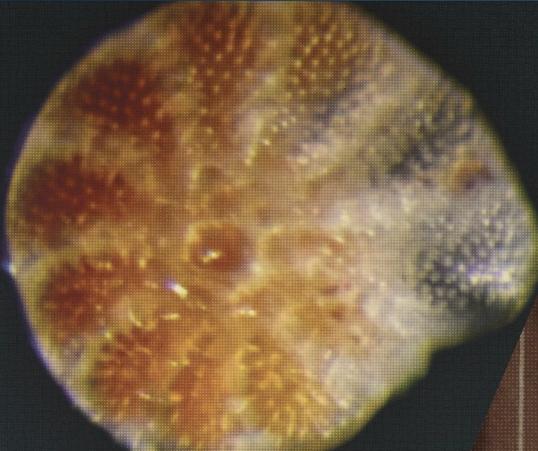




Les Rencontres d'Orbigny

LES FORAMINIFÈRES

ESPÈCES VIVANTES, ESPÈCES FOSSILES,
INDICATEURS ÉCOLOGIQUES



du 1 au 4 OCTOBRE 2025

Bibliothèque scientifique du Muséum
- Fête de la Science -

Société des Sciences Naturelles



SOMMAIRE

INTRODUCTION PATRIMONIALE DES RENCONTRES

- Dessins de jeunesse *Archives 256*
Société des Sciences naturelles de la Charente-Maritime 4
- Modèles en plâtre
Collection Muséum La Rochelle 6

BIOLOGIE DES FORAMINIFÈRES

- Quelques traits d'histoire sur la vie des foraminifères
par Mickaël Airaud 8
- Où et comment vivent les foraminifères ?
par Maria Pia Nardelli 10
- Les tests : formes et composition, de la taxonomie classique
aux analyses phylogénétiques
par Magali Schweizer 14

MICROPALÉONTOLOGIE

- Comment la composition de la coquille aide en micropaléontologie ?
par Christine Barras & Inge Van Dijk 18

GÉOLOGIE ET FORAMINIFÈRES

- Foraminifères, microfossiles bâtisseurs
par Jean-Paul Saint-Martin 21
- La biostratigraphie
par Erica Bicchi 22

FORAMINIFÈRES : INDICATEURS ÉCOLOGIQUES

- Les foraminifères au service des études sur le climat
par Meryem Mojtahid 27
- Les foraminifères, sentinelles de l'état de santé des milieux marins
par Christine Barras & Emmanuelle Geslin 30

SCIENCE ET ART

- Fossiles en beauté
par Simona & Jean-Paul Saint-Martin 31

Les articles sont écrits et les documents reproduits sous la seule responsabilité des auteurs.

Crédits photographiques page de couverture :

- image de gauche : Elphidium oceanense ©julia courtial Univ Angers

- image de droite : modèles en plâtre collection Muséum La Rochelle

Directeur de publication : Martine Gachignard

Conception : Olivier Chérin

Les Rencontres d'Orbigny

- 3^{ème} édition -

Les Rencontres d'Orbigny ont un double objectif, la mise en valeur d'une page d'histoire des Sciences et le partage de connaissances sur un thème d'actualité. La manifestation est organisée par la Société des Sciences naturelles de la Charente-Maritime, accueillie par le Muséum. Les journées d'études se déroulent du 1^{er} au 4 octobre 2025.

Une troisième édition sur le thème des foraminifères, un choix guidé par le souhait de faire connaître les archives de l'association et du Muséum avec les dessins de foraminifères, œuvre de jeunesse d'Alcide d'Orbigny ainsi que les modèles en plâtre, des documents présentés dans un parcours muséal.

Les foraminifères sont des microorganismes unicellulaires marins. Avec l'essor de la microscopie au XVIII^e siècle, Alcide d'Orbigny (1802- 1857), dans la première moitié du XIX^e siècle, étudie ces êtres vivants. Considérés comme des céphalopodes depuis J.B. Lamarck, il les baptise foraminifères (organismes porteurs de trous) et élabore les premières classifications.

Alcide d'Orbigny est considéré comme le père de la micropaléontologie. Une science en pleine évolution en lien avec les nouvelles technologies.

Ses premiers dessins font partie de l'Iconographie d'Orbigny réalisée par son père Charles-Marie Dessalines d'Orbigny entre 1830 et 1850. L'essentiel de ses collections, sables et modèles, est conservé au Muséum national d'Histoire naturelle de Paris.

Les foraminifères : espèces vivantes, espèces fossiles, indicateurs écologiques

Les sujets d'études présentés vont de leur biodiversité à la place des foraminifères dans les écosystèmes et la géologie. Les sujets d'actualités développent leur rôle dans les reconstitutions paléoclimatiques et paléoocéanographiques.

En conclusion de la manifestation, le choix est fait d'une présentation, tout public, orientée sur leur aspect esthétique avec une animation Science et Art.

Cette manifestation offre diverses activités selon l'âge des participants : deux animations scolaires, un atelier artistique pour étudiants, des communications scientifiques, un atelier-conférence. Elles sont ouvertes à toute personne, universitaires, chercheurs, amateurs « éclairés » ou néophytes, l'entrée est gratuite.

Élise PATOLE-EDOUMBA

Conservateur du patrimoine,
Directrice du Muséum d'Histoire naturelle

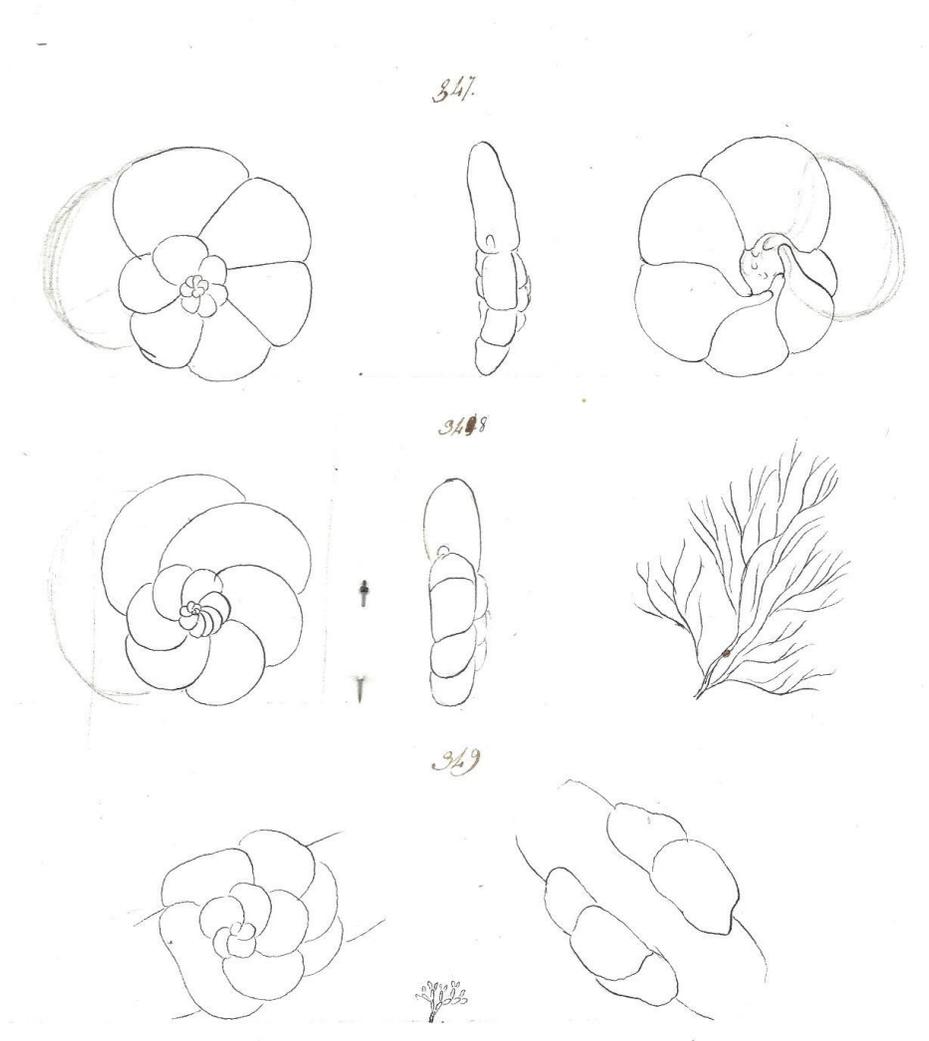
Martine GACHIGNARD

Présidente de la Société des Sciences naturelles
de la Charente-Maritime

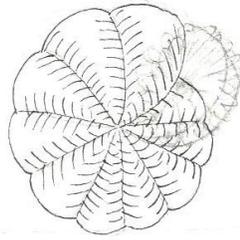
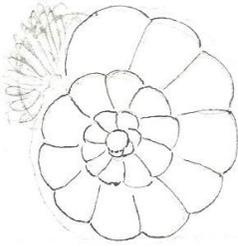
INTRODUCTION PATRIMONIALE DES RENCONTRES

