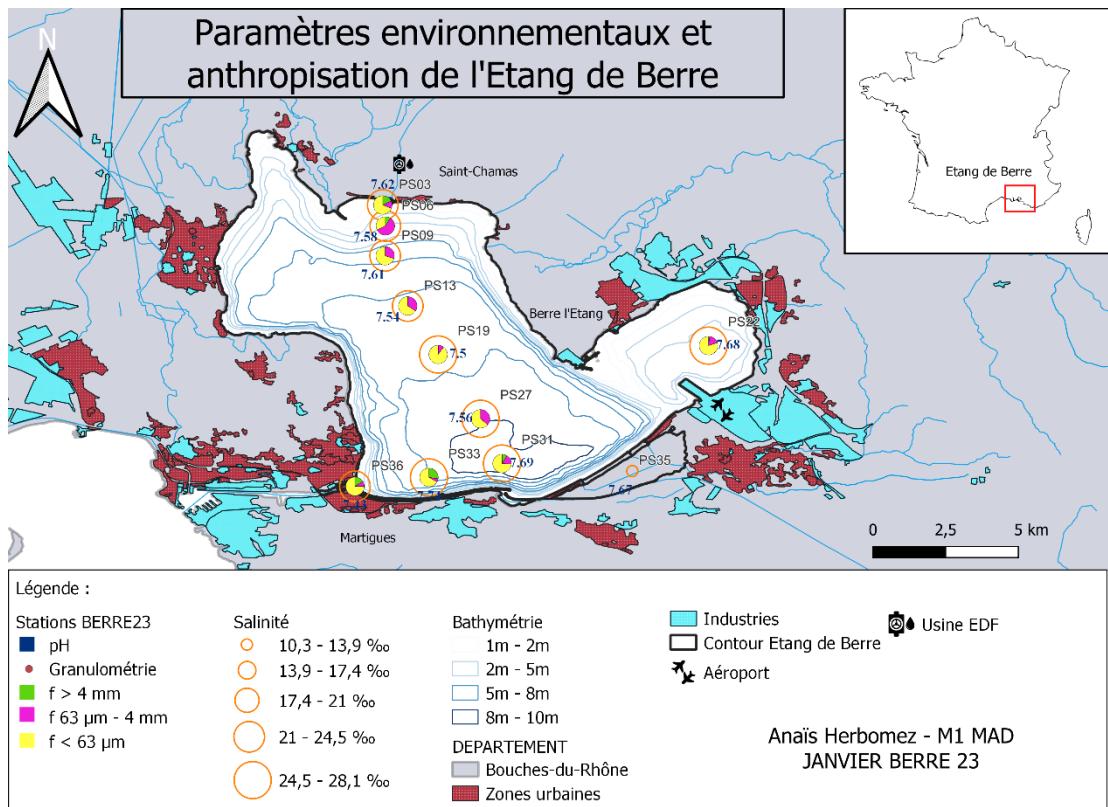


Figure 2 : Cartographie des paramètres environnementaux au moment de la mission d'échantillonnage et de l'anthropisation de l'Etang de Berre.

Depuis 1966, l'installation de la centrale hydraulique EDF à Saint Chamas a provoqué l'intensification des apports d'eau douce et de nutriments de la Durance dans l'Etang de Berre (Roux et al. 1985). En conséquence, l'étang a vu ses caractéristiques écologiques changées subissant des périodes de rejets continentaux importants (induisant une faible salinité, stratification verticale, enrichissement en éléments nutritifs) et des périodes d'afflux d'eau douce très limités (induisant une salinité croissante, déstratification et enrichissement plus faible) (Arfi 1989).

2. Stratégie et méthodes d'échantillonnage :

Le 30 janvier 2023, un transect Nord-Sud et Ouest-Est a été réalisé dans l'Etang de Berre (Figure 1). Au total, 1 réplicat de 11 stations ont été échantillonnées à l'aide d'une benne. Le premier cm de sédiment a été prélevé dans chaque benne, représentant entre 75 et 125 cm³. Chaque réplicat a été stocké dans de l'éthanol à 95%. Le 27 mars 2023, il y a eu un changement de solution pour un mélange Rose Bengal (Walton, 1852) + éthanol 96% à une concentration de 3g/l. Le Rose Bengal s'adsorber aux protéines et permettre de colorer en rose les individus vivant ou mort récemment.

3. Méthodes d'analyse en laboratoire

A. Lavages des échantillons

Chaque échantillon est lavé à l'eau du robinet à l'aide d'un laveur automatique sur des tamis de trois tailles de maillage différents pour être lavé : 500µm ; 150µm et 125µm. Les résidus de sédiment sont ensuite stockés dans de l'éthanol à 96%. Entre chaque échantillon, les tamis sont nettoyés à l'eau, puis passés sous ultrason et plongés dans le bleu de méthylène au cas où des organismes colorés au rose bengal seraient restés coincés dans le maillage. L'utilisation d'un pinceau pour dissocier les pelotes fécales a permis un lavage plus efficace des échantillons.

B. Piquage et taxonomie des foraminifères

Chaque pilulier a été analysé sous loupe binoculaire Leica WILD M3B. Seules les fractions 125-150 et 150-500µm ont été analysées pour les foraminifères. Les foraminifères vivants sont prélevés à l'aide d'un pinceau fin et mis dans des cellules micropaléontologiques propres à

chaque échantillon. Celles-ci sont accompagnées d'une feuille de suivi permettant de renseignée le nombre ainsi que les espèces retrouvées dans l'échantillon.

Les foraminifères de chaque échantillon sont regroupés morphologiquement dans une case de la cellule. Chaque individu a été plus ou moins identifié à l'aide de Christine Barras et Damien Le Moigne. Le site WORMS (marinespecies.org) ainsi que le guide de détermination de Frans J. Jorissen ont également permis l'identification de certaines espèces.