DESSINS DE JEUNESSE

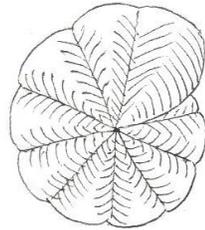
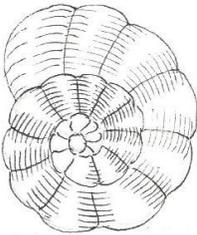
Archives 256 SSNCM (Société des Sciences naturelles de la Charente-Maritime)



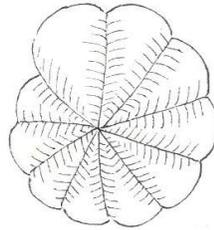
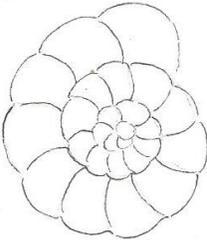
42.



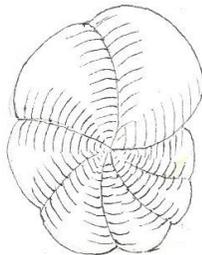
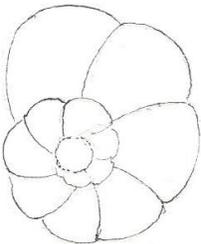
43.



44.



45.



at. 2 80 - 21



Foraminifères dans les flacons - récolte d'Orbigny -



Modèles en plâtre



Modèles en plâtre

BIOLOGIE DES FORAMINIFÈRES

QUELQUES TRAIT D'HISTOIRE SUR LA VIE DES FORAMINIFÈRES

par Mickaël Airaud, PRAG Biologie/écologie La Rochelle Université

Les foraminifères sont des eucaryotes unicellulaires qui occupent une place singulière dans l'histoire des sciences naturelles. Déjà dans l'Antiquité, Aristote et Plin l'ancien décrivaient de petites « coquilles » présentes dans les sables, interprétées comme des curiosités minérales. Avec l'invention du microscope, Robert Hooke observe au XVII^e siècle leurs formes délicates, sans toutefois les reconnaître comme des êtres vivants. C'est au début du XIX^e siècle que d'Orbigny introduit le terme « foraminifère », en référence aux petits pores (*foramina*) reliant les chambres successives de leur enveloppe, et propose une première classification morphologique fondée sur l'agencement de ces loges. Les grandes expéditions océanographiques du XIX^e siècle, comme celle du *Challenger*, révèlent ensuite leur extraordinaire diversité et leur rôle dans la composition des sédiments marins. Au XX^e siècle, la micropaléontologie en fait des outils incontournables pour dater les strates géologiques et reconstituer les climats anciens. Enfin, depuis les années 1990, la phylogénétique moléculaire a profondément modifié leur classification : loin de simples « coquillages microscopiques », ils sont désormais intégrés au super-groupe des Rhizaria, aux côtés des radiolaires et des cercozoaires.

Biologiquement, les foraminifères se présentent comme des cellules eucaryotes parfois minuscules, parfois géantes (certains atteignent plus d'un centimètre), organisées en deux zones cytoplasmiques distinctes : un endoplasme interne granuleux, siège du noyau et des organites, et un ectoplasme clair d'où émergent de fins pseudopodes ramifiés, les réticulopodes. Ces extensions dynamiques assurent la locomotion, la capture de proies et l'assemblage de particules externes. La reproduction combine phases sexuées et asexuées, alternant souvent des générations haploïdes et diploïdes, ce qui favorise leur capacité d'adaptation. Certaines espèces synchronisent même leur cycle avec les rythmes lunaires ou la photopériode, témoignant d'une sensibilité marquée aux variations environnementales.

Leur trait le plus spectaculaire reste la production du test, enveloppe protectrice dont la diversité structurelle est à l'origine de leur succès évolutif et de leur intérêt pour les géosciences. Certains tests sont simplement organiques, d'autres sont constitués de grains agglutinés puis cimentés, mais la majorité est formée de carbonate de calcium. La morphologie est d'une variété saisissante : uniloculaire, spiralee, bisériée, planispirale ou trochospirale, avec des parois imperforées, hyalines ou finement perforées. La construction du test illustre une biominéralisation sophistiquée : la cellule sécrète une membrane externe, crée un microenvironnement saturé en ions calcium et carbonate, et contrôle finement la précipitation de calcite grâce à des matrices organiques riches en glycoprotéines et polysaccharides. Chez les formes agglutinantes, les pseudopodes sélectionnent activement les particules du sédiment avant de les coller par sécrétion de mucus ou de calcite secondaire. Ce contrôle cellulaire précis explique la robustesse et la variété des formes fossilisées.

Sur le plan écologique, les foraminifères sont omniprésents dans les océans. Les formes benthiques vivent à la surface ou dans les premiers millimètres de sédiment, certaines hébergeant des algues symbiotiques qui leur apportent des produits photosynthétiques, ce qui favorise le gigantisme dans les eaux claires tropicales. D'autres colonisent les fonds profonds,

parfois pauvres en oxygène, où elles exploitent des bactéries symbiotiques ou des métabolismes alternatifs. Les formes planctoniques, apparues plus tardivement au Jurassique, flottent dans la colonne d'eau et constituent un élément majeur du zooplancton, leurs tests délicats participant au flux biologique de carbone vers les profondeurs. Leur répartition géographique et leur abondance sont sensibles aux paramètres physico-chimiques de l'eau, ce qui en fait d'excellents indicateurs de l'état des environnements marins.

Le rôle biogéochimique des foraminifères est considérable : leurs tests morts s'accumulent massivement sur le fond océanique, formant des dépôts calcaires qui se transforment à long terme en roches sédimentaires, de la craie aux calcaires nummulitiques. Ainsi, ces organismes microscopiques ont façonné une part significative de la lithosphère. De plus, leur sensibilité écologique en fait des bio-indicateurs de premier ordre, utilisés pour évaluer l'impact des pollutions, des variations de l'oxygénation des eaux ou encore des changements climatiques. Dans les sciences de la Terre, ils sont devenus des marqueurs stratigraphiques et paléo-océanographiques de référence, permettant de retracer avec une grande précision l'histoire climatique et environnementale de la planète.

De simples coquilles curieuses observées par les Anciens à des organismes modèles de la biologie et de la paléoclimatologie moderne, les foraminifères incarnent un exemple rare de convergence entre biologie cellulaire, écologie et géosciences. Ils illustrent la capacité d'une cellule unique à construire des architectures complexes, à interagir avec son environnement et à laisser une empreinte durable dans l'histoire de la Terre.



OÙ ET COMMENT VIVENT LES FORAMINIFÈRES ?

Par Maria Pia Nardelli (*Maîtresse de Conférences*) Univ Angers, Nantes Université, Le Mans Université, CNRS, Laboratoire de Planétologie et Géosciences, LPG UMR 6112, 49000 Angers, France

Les foraminifères, constitués d'une unique cellule eucaryote aux multiples capacités, vivent dans tous les domaines marins et saumâtres (mélange d'eau douce et salée), à toutes les latitudes. Certaines études basées sur des méthodes génétiques ont détecté leur présence même dans les sols terrestres (e.g. Lejzerowicz et al., 2026) et dans les eaux douces (Holzmann et al., 2021), et cela a été confirmé par des identifications morphologiques (Siemensma et al. 2017, 2021).

Dans les environnements marins, les foraminifères ont principalement deux modes de vie, planctonique, c'est-à-dire en flottaison dans la colonne d'eau, ou benthique, au fond des océans.

Les foraminifères planctoniques ont des formes souvent globulaires, avec un développement concentrique ou en spirale de la coquille. Ceci, associé parfois à la présence d'épines, leur garantit une bonne flottabilité. A l'intérieur de la cellule des vacuoles et des lipides ont aussi une fonction de support et régulation de la flottaison.

Pendant longtemps on a cru que le plancton marin vivait exclusivement dans la zone photique, où la pénétration de la lumière favorise la productivité primaire du phytoplancton, dont le zooplancton se nourrit. Des études à plus haute résolution spatiale et temporelle, effectuées en utilisant des filets à plancton verticaux déployés à différentes profondeurs d'eau, ont révélé que les espèces ne sont pas réparties dans les mêmes zones. Si une plus grande diversité est généralement observée dans les eaux plus superficielles (premiers 30-50 m, appelées niveaux de mélange superficiel) certaines vivent préférentiellement à des plus grandes profondeurs, dans la zone de transition entre les eaux chaudes de surface et les eaux froides profondes (thermocline) ou même en dessous de cette profondeur. Cependant, aux hautes latitudes, où la thermocline n'existe généralement pas, des espèces planctoniques préférant des habitats sub-superficiels existent aussi (Meilland et al. 2019) et témoignent probablement d'un choix dicté par la compétition interspécifique. Une variation des profondeurs préférentielles de vie au sein d'une même espèce planctonique a aussi observée et serait liée aux différents stades dans le cycle de vie. Les foraminifères auraient en effet tendance à remonter vers la partie haute de la colonne d'eau, où la nourriture est souvent plus abondante, pendant les phases de reproduction.

Les foraminifères **planctoniques** se nourrissent principalement de phytoplancton mais aussi de bactéries, de petites particules organiques et parfois de protistes.

Certaines espèces hébergent dans la cellule ou près de leur coquille (sur les épines par exemple) des algues symbiotiques qui influencent plus ou moins directement le style de vie des foraminifères. Ces espèces se doivent de vivre dans la zone photique pour que les symbiotes puissent effectuer la photosynthèse et montrent parfois des cycles migratoires verticaux pendant la journée. D'autre part les composantes organiques produites par les symbiotes fournissent de la nourriture à l'hôte et l'activité photosynthétique contribue à la création de bonnes conditions chimiques pour la précipitation de la calcite, qui constitue la coquille des foraminifères.

Selon les latitudes et les types d'environnement, les foraminifères **benthiques** occupent une énorme variété de micro-habitats dans les fonds marins. Parfois on peut en trouver au-dessus du fond, accrochés à des plantes marines ou aux algues ou encore aux récifs coralliens. On appelle ce mode de vie épi-benthique. La plupart du temps, néanmoins, les foraminifères benthiques vivent dans les sédiments mous, comme de la vase ou du sable, à différentes profondeurs. On appelle ce mode de vie endo-benthique. La distribution verticale des foraminifères dans le sédiment est influencée par des facteurs d'origine biologique (par exemple la bioturbation ou la compétition entre les espèces) et environnementale. En 1995, Jorissen et coauteurs, proposaient un modèle

pour expliquer la distribution verticale des microhabitats des foraminifères en fonction de la disponibilité en nourriture et en oxygène (Trox-model). Quand la nourriture est limitée et qu'il n'y a pas ou peu d'influence d'autres facteurs, les assemblages de foraminifères sont généralement concentrées dans le sédiment de surface (premiers millimètres) et diminuent de façon exponentielle dans les sédiments plus profonds. De façon similaire, quand l'environnement est riche en nourriture et/ou pauvre en oxygène, les assemblages sont limitées à la surface et souvent représentées par un nombre limité d'espèces qui tolèrent bien la faible oxygénation. Dans des conditions intermédiaires et non limitantes d'oxygénation et de nourriture, les espèces ont tendance à mieux se distribuer à différentes profondeurs, en limitant ainsi la compétition inter-spécifique.

Si l'oxygène et la nourriture sont, en règle générale, assez importants pour définir la distribution verticale des foraminifères dans le sédiment, d'autres paramètres jouent sur la sélection des niches écologiques préférentielles des différentes espèces.

En général en passant d'environnements franchement marins à des environnements de transition mer-continent, tels que les estuaires, les vasières intertidales ou les lagunes, la biodiversité des foraminifères diminue. Ceci semble lié à l'instabilité environnementale typique de ces environnements, incluant des fortes variations de salinité, température, niveau de marée, irradiation solaire etc. Seul un petit nombre d'espèces sont capables de s'adapter, voire de profiter, de ces conditions difficiles pour coloniser ces environnements. Leur coexistence dans ces environnements est souvent basée sur des stratégies de vie différentes, qui déterminent aussi des biozonations assez nettes. Si on prend le cas des estuaires avec un fort marnage, la distribution des espèces suit un gradient latitudinal, du schorre (zone de la berge qui n'est recouverte par l'eau que lors des vives eaux) vers le milieu du lit (chenal, toujours recouvert par l'eau), en passant par la slikke (vasière le long des berges qui est recouverte à chaque marée haute). Les espèces caractéristiques des trois biozones sont différentes (fig. 1a) et montrent des adaptations alimentaires ou physiologiques, qui représentent un avantage dans leur habitat.

De façon similaire, en descendant de la partie plus en amont vers l'aval de l'estuaire, l'augmentation de l'influence marine s'observe en termes de biodiversité (fig. 1b).

Les habitats sont strictement liés au mode de vie des différentes espèces. Les espèces qui vivent dans des environnements très dynamiques ont normalement des stratégies de vie opportunistes, par exemple un régime alimentaire plus diversifié (par exemple *Ammonia confertitesta* est à la fois consommateur primaire, secondaire et dépositivore), des adaptations physiologiques (dormance, kleptoplastie*, respiration de nitrates, ...), ou simplement une plus haute tolérance aux changements environnementaux.

Les méthodes analytiques actuelles nous permettent à ce jour d'étudier de plus en plus en détail les microhabitats des foraminifères. Des méthodes d'analyse d'images obtenues par rayons X sur des carottes enrésinées par exemple, nous permettent aujourd'hui d'observer et quantifier les foraminifères sans devoir les extraire de leur environnement et à une résolution spatiale de l'ordre de 10 micromètres (fig. 2). Ce genre d'approche nous permet d'avoir des informations concernant par exemple le lien entre la position de vie et la présence de terriers, l'orientation des foraminifères par rapport à la surface du sédiment ou aux éventuelles proies, la distribution 3D des individus (si agrégée ou pas), ainsi que leur réel environnement de vie (Jesus et al. 2023, Nardelli, Vanderesse et al. 2024), car d'un point de vue géochimique les variations spatiales peuvent se produire à l'échelle submillimétrique.

De plus, les études en laboratoire (cultures expérimentales) ainsi que les observations sur la composition chimique, le fonctionnement physiologique et la structure de la cellule, contribuent

* *Kleptoplastie* : phénomène symbiotique dans lequel les chloroplastes des algues sont acquis par des organismes consommateurs.