Pour faciliter l'identification des espèces du genre *Ammonia* ; l'utilisation du MEB HITACHI TM400Plus du laboratoire a été nécessaire. Les *Ammonia* ont été identifiées au selon 3 espèces sur la base de certains critères morphologiques visibles au MEB (taille des pores et élévation des sutures). De plus, certaines espèces ont été prises en photo afin d'illustrer les espèces retrouvées dans la zone d'étude (ANNEXE 6).

4. Traitement des données

Le traitement des données a été réalisé grâce au logiciel Microsoft Excel 2021, Past ainsi que Qgis 3.22.11. Pour faciliter l'identification des *Ammonia*, l'utilisation du logiciel IMAGEJ a été nécessaire pour calculer le diamètre des pores de certains *Ammonia* individus.

III. Résultats

A. Densité totale des foraminifères

Les deux fractions étudiées ont été assemblées afin de donner un résultat global (fractions 125-500µm) sur la distribution spatiale des foraminifères. Afin de traiter les données, une standardisation des échantillons sur 50cm³ a été effectué. Les données brutes non standardisées sont également en ANNEXE 1.

Parmi les 11 stations échantillonnées, aucun foraminifère n'a été trouvé dans l'échantillon PS35 (cette station ne sera donc pas représentée dans les figures suivantes). Les densités varient d'environ 5,83 individus (PS13) à 132,5 individus (PS31). Les données les plus faibles sont également en PS19 (15,24 individus), PS22 (10 individus) et PS27 (9 individus). 28,5 ; 67,14 et 94 foraminifères sont présents en stations PS6, PS9 et PS3. Les plus grandes densités de foraminifères sont localisées en station PS33 (130,59), PS36 (132,5) et PS31 (132,5). Au total, environ 619 foraminifères ont été collectés sur notre site d'étude (ANNEXE 2).

B. Richesse spécifique et indices de diversité

Tableau 1 : Richesse spécifique et indices de Shannon et d'Equitabilité

Indice	PS3	PS6	PS9	PS13	PS19	PS27	PS31	PS33	PS36	PS22
Richesse spécifique	8	10	7	4	7	5	18	18	11	8
Shannon_H	0,8477	1,354	0,5009	1,197	1,688	1,353	1,446	1,339	1,974	1,617
Equitability_J	0,4076	0,5881	0,2574	0,8637	0,8674	0,8408	0,534	0,4632	0,8234	0,7776

Au total, 34 espèces différentes ont été identifiés. En moyenne, 8 espèces différentes sont retrouvées par station. La station PS13 est le moins diversifié avec 4 espèces tandis que les stations PS36 et PS33 en ont 18.

L'indice de Shannon le plus élevé se trouve en station PS36 tandis que le plus faible est en PS9. Les stations PS13, PS19, PS27 et PS36 ont une équitabilité >0,8 et les plus basses valeurs sont retrouvées aux stations PS9 et PS3.

C. Espèces majeures

L'espèce dominante en PS3, PS6, PS9 et PS22 est *Haynesina germanica* (ANNEXE 6). Tandis qu'en station PS33 et PS31, les *Eggerelloides scaber* (ANNEXE 6) sont dominant. Les *Ammonia* sont dominantes en station PS13, PS19, PS27 et. Elle est également dominante en station PS36 avec les *Glabratella patelliformis* (Figure 3) (ANNEXE 6).

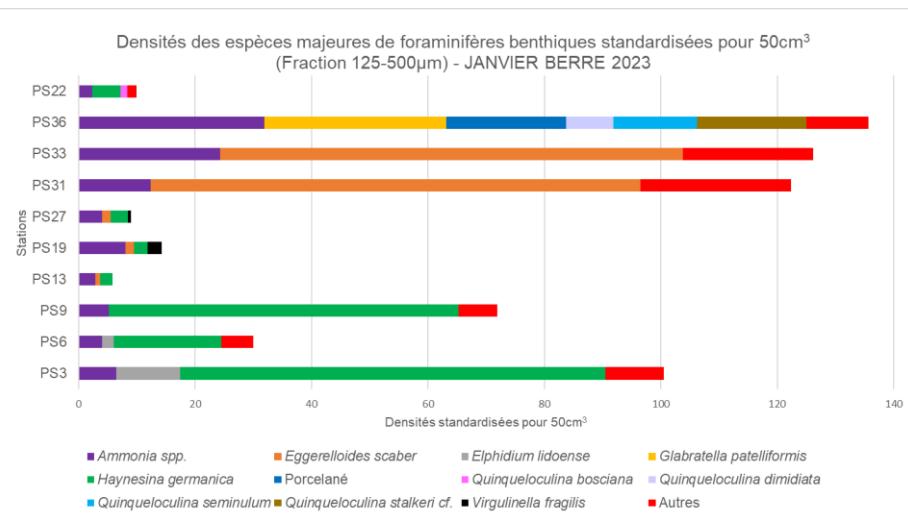


Figure 3 : Histogrammes cumulés des densités des espèces majeures de foraminifères benthiques standardisées pour 50cm³.

Les *Ammonia aberdoveyensis* (T2) sont en majorité dans les stations PS33, PS31, PS27, PS19, PS9 et PS6. Elles sont peu présentes en station PS13, PS3 et absentes en PS22.

Les *Ammonia veneta* (T1) sont dominantes en PS3, PS36 et PS22. Elles sont peu présentes en PS33, PS19, PS9, PS6 et absentes en PS13, PS27 et PS31.

Enfin, les *Ammonia confertitesta* (T6) sont seulement majoritaire en station PS13 et peu présentes sur le reste des stations (Figure 4).