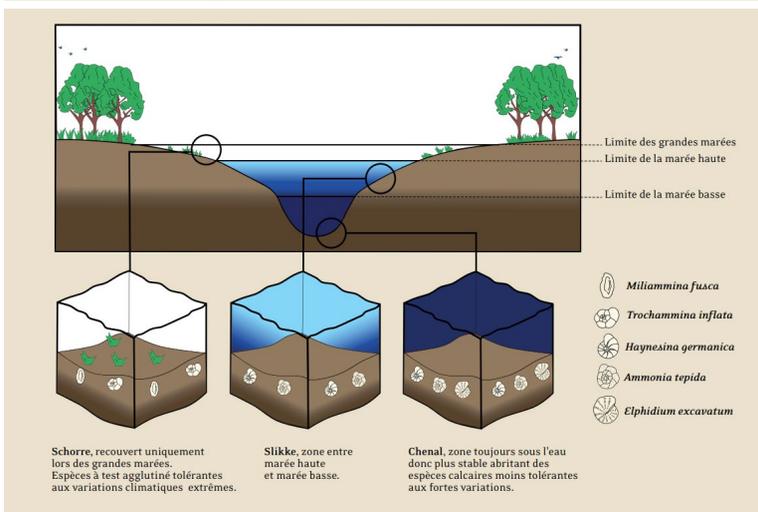
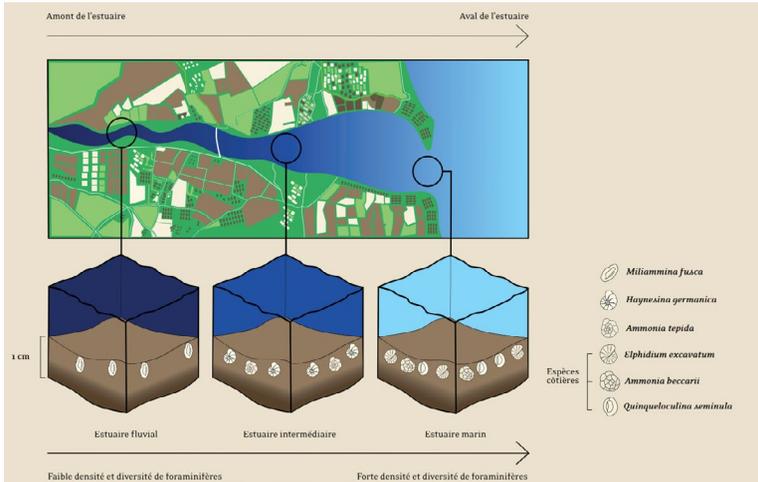


Fig. 1 : Biozones des foraminifères dans les estuaires : a) biozonation sur l'axe latitudinal, b) biozonation sur l'axe longitudinal.

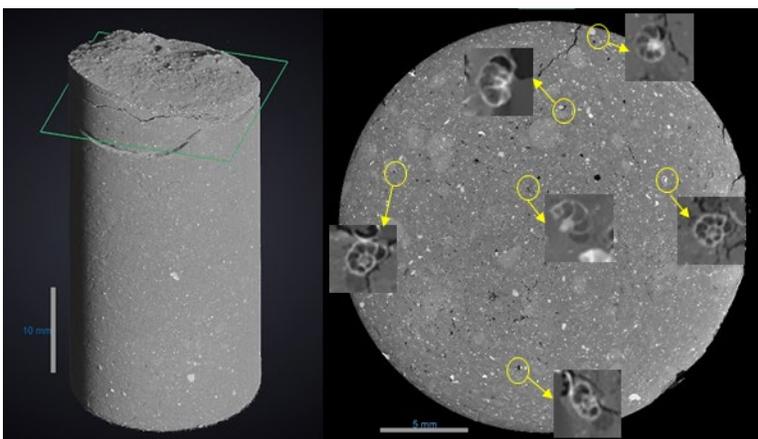


Fig. 2 exemple d'observation de foraminifères dans leur habitat (μ CT-scan d'une carotte sédimentaire enrésinée. Modifié d'après Nardelli, Vanderesse et al., 2024).

de façon grandissante à la connaissance biologique et écologique de ces organismes. A titre d'exemple, la composition isotopique des cellules permet de savoir quelles sont les préférences alimentaires de chaque espèce et connaître la position de chacune dans un réseau trophique. Des observations structurales au TEM couplées à des profilages d'oxygène ont permis de constater que certaines espèces sont capables d'utiliser les chloroplastes des diatomées dont elles se nourrissent pour faire la photosynthèse (= kleptoplastie). D'autres espèces sont capables de vivre en absence d'oxygène en respirant d'autres composants chimiques tels que le nitrates.

La biologie des foraminifères est une science récente, ces organismes ayant été pendant deux siècles surtout matière d'étude pour les géologues. Cependant, la rapide évolution des techniques d'observation nous permettra sûrement dans les prochaines années de découvrir encore de nombreuses informations qui sont cruciales pour une compréhension complète du monde des foraminifères et pour une interprétation plus robuste des informations concernant les environnements actuels et passés.

Bibliographie citée :

Holzmann, M., Gooday, A., Siemensma, F., Pawlowski, J. (2021) Review: Freshwater and Soil Foraminifera – A Story of Long-Forgotten Relatives. *Journal of Foraminiferal Research*, 51 (4): 318–331.

Jesus, B., Jauffrais, T., Trampe, E., Méléder, V., Ribeiro, L., Bernhard, J.M. et al. (2023). Microscale imaging sheds light on species-specific strategies for photo-regulation and photo-acclimation of microphytobenthic diatoms. *Environmental Microbiology*, 25(12), 3087–3103.

Jorissen, F., De Stigter, H., Widmark, J. (1995). A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. *Marine Micropaleontology*, 26, 3-15.

Leizerowicz, F., Pawlowski, J., Fraissinet-Tachet, L., Marmeisse, R. (2010). Molecular evidence for widespread occurrence of Foraminifera in soils. *Environmental Microbiology*, 12(9), 2518–2526

Nardelli, M.P., Vanderesse, N., Moller M., Guilhermic, C., Mouret A. (2024). High resolution 3D images of sediment cores as powerful tool for exploring foraminiferal microhabitats. *Marine Micropaleontology*, 19, 102394

Siemensma, F., Apothéoz-Perret-Gentil, L., Holzmann, M., Clauss, S., Völcker, E., Pawlowski, J. (2017). Taxonomic revision of freshwater foraminifera with the description of two new agglutinated species and genera. *European Journal of Protistology*, 60, 28-44.

Siemensma, F., Holzmann, M., Apothéoz-Perret-Gentil, L., Clauß, S., Voelcker, E., Bettighofer, W., Pawlowski, J. (2021). Broad sampling of monothalamids (Rhizaria, Foraminifera) gives further insight into diversity of non-marine Foraminifera. *European journal of protistology*, 77, 125744.



LES TESTS: FORMES ET COMPOSITION, DE LA TAXONOMIE CLASSIQUE AUX ANALYSES PHYLOGÉNÉTIQUES

Par Magali Schweizer (Maîtresse de Conférences) Univ Angers, Nantes Université, Le Mans Université, CNRS, Laboratoire de Planétologie et Géosciences, LPG UMR 6112, 49000 Angers, France

Nous allons tout d'abord nous arrêter sur la définition de deux termes qui seront utilisés par la suite : la taxonomie et la phylogénie.

La taxonomie est la science des lois de la classification d'après le Larousse. Elle permet de nommer les espèces et de les hiérarchiser de l'espèce au domaine en passant par le genre, la famille, l'ordre, la classe, le phylum ou embranchement et le règne. Par exemple, l'être humain appartient à l'espèce *Homo sapiens*, au genre *Homo*, à la famille des Hominidae, à l'ordre des Primates (Primates en latin), à la classe des Mammifères (Mammalia), à l'embranchement ou phylum des Chordés (Chordata), au règne animal (Animalia) et au domaine des Eucaryotes (Eukaryota).

La phylogénie est l'étude des liens de parenté (relations phylogénétiques) entre les organismes vivants et/ou fossiles d'après Wikipédia. Elle permet de reconstituer l'évolution des êtres vivants grâce à des arbres phylogénétiques. La phylogénie se base surtout sur des critères morphologiques ou moléculaires (séquences de protéine ou d'ADN), avec parfois une combinaison des deux.

Les foraminifères ou forams sont un embranchement d'eucaryotes unicellulaires (une seule cellule) appartenant au super-groupe des Rhizaires (Rhizaria) dans le clade TSAR (Telonemia-Stramenopila-Alveolata-Rhizaria) au niveau phylogénétique. La classification des foraminifères à l'intérieur de leur phylum est principalement basée sur la composition et la morphologie de leur coquille (en dur) ou thèque (organique) qui est appelée test, comme pour les oursins. Ils ont une grande diversité de composition du test, dont les principaux types sont hyalin (rotaliides), porcelané (miliolides), agglutiné (textulariides), organique ou absent (monothalamides) (Fig. 1).

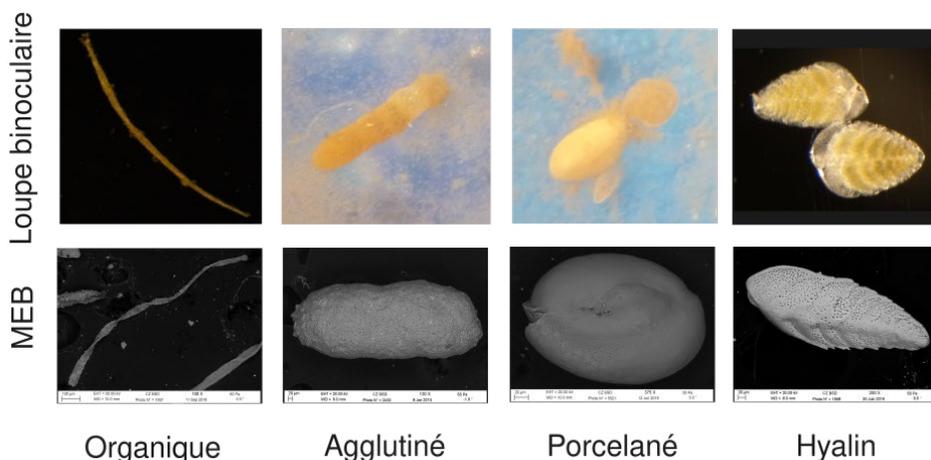


Figure 1 : Images de foraminifères à tests organique, agglutiné, porcelané et hyalin à la loupe binoculaire (en haut) et au microscope à balayage électronique (MEB, en bas).

Les principaux groupes (classes et ordres) de forams sont donc séparés sur la base de la composition du test. Les monothalamides ont des tests organiques ou pas de test (forams nus) et sont composés d'une seule loge (monothalames) alors que les autres groupes ont généralement plusieurs loges ajoutées au cours de la croissance (polythalames). Pour la classification en dessous de l'ordre (familles, genres et espèces), l'arrangement des loges, la structure de l'ouverture (forme, présence d'une plaque dentaire, ...) ou l'ornementation à la surface du test sont parmi les critères utilisés.

Le fait de baser la taxonomie quasiment uniquement sur des critères morphologiques se heurte à plusieurs problèmes. Il y a une certaine dose de subjectivité dans l'interprétation des critères morphologiques, qui dépend de l'expérience du scientifique procédant à l'identification des foraminifères et de sa connaissance des espèces dans l'espace et le temps. La taxonomie et/ou l'identification des espèces sont souvent différentes en fonction des "écoles" qui se sont développées en parallèle dans les derniers siècles, par exemple en Europe (p. ex. écoles allemande, française ou italienne). Ces différences d'interprétation rendent les comparaisons entre études de différentes zones géographiques et/ou différentes périodes géologiques difficiles dans de nombreux cas. Une meilleure communication entre les spécialistes pour discuter de l'identification des espèces permettrait de construire une taxonomie basée sur la morphologie plus uniformisée et plus robuste pour les foraminifères benthiques (ceux qui vivent dans et sur les sédiments marins). Un bon exemple à suivre est celui des foraminifères planctoniques (qui flottent dans la colonne d'eau), dont la taxonomie basée sur la morphologie a été homogénéisée par de nombreuses discussions entre spécialistes. Néanmoins, la tâche est plus conséquente pour les foraminifères benthiques qui ont cent fois plus d'espèces actuelles que les forams planctoniques.

Un autre problème est l'existence d'espèces cryptiques. Ce sont des espèces indiscernables morphologiquement qui sont différentes génétiquement. Tant qu'on définit une espèce uniquement sur la base de critères morphologiques, les espèces cryptiques sont impossible à identifier, mais les premières études basées sur l'ADN dans les années 1990-2000 ont révélé que les espèces morphologiques de foraminifères planctoniques contenaient d'une à sept espèces génétiques cryptiques.

Avec une taxonomie basée sur les critères morphologiques, les espèces qui présentent peu de caractères morphologiques sont plus difficiles à distinguer les unes des autres que les espèces présentant un grand nombre de critères. Par exemple, les foraminifères à tests organique ou agglutiné ont beaucoup moins de critères morphologiques disponibles que les espèces à test hyalin, ce qui rend leur identification moins fiable avec la morphologie.

Finalement, les critères morphologiques choisis pour la distinction spécifique sont-ils les plus à même de discriminer les différentes espèces efficacement ? Si l'on utilise une taxonomie basée uniquement sur la morphologie, il est impossible de répondre à cette question. Mais si l'on utilise d'autres approches comme l'analyse moléculaire basée sur l'ADN, il est possible de mieux caractériser les critères utiles à la discrimination des espèces.

Une solution pour améliorer la reconnaissance taxonomique des espèces de foraminifères est de combiner l'approche morphologique traditionnelle avec une approche moléculaire où les individus sont séquencés pour leur ADN. Pour ce faire, il faut collecter des individus vivants, documenter la morphologie de leur test avec un MEB (voir Fig. 1), extraire leur ADN individuellement, amplifier une région-cible de leur ADN avec des amorces spécifiques à cette région et aux foraminifères et séquencer l'ADN amplifié pour pouvoir le comparer à celui d'autres foraminifères identifiés précédemment. Cette approche de séquençage individuel se nomme DNA barcoding.

L'approche combinée entre morphologie et DNA barcoding a permis de voir la classification des foraminifères sous un nouvel angle. Les études moléculaires portant sur les niveaux taxonomiques supérieurs (classes et ordres) corroborent de nombreuses suppositions de la classification morphologique des foraminifères (Fig. 2). Par exemple, la partition en deux lignées à partir d'ancêtres à test organique, qui était proposée dans les classifications morphologiques (Fig. 2A), est confirmée par les résultats moléculaires (Fig. 2B). Deux nouvelles classes ont été érigées pour ces lignées distinctes, les Tubothalamea et les Globothalamea (Fig. 2B). Cependant, les monothalamides et les foraminifères planctoniques qui étaient vus comme des groupes homogènes sont en fait composés de plusieurs lignages bien séparés (ce sont donc des clades polyphylétiques).

Pour la reconnaissance des espèces, le fait de combiner les approches morphologiques et moléculaires permet de faciliter l'identification des forams provenant de différentes régions en gagnant en objectivité. Il est donc possible de reconnaître les espèces cosmopolites (présentes à de nombreux endroits) des espèces endémiques (limitées à une zone précise) de manière plus sûre qu'avec la morphologie seule.

Plusieurs exemples d'espèces cryptiques ont aussi été rapportés chez les forams benthiques. Un bon exemple est l'espèce morphologique *Ammonia tepida*, un foram très abondant sur les côtes européennes. Les analyses moléculaires ont montré que ce taxon est en fait constitué de trois espèces génétiques, qui ont pu être distinguées morphologiquement après réexamen. Il ne s'agit donc pas d'une espèce cryptique mais pseudocryptique composée de trois espèces distinctes qui peuvent maintenant être identifiées moléculairement et morphologiquement.

Parmi les espèces avec peu de critères morphologique, *Eggerelloides scaber* est une espèce morphologique à test agglutiné qui abrite plusieurs espèces génétiques cryptiques ou pseudocryptiques. A l'inverse, *Clavulina cylindrica* (Fig 1., agglutiné), une espèce reconnue en Méditerranée est en fait identique moléculairement et morphologiquement à *Liebusella goesi* décrite dans le Skagerrak. Mais le manque de critères morphologiques et le fait que ces deux régions sont généralement étudiées par des spécialistes de différentes écoles n'avait pas permis de faire le rapprochement sans les données moléculaires.

La question du choix des meilleurs critères morphologiques est aussi facilitée quand on combine la morphologie et l'ADN. L'un des critères utilisés pour discriminer les espèces pseudocryptiques d'*Ammonia* présentées ci-dessus est la porosité (la taille et le nombre des trous observés à la surface de la coquille). Ce critère a aussi été proposé pour distinguer des espèces pseudocryptiques de forams planctoniques. Les études moléculaires montrent donc que ce critère permet de distinguer des espèces, alors que les taxonomies basées sur la morphologie le considéraient comme un critère fluctuant et plutôt dépendant de paramètres écologiques comme l'oxygénation.