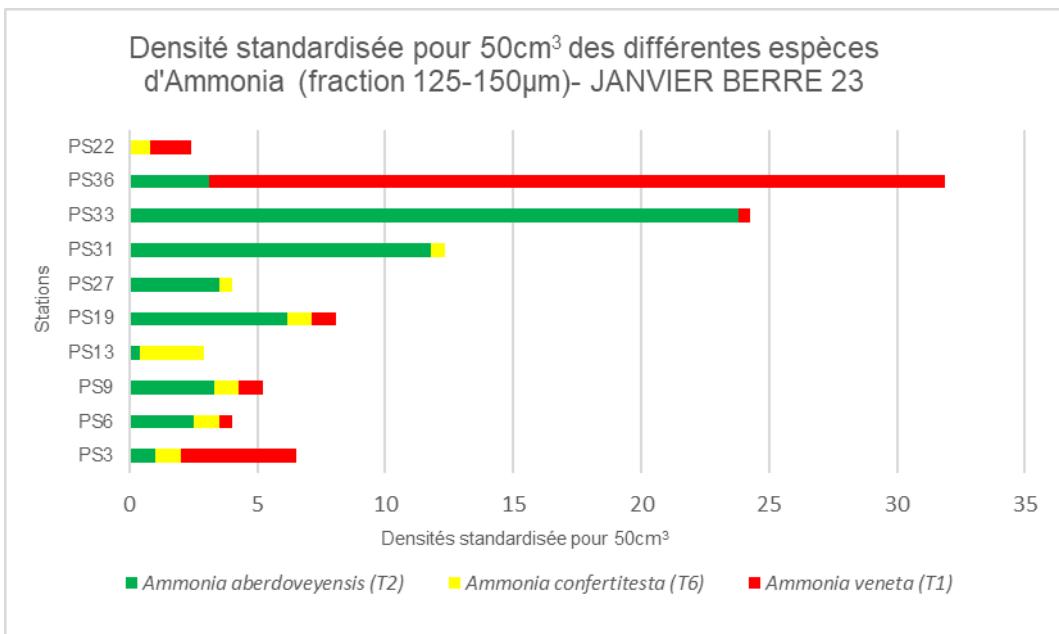


Figure 4 : Histogrammes cumulés de la densité standardisée pour 50cm³ des différentes espèces d'Ammonia.

IV. Discussion

Certaines espèces retrouvées dans l'étang de Berre ont également été observées dans d'autres lagunes de Méditerranée. La lagune de Nador au Maroc est dominée par les foraminifères hyalins. Les *Ammonia tepida* et *Haynesina germanica* sont retrouvées dans un large périmètre au sein de la lagune tout comme notre étude. Les *Bolovina variabilis* sont retrouvées en plus grande quantité à Nador que dans l'étang de Berre. Des *Glabratella* Sp ont également été retrouvé à Nador dans des stations proches de l'embouchure avec la mer Méditerranée comme dans notre étude (Guerlorget et al., 2021).

Le plus grand nombre d'individus a été collecté sur le transect Ouest-Est situé le plus proche de l'embouchure de la Caronte qui est directement relié à la mer Méditerranée. Les espèces sont très diversifiées à la station PS36, la plus proche de l'embouchure. Les zones d'échanges d'eau avec la mer pourraient avoir un lien avec la grande densité des foraminifères en stations proches de celles-ci (Lefebvre et al. 1997). Les autres stations de ce transect (PS33 et PS31) sont quant à elles dominées par *Eggerelloides scaber*. Sa forte présence peut s'expliquer par son affinité à être proche ces zones d'échanges. Cette préférence géographique est également retrouvée dans la lagune de Nador et l'étang de Prévost (Favry et al., 2021 ; Guelorget et al., 2021) (ANNEXE 3).

Les trois stations situées au Nord de l'étang (PS3, PS6 et PS9), proche de la station EDF ont également un grand nombre d'individus avec une dominance de l'espèce *Haynesina germanica*. Son abondance pourrait avoir un lien avec l'arrivée d'eau douce. En effet, cette espèce est souvent présente dans les milieux dessalés (Murray 1991). Sa location géographique est également comparable à celle des estuaires français de l'Atlantique qui est localisé le plus souvent dans les zones intermédiaires (Frans et al., 2023) (ANNEXE 4).

Pour les stations situées en plein milieu de l'étang (PS13, PS19, PS27), une très faible densité de foraminifères a été trouvée. Cela peut être expliqué par les conditions anoxiques (22%) et hypoxiques (21%) élevés de l'étang aux moments des prélèvements alentours de ces stations (ANNEXE 5). La faible densité est probablement liée à cette faible oxygénation saisonnière.

Une première approche sur la distribution des *Ammonia spp.* a été réalisée. L'espèce invasive *Ammonia confertitesta* (T6) a été retrouvé au sein de l'étang toutefois en faible proportion par rapport aux deux autres espèces. A l'avenir, il serait intéressant d'approfondir l'aire de répartition des différentes espèces d'*Ammonia* au sein de l'étang.

Nos résultats permettent donc de mettre en évidence que la distribution des foraminifères dans l'étang de Berre est influencée par plusieurs facteurs comme : la salinité, la stratification de l'eau et donc les conditions de sous-oxygénation du milieu... De plus, la station PS35 prélevée dans le Bolmon présentant une salinité de 10,3 ne contient aucun foraminifère vivant (Figure 1).

Les observations présentées sont préliminaires. En effet, la technique de prélèvement par benne n'est pas recommandée (Schönfeld et al. 2012) puisque la surface du sédiment peut être lessivée en partie lors de son ouverture. C'est pourquoi nous avons réalisé une nouvelle campagne d'échantillonnage à l'aide d'un carottier permettant de préserver l'interface eau-sédiment.