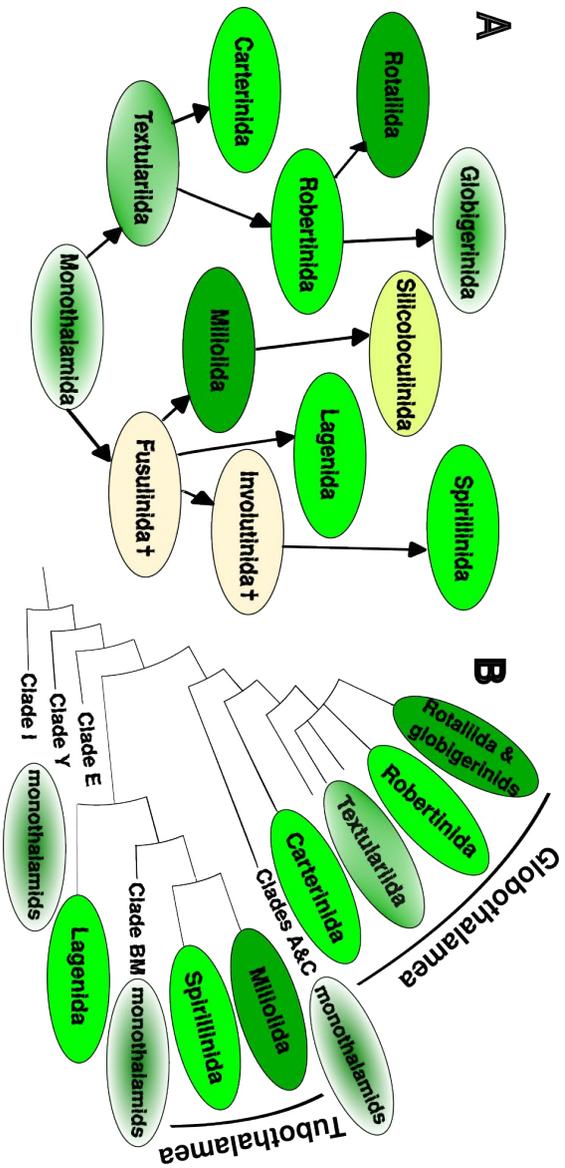


Figure 2: A) Phylogénie simplifiée des ordres de foraminifères basée sur des données morphologiques; B) Phylogénie des ordres de foraminifères basée sur des données moléculaires. Vert foncé: ordres avec des données moléculaires (*Mililoida*, *Rotalida*), dégradé de couleur verte: ordres polyphylétiques (*monothalamides*, *globigerinides*) et paraphylétiques (*Textularida*), vert clair: ordres représentés par une seule espèce dans les données moléculaires (*Carterinida*, *Lagenida*, *Robertinida*, *Spirillinida*), jaune: ordres sans représentant séquencé (*Silicocoloninida*), beige: ordres éteints (*Fusulinida*, *Involutinida*).

COMMENT LA COMPOSITION DE LA COQUILLE AIDE EN MICROPALÉONTOLOGIE

Par Christine Barras (*Ingénieure de Recherche*) et Inge van Dijk (*Chaire de Professeur Junior*) Univ Angers, Nantes Université, Le Mans Université, CNRS, Laboratoire de Planétologie et Géosciences, LPG UMR 6112, 49000 Angers, France

La coquille des foraminifères : un trésor d'informations

Une grande partie des foraminifères protège leur unique cellule à l'aide d'une coquille en calcite. Cette coquille est constituée de calcium (Ca) et carbone (C) prélevés dans l'eau de mer où ces organismes vivent. Pendant cette biominéralisation (formation de la coquille), d'autres éléments peuvent être également incorporés. Ce sont ces éléments traces qui peuvent servir au développement d'outils géochimiques permettant de tracer les conditions environnementales dans lesquelles les foraminifères ont vécu et donc calcifié.

La composition chimique des coquilles de foraminifères recèle donc une mine d'informations sous la forme de traceurs géochimiques. Les coquilles fossiles sont beaucoup utilisées par les micropaléontologues et les paléocéanographes pour reconstituer un large éventail de paramètres environnementaux (température, salinité, pH de l'eau de mer et composition chimique de celle-ci) et ainsi mieux comprendre les variations climatiques passées. Par exemple, la concentration en magnésium est utilisée classiquement pour reconstituer la température des océans sur des millions d'années. Les coquilles récentes peuvent également être analysées pour évaluer la qualité de l'eau, notamment la pollution chimique (par exemple le zinc ou le plomb) peut être enregistrée dans la coquille des foraminifères vivants dans des zones impactées.

Comment développe-t-on ces traceurs géochimiques ?

L'utilisation de tels traceurs géochimiques nécessitent leur calibration afin de reconstituer de manière fiable les paramètres environnementaux. Il est en effet nécessaire de bien comprendre tous les paramètres pouvant influencer leur enregistrement dans la coquille. Pour cela, les chercheurs se basent sur des études actuelles en milieu naturel où la composition de la coquille est directement comparée aux conditions environnementales mesurées au moment du prélèvement. Il est cependant parfois difficile de relier la composition géochimique à un paramètre spécifique car ce dernier peut varier dans le temps (au cours de la vie du foraminifères) ou qu'il co-varie avec d'autres paramètres. Il est alors intéressant de faire appel à des études en laboratoire qui permettent de mieux comprendre l'incorporation de l'élément, notamment en faisant varier un seul paramètre et en gardant les autres stables.

Ces expériences en laboratoire (Fig. 1) consistent à faire se reproduire et/ou grandir des foraminifères en conditions contrôlées afin de pouvoir analyser la composition chimique de la calcite formée. Elles peuvent être réalisées avec différentes espèces de foraminifères et durent généralement de plusieurs jours à plusieurs mois. À la fin des expériences, les taux de survie et de croissance des foraminifères sont évalués, et leur composition chimique des coquilles peut être mesurée à l'aide de diverses techniques d'analyse. Ces informations seront utilisées pour établir des liens entre la composition géochimique des coquilles et les conditions expérimentales. Par exemple, la concentration en Mg dans les coquilles s'est avérée être étroitement liée à la température de l'eau de mer.

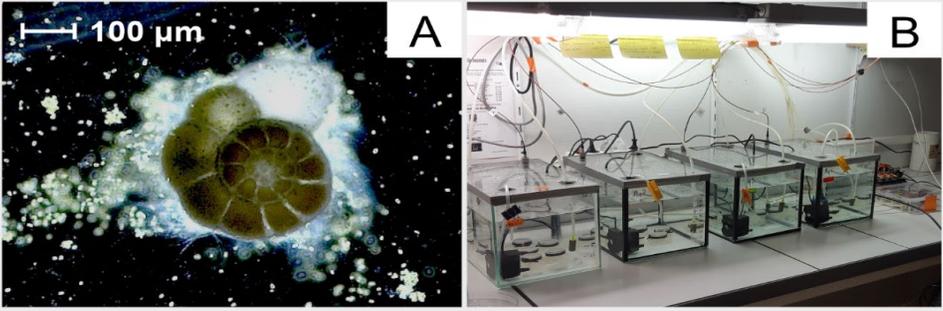


Figure 1. a) un foraminifère vivant venant de former une nouvelle loge. b) Exemple d'un dispositif expérimental composé de quatre aquariums avec des conditions d'oxygène étroitement contrôlées pour étudier la réponse des foraminifères et la chimie de leur coquille à des conditions de faible teneur en oxygène.

Comment « lire » dans les coquilles de foraminifères ?

La taille des coquilles des foraminifères étant très petite, la mesure de la composition chimique en éléments traces nécessite des techniques d'analyse de pointe. Celles-ci peuvent être réalisées sur un groupe de coquilles, sur une coquille seule ou bien sur une partie précise de la coquille (Fig. 2).