V. Conclusion

L'étude a permis une première approche de la distribution spatiale des communautés de foraminifères benthiques de l'étang de Berre. Parmi les espèces retrouvées, les *Ammonia spp.* et *Haynesina germanica* sont les espèces dominantes de la lagune qui sont les plus souvent représentées dans les lagunes méditerranéennes. La faible densité de foraminifères retrouvée au centre de la lagune pourrait être en lien avec l'eutrophisation du milieu et sa sous-oxygénation. Une nouvelle mission en mai 2023, à laquelle j'ai pu participer, a permis de collecter de nouveaux échantillons à l'aide d'un carottier d'interface à raison de 3 réplicats par station. Et d'autre part, nous avons collecté des carottes longues pour permettre de mettre en lien ou non l'arrivée de la station EDF avec l'eutrophisation du milieu. L'étude des foraminifères morts pourrait expliquer si les changements écologiques observés dans la lagune sont synchronisés avec l'installation de la centrale.

VI. Bibliographie

- Arfi R 1989. Annual cycles and budget of nutrients in Berre Lagoon (Mediterranean Sea, France). *Int Rev Gesam Hydrobiol Hydrogr* 74: 29-49.
- Caddy, J. (2000). Marine catchment basin effects versus impacts of fisheries on semi-enclosed seas. *ICES Journal of Marine Science – ICES Journal of Marine Science*, 57, 628–640. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.0739>
- Debenay, J.-P., Guillou, J.-J., Redois, F., & Geslin, E. (2000). *Distribution Trends of Foraminiferal Assemblages in Paralic Environments BT - Environmental Micropaleontology: The Application of Microfossils to Environmental Geology* (R. E. Martin (ed.); pp. 39–67). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4167-7_3
- Deldicq, N., Langlet, D., Delaeter, C., Beaugrand, G., Seuront, L., & Bouchet, V. M. P. (2021). Effects of temperature on the behaviour and metabolism of an intertidal foraminifera and consequences for benthic ecosystem functioning. *Scientific Reports*, 11(1), 4013. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83311-z>
- Diaz, R. J., Solan, M., & Valente, R. M. (2004). A review of approaches for classifying benthic habitats and evaluating habitat quality. *Journal of Environmental Management*, 73(3), 165–181. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.06.004>
- Dolven, J. K., & Alve, E. (2021). Naturally changing reference conditions: Evidence of isostatic uplift being the main cause of changes in ecological status in a SW Norwegian fjord system. *Ecological Indicators*, 131, 108162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108162>
- A. Favry, O Guelorget, J P Debenay, J P Perthuisot. DISTRIBUTION DES PEUPLEMENTS DE FORAMINIFÈRES ACTUELS DANS UNE LAGUNE MÉDITERRANÉENNE : L'ÉTANG DU PRÉVOST Distribution of présent Foraminifera in a Mediterranean ecosystem : Prévost Laguna. *Vie et Milieu / Life & Environment*, 1998, pp.41-53. <hal-03172821>
- Francescangeli, F., Armynot du Chatelet, E., Billon, G., Trentesaux, A., & Bouchet, V. M. P. (2016). Palaeo-ecological quality status based on foraminifera of Boulogne-sur-Mer harbour (Pas-de-Calais, Northeastern France) over the last 200 years. *Marine Environmental Research*, 117, 32–43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.04.002>
- Frans J. Jorissen, Marie fouet et les participants du workshop FORESTAT 2022 (2023) Foraminifères estuariens de la façade atlantique française
- Fritz, B. (1983). Le domaine paralique. Expressions géologiques, biologiques et économiques du confinement par Olivier Guelorget et Jean-Pierre Perthuisot, Ecole Normale Supérieure, Travaux du Laboratoire de Géologie, 16, 1983. *Sciences Géologiques, Bulletins et Mémoires*, 36(4), 267–268.
- Frontalini, F., & Coccioni, R. (2011). Benthic foraminifera as bioindicators of pollution: A review of Italian research over the last three decades. *Revue de Micropaléontologie*, 54(2), 115–127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.revmic.2011.03.001>
- GIPREB 2012. Restaurer l'étang de Berre – Dossier définitif du contrat d'étang (tome 1). Gipreb: 175 p.
- Gomaa, F., Utter, D. R., Powers, C., Beaudoin, D. J., Edgcomb, V. P., Filipsson, H. L., Hansel, C. M., Wankel, S. D., Zhang, Y., & Bernhard, J. M. (2021). Multiple integrated metabolic strategies allow foraminiferan protists to thrive in anoxic marine sediments. *Science Advances*, 7(22). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf1586>
- O Guelorget, A Favry, L Reynaud Louali, J.P. Perthuisot. LES PEUPLEMENTS DE FORAMINIFÈRES BENTHIQUES ACTUELS DANS L'ORGANISATION BIOGEOLOGIQUE DE LA LAGUNE DE NADOR (MAROC). *Vie et Milieu / Life & Environment*, 2000, pp.45-58. <hal-03186854>
- Jones, R. W. (2011). *Foraminifera and their applications*. Cambridge University Press.
- Lefebvre A, Guelorget O, Perthuisot JP, Dafir JE 1997.