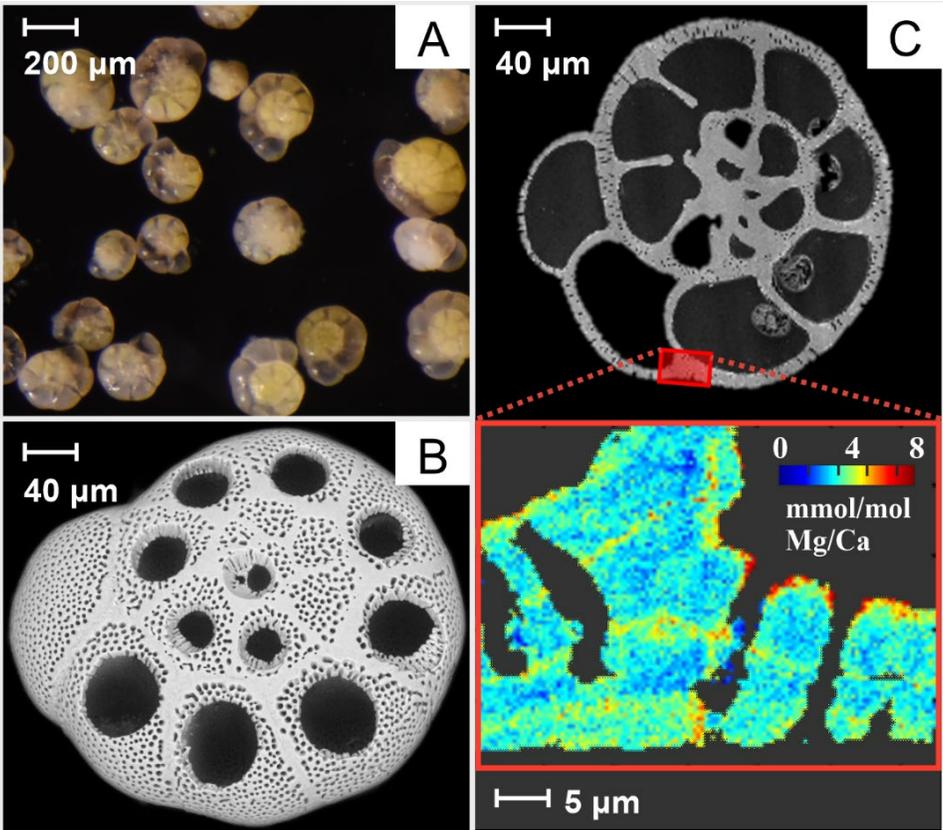


Figure 2. Différentes techniques analytiques permettent de mesurer la composition chimique en éléments traces dans la coquille des foraminifères, depuis des mesures sur des groupes d'individus (a), sur des loges individuelles (b), jusqu'à de la cartographie en 2D pour étudier la distribution de l'élément dans l'épaisseur de la coquille (c).



Pour les reconstitutions paléocéanographiques, les chercheurs souhaitent étudier les variations de la composition chimique moyenne des foraminifères au cours du temps. Pour cela, ils mesurent un groupe d'une dizaine de coquilles qui sont dissoutes et analysées par exemple à l'aide d'un spectromètre de masse (Fig. 2a).

Lorsqu'on réalise des expériences en laboratoire, les individus calcifient souvent uniquement quelques loges dans ces conditions contrôlées et ce sont ces loges que l'on souhaite analyser. Dans ce cas, nous ne pouvons pas dissoudre des coquilles entière mais nous pouvons utiliser un laser couplé à un spectromètre de masse qui permet de focaliser l'analyse sur la petite partie d'intérêt de la coquille (Fig. 2b).

Enfin, si l'on s'intéresse aux processus d'incorporation de ces éléments traces pendant la formation de la coquille, des techniques à haute résolution spatiale permettent de cartographier la distribution de ces éléments en deux dimensions sur des coupes transversales de coquilles (Fig. 2c).

La robustesse des reconstitutions (paléo-) environnementales basées sur la composition géochimique de la coquille des foraminifères repose sur une bonne connaissance et compréhension des paramètres pouvant influencer l'incorporation de l'élément dans la coquille.



FORAMINIFÈRES, MICROFOSSILES BÂTISSEURS

Par Jean-Paul Saint Martin. *Professeur émérite du Muséum*

Les foraminifères, protistes unicellulaires protégés par une coquille (test), représentent une composante biogène remarquable dans le registre géologique. Leur contribution est déterminante dans la formation de nombreux sédiments. Par leur seule accumulation, les foraminifères constituent ainsi des roches utilisées comme pierres de construction, ainsi qu'en témoignent, entre autres, les calcaires à nummulites utilisés pour bâtir les célèbres pyramides de Gizeh de l'Égypte antique. Sur un autre plan, les foraminifères sont eux-mêmes à considérer comme des constructeurs parvenant à créer des reliefs conséquents par un processus d'encroûtements successifs de leurs tests. La conférence se propose d'aborder cet aspect assez méconnu du rôle des foraminifères dans le lien entre biosphère et géosphère, en l'illustrant par divers exemples tirés des archives paléontologiques.



LA BIOSTRATIGRAPHIE

Par Erica Bicchi (*Maitresse de conférences*) ESAIP, Laboratoire de Planétologie et Géosciences, LPG UMR 6112, 49000 Angers, France

La biostratigraphie est une branche de la géologie qu'utilise la présence et la distribution des fossiles dans les couches (strates) géologiques pour les dater, les corréler et reconstituer l'histoire de la Terre. Il est important de garder à l'esprit que l'échelle de temps utilisée pour déterminer l'âge des strates diffère de celle de nos vies humaines. En effet, l'unité de base du temps en géologie est le million d'années. Ce temps est enregistré dans les couches géologiques par la présence d'organismes fossilisés qui servent de repères temporels pour établir des unités de temps ; ces dernières étant basées sur le principe que chaque intervalle géologique possède une association fossile unique et spécifique.

Les principales subdivisions du temps géologique sont basées sur l'évolution de la biodiversité et les grandes crises biologiques qui ont entraîné la disparition et l'apparition de nouvelles espèces. Ces événements biologiques, enregistrés sous forme de fossiles dans les roches sédimentaires, permettent de structurer le temps géologique en intervalles hiérarchisés : ère (ex. Cénozoïque), période (ex. Paléogène); époque (ex. Eocène), âge (ex. Lutétien). Par exemple, la limite entre le Mésozoïque et le Cénozoïque (connue sous le nom de limite KT) a été en partie établie sur la base de la disparition des dinosaures (fig.1).

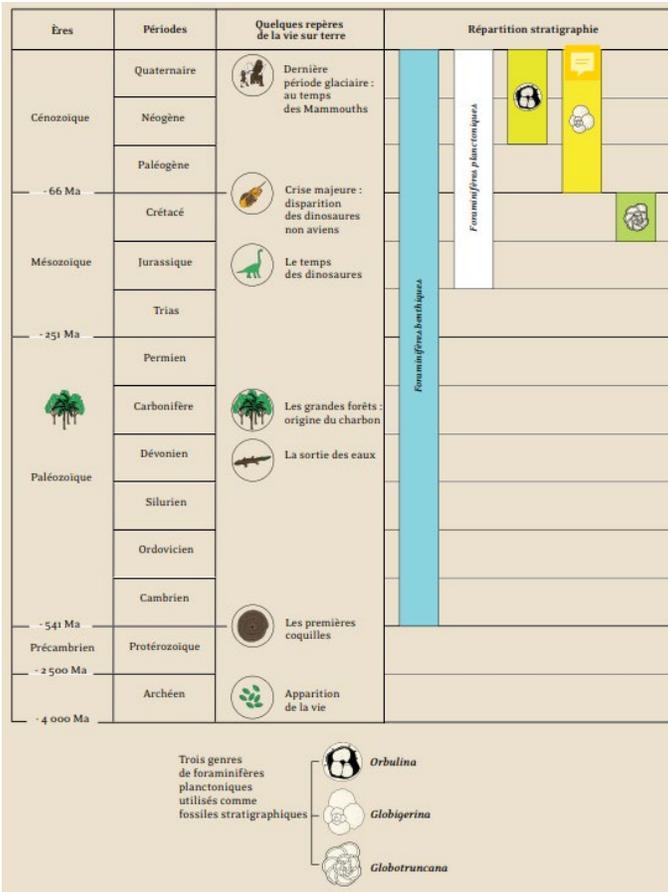


Fig. 1 : exemple simplifié de découpage du temps géologique

Chaque intervalle du temps géologique est caractérisé par des restes fossiles défini comme fossiles stratigraphiques (taxon Index) (fig1). Pour qu'un taxon fossile soit considéré comme un bon fossile stratigraphique, il doit posséder certaines qualités essentielles :

- **Durée d'existence courte** à l'échelle géologique.
- **Répartition géographique large** : il doit être largement répandu géographiquement, permettant ainsi de faire des corrélations à travers différents endroits éloignés.
- **Abondance** : il doit avoir été abondant, ce qui est nécessaire pour qu'il soit retrouvé en quantité suffisante à l'état fossile. Il doit être de petite taille pour une conservation et une identification aisée.