- Evolution biogéologique de la lagune de Nador (Maroc) au cours de la période 1982-1993. *Oceanologica Acta* 20 (2) : 371-385.
- Marcus, N. (2004). An overview of the impacts of eutrophication and chemical pollutants on copepods of the coastal zone. *Zoological Studies*, 43, 211–217.
- Marie Fouet. Répartition des communautés de foraminifères dans les estuaires de la façade atlantique. Sciences de la Terre. Université d'Angers, 2022. Français. (NNT : 2022ANGE0064). (tel-04092200)
- Mcdowell, J. (1980). Impact of power-plant discharges on marine zooplankton: A review of thermal, mechanical and biocidal effects. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33, 422–432. <https://doi.org/10.1007/BF02414767>
- Murray, J.W. (1991). *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315846101>
- Pereira, P., de Pablo, H., Pacheco, M., & Vale, C. (2010). The relevance of temporal and organ specific factors on metals accumulation and biochemical effects in feral fish (*Liza aurata*) under a moderate contamination scenario. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73, 805–816. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.02.020>
- Roux RM, Nodot C, Rodier M, Stora MG, Bellan D, Liorzou B 1985. Étang de Berre : Bilan des Connaissances écologiques. Marseille : IFREMER publ: 125 p.
- Schönfeld, J., Alve, E., Geslin, E., Jorissen, F., Korsun, S., & Spezzaferri, S. (2012). The FOBIMO (FOraminiferal Blo-Monitoring) initiative—Towards a standardised protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies. *Marine Micropaleontology*, 94–95, 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2012.06.001>
- Scott, D. B., Medioli, F. S., & Schafer, C. T. (2007). *Monitoring in coastal environments using foraminifera and thecamoebian indicators*. Cambridge University Press
- Stora, G., & Arnoux, A. (1983). Effects of Large Freshwater Diversions on Benthos of a Mediterranean Lagoon. *Estuaries*, 6, 115–125. <https://doi.org/10.2307/1351702>
- Walton, W. R. Techniques for recognition of living foraminifera. Scripps Institution of Oceanography. 1952.

VII. Sitographie :

- Etangdeberre.org
- marinespecies.org

VIII. : Annexes

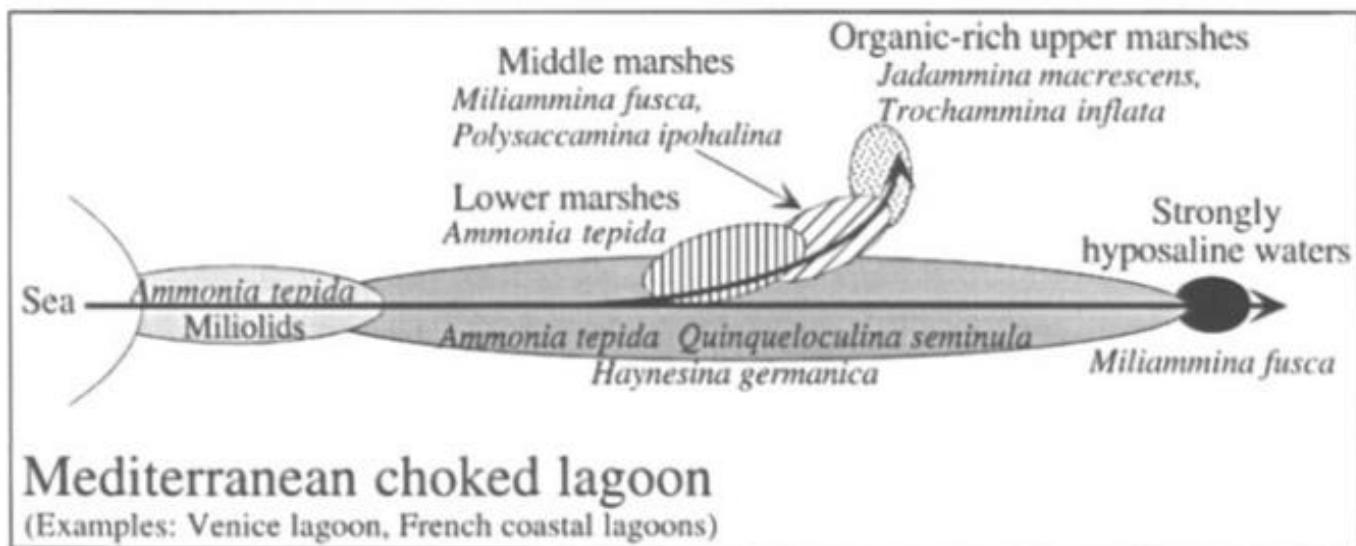
ANNEXE 1 : Tableau des densités brutes non standardisées des différentes espèces récoltées.

Espèce \ Station	PS3	PS6	PS9	PS13	PS19	PS27	PS31	PS33	PS36	PS22	PS35
<i>Adelosina longirostra</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Ammobaculites cylindricus</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Ammonia Tepida</i>	13	12	11	7	17	8	22	51	52	5	0
<i>Aubignyna perlucida</i>	0	0	1	0	0	0	15	0	0	0	0
<i>Bolivina dilatata</i>	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0
<i>Bolivina variabilis</i>	0	0	0	0	0	0	7	0	0	1	0
<i>Bucella planidorsa</i>	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0
<i>Bulimina aculeata</i>	0	0	0	0	2	0	6	3	0	0	0
<i>Bulimina marginata</i>	0	1	0	0	0	0	8	10	0	0	0
<i>Buliminella elegantissima</i>	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
<i>Eggerelloides Scaber</i>	0	3	2	2	3	3	143	167	4	1	0
<i>Elphidium advenum</i>	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
<i>Elphidium lidoense</i>	22	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Elphidium poeyanum</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Glabratella patelliformis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0
<i>Haynesina déformé</i>	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Haynesina depressula</i>	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0
<i>Haynesina germanica</i>	146	37	126	5	5	6	0	0	0	12	0
<i>Hyalin indéterminé/informe</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Lenticulina</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Miliolinella Sp</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Miliolinella Spp</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
<i>Nonionella turgida</i>	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
<i>Porcelané</i>	0	0	0	0	0	0	2	0	33	0	0
<i>Quinqueloculina aspera</i>	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
<i>Quinqueloculina bosciana</i>	0	1	0	0	0	0	0	9	0	3	0
<i>Quinqueloculina dimidiata</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	13	0
<i>Quinqueloculina jugosa</i>	4	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0
<i>Quinqueloculina seminulum</i>	0	1	0	0	0	0	0	1	23	0	0
<i>Quinqueloculina Sp</i>	0	2	0	0	0	0	5	3	1	0	0
<i>Quinqueloculina stalker cf.</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0
<i>Virgulinella fragilis</i>	0	0	1	0	5	1	0	0	0	0	0
Total	188	60	141	14	32	18	223	259	213	24	0

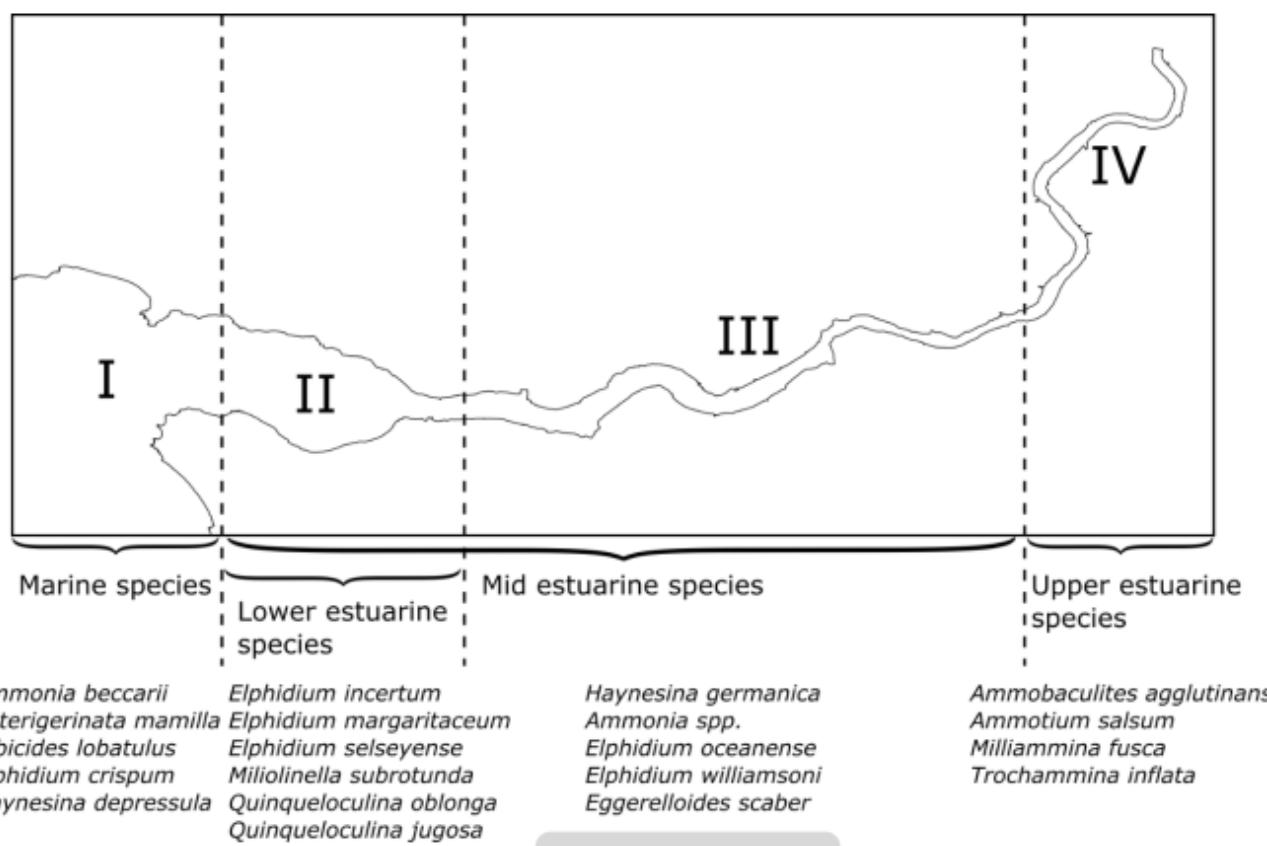
ANNEXE 2 : Tableau des densités standardisées brutes des différentes espèces récoltées

Espèce \ Station Standardisé 50cm3	PS3	PS6	PS9	PS13	PS19	PS27	PS31	PS33	PS36	PS22
<i>Adelosina longirostra</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00
<i>Ammobaculites cylindricus</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00
<i>Ammonia Tepida</i>	6,50	6,00	5,24	2,92	8,10	4,00	12,94	24,29	32,50	2,00
<i>Aubignyna perlucida</i>	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00	8,82	0,00	0,00	0,00
<i>Bolivina dilatata</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,38	0,00	0,00
<i>Bolivina variabilis</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,12	0,00	0,00	0,40
<i>Bucella planidorsa</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,53	0,00	0,00	0,00
<i>Bulimina aculeata</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,95	0,00	3,53	1,43	0,00	0,00
<i>Bulimina marginata</i>	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	4,71	4,76	0,00	0,00
<i>Buliminella elegantissima</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,18	0,00	0,00	0,00
<i>Eggerelloides Scaber</i>	0,00	1,50	0,95	0,83	1,43	1,50	84,12	79,52	2,50	0,40
<i>Elphidium advenum</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59	0,48	0,00	0,00
<i>Elphidium lidoense</i>	11,00	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40
<i>Elphidium poeyanum</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59	0,00	0,00
<i>Glabratella patelliformis</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,25	0,00
<i>Haynesina déformé</i>	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Haynesina depressula</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,35	0,48	0,00
<i>Haynesina germanica</i>	73,00	18,50	60,00	2,08	2,38	3,00	0,00	0,00	0,00	4,80
<i>Hyalin indéterminé/informe</i>	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Lenticulina</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00
<i>Miliolinella Sp</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00
<i>Miliolinella Spp</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,88	0,00
<i>Nonionella turgida</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,95	0,00	0,00
<i>Porcelané</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,18	0,00	20,63
<i>Quinqueloculina aspera</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,95	0,00	0,00
<i>Quinqueloculina bosciana</i>	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,29	0,00	1,20
<i>Quinqueloculina dimidiata</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59	0,00	8,13	0,00
<i>Quinqueloculina jugosa</i>	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	0,40
<i>Quinqueloculina seminulum</i>	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	14,38	0,00
<i>Quinqueloculina Sp</i>	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,94	1,43	0,63
<i>Quinqueloculina stalker cf.</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,75	0,00
<i>Virgulinella fragilis</i>	0,00	0,00	0,48	0,00	2,38	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	94,00	30,00	67,14	5,83	15,24	9,00	131,18	123,33	133,13	9,60

ANNEXE 3 : Schéma exemple de la distribution des foraminifères benthiques dans les lagunes de Méditerranée (Debeney 2000).



ANNEXE 4 : Schéma généralisé de la répartition des espèces dominantes de foraminifères le long du gradient amont-aval des estuaires de la façade atlantique française (Fouet 2022).



ANNEXE 5 : Localisation et suivi journalier des conditions d'oxygénation de 3 stations (PO, PI, PA) de l'étang de Berre entre 2015 et 2020 (Pers. Comm. Sylvain Rigaud)

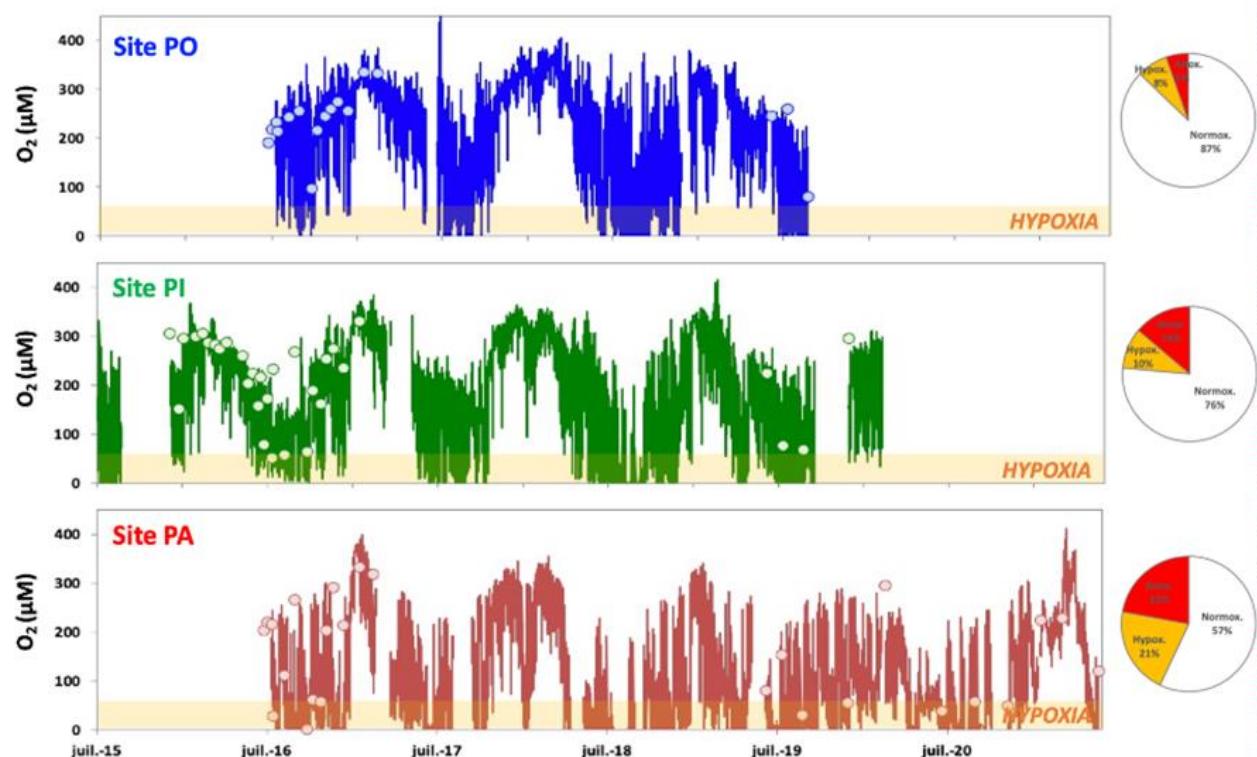
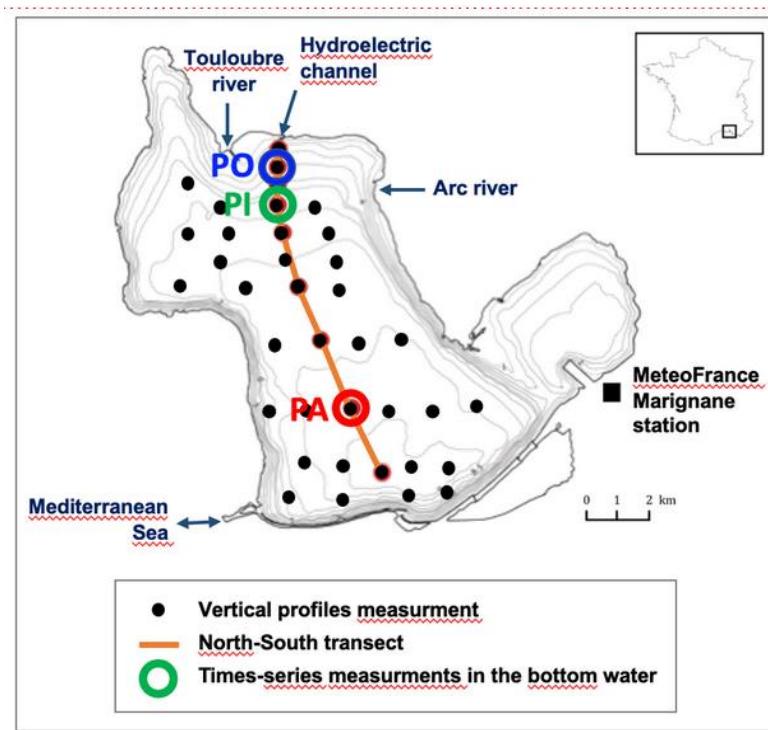
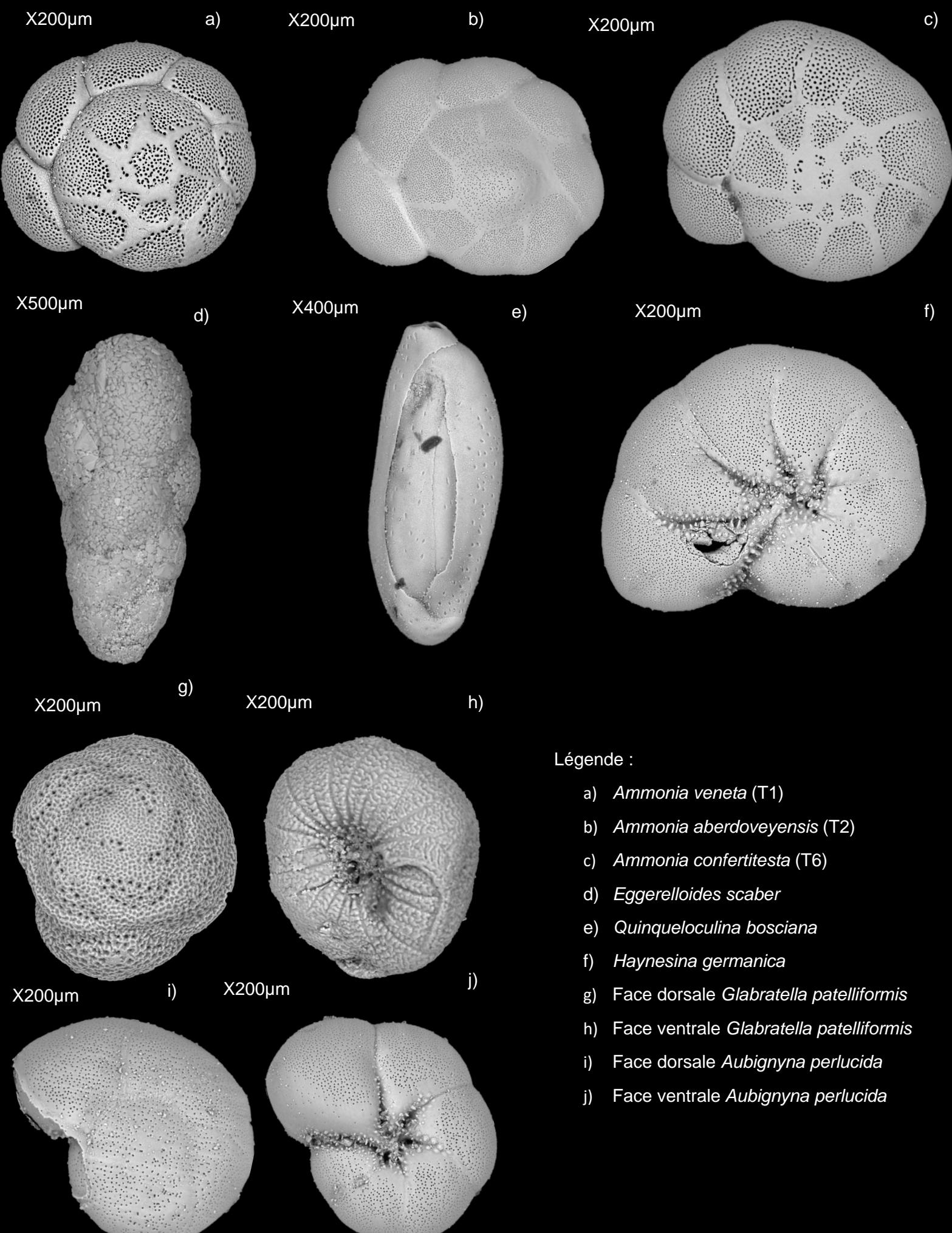


Figure 5: High temporal resolution of dissolved oxygen concentrations in the bottom water measured in sites PO, PI and PA with the corresponding of hypoxic (<63 μ M) and anoxic (<1 μ M) occurrence. Ponctual measurement of dissolved oxygen from vertical profiles are also reported when available. The shaded area correspond to hypoxic (<63 μ M) conditions.

ANNEXE 6 : Planche d'exemples de foraminifères identifiées durant le stage



Légende :

- a) *Ammonia veneta* (T1)
- b) *Ammonia aberdoveyensis* (T2)
- c) *Ammonia confertitesta* (T6)
- d) *Eggerelloides scaber*
- e) *Quinqueloculina bosciana*
- f) *Haynesina germanica*
- g) Face dorsale *Glabratella patelliformis*
- h) Face ventrale *Glabratella patelliformis*
- i) Face dorsale *Aubignyna perlucida*
- j) Face ventrale *Aubignyna perlucida*