C'est à ce moment que le travail sur le terrain commence. Les fossiles sont prélevés, couche par couche, dans les séries sédimentaires. On identifie les apparitions et disparitions des fossiles stratigraphiques, permettant ainsi d'établir une succession stratigraphique des espèces (fig. 2).

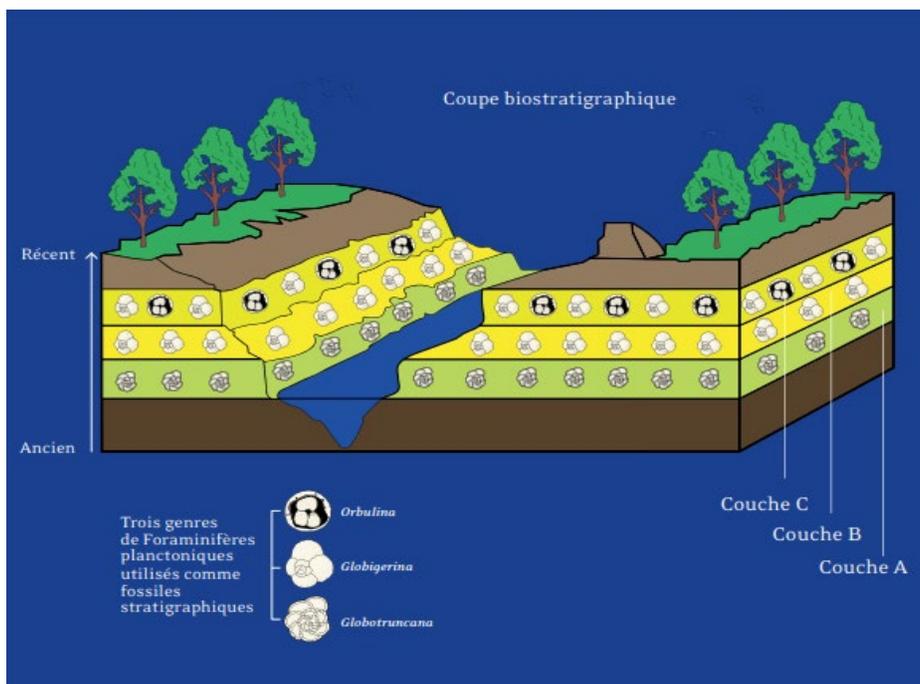


Fig. 2 : La couche A s'est déposée avant la couche B qui elle-même s'est déposée avant la couche C. Chaque couche représente le sédiment déposé à un moment donné de l'histoire de la Terre. La couche A contient notamment un genre de foraminifères planctoniques nommé *Globotruncana*, apparu sur terre au cours du Crétacé (il y a environ 100 millions d'années) et disparu à la crise K/T en même temps que les dinosaures non aviens il y a 66 millions d'années. Donc on peut en déduire que la couche A s'est déposée durant la fin du Crétacé entre -100 et -66 millions d'années. *Globotruncana* est un excellent fossile stratigraphique. La strate C contient un autre genre de foraminifères planctoniques nommé *Orbulina*. Ce genre est apparu dans les océans il y a 16 millions d'années. Donc la couche C'est beaucoup plus récente que la couche A et date de moins de 16 millions d'années.

À partir de cette succession, on définit des biozones, qui sont les unités de base en biostratigraphie.

Une biozone est basée sur la distribution verticale (dans les strates) et horizontale (dans l'espace, sur un territoire donné) des espèces fossiles stratigraphiques. Il existe plusieurs types de biozones, construites à partir de l'apparition, de la disparition ou de l'abondance de taxons.

La succession de biozones, rencontrées systématiquement dans le même ordre et basées sur différents groupes de fossiles (par exemple foraminifères), définit une échelle biostratigraphique. Construire des échelles biostratigraphiques est complexe en raison de l'enregistrement paléontologique souvent rare et partiel. De plus, de grandes différences existent dans la répartition temporelle des différents fossiles. C'est pourquoi des échelles biostratigraphiques spécifiques sont élaborées pour chaque groupe d'organismes

L'échelle biostratigraphique permet d'établir une chronologie relative en comparant plusieurs couches géologiques et leurs associations fossiles, afin de déterminer quelle couche est plus récente ou plus ancienne (fig. 2). Cependant, elle ne fournit pas d'âge numérique. Seules les méthodes de datation absolue, comme la radiochronologie, permettent d'obtenir une datation en millions d'années. Dans la fig. 3 est représentée l'échelle biostratigraphique basée sur les associations à foraminifères planctoniques corrélée à l'échelle radiochronologique de l'intervalle Eocène/Miocène (de 40 à 13 Ma).

L'intégration des échelles absolues et relatives permet de constituer l'échelle des temps géologiques.

Les Pionniers de la Biostratigraphie

Toutes ces notions sont principalement issues des travaux de naturalistes géologues du XIX^{ème} siècle et continuent de guider les méthodes contemporaines de datation et d'analyse des roches et des fossiles.

Par exemple Nicolas Steno (1638-1686) a établi des principes fondamentaux tels que le Principe de superposition (une roche sédimentaire est plus récente que celle qu'elle recouvre), et le Principe de continuité (une couche sédimentaire est de même âge en tout point où elle est présente) qui sont les fondements de la biostratigraphie.

William Smith (1769–1839), fondateur officiel de la biostratigraphie, a établi le principe de succession des espèces fossiles en observant que les strates de roches sédimentaires, contenant les mêmes associations fossiles, se succèdent verticalement dans un ordre précis.

L'amélioration de la compréhension de la distribution des fossiles et leur utilisation pour la datation des roches a été précisée par Alexandre Brongniart (1770–1847), co-fondateur français de la biostratigraphie, tandis que le concept de «fossile index» (fossile stratigraphique) a été introduit par le co-fondateur allemand de la biostratigraphie Leopold von Buch (1774–1853).

Cependant, c'est avec **Alcide d'Orbigny** (1802–1857) que le développement de la micropaléontologie et de la biostratigraphie moderne a pris son envol. En détaillant avec précision les caractéristiques génériques et spécifiques des organismes fossiles, notamment **les foraminifères**, il les a utilisés pour définir des étages stratigraphiques et établir une datation relative très détaillée.

Les foraminifères : des excellentes horloges géologiques

En général, les groupes d'organismes donnant de bons fossiles stratigraphiques sont ceux ayant vécu sur Terre pendant une courte période. Ainsi, les dinosaures sont de mauvais fossiles stratigraphiques : ils sont rares, souvent réduits à quelques fragments difficilement différenciables de ceux des autres vertébrés et ont parfois vécu sur de longues périodes géologiques. À l'inverse, **les foraminifères** comptent parmi les meilleurs fossiles stratigraphiques. Leur abondance et leur large distribution dans tous les environnements marins du monde entier les rendent utiles pour établir des corrélations stratigraphiques sur de vastes étendues géographiques. Leur diversité, leur évolution rapide et la préservation de leur coquille dans les sédiments en font des outils précieux pour la datation des couches géologiques. Certaines espèces, n'ayant existé que sur de courtes périodes géologiques, permettent d'identifier des biozones spécifiques et de distinguer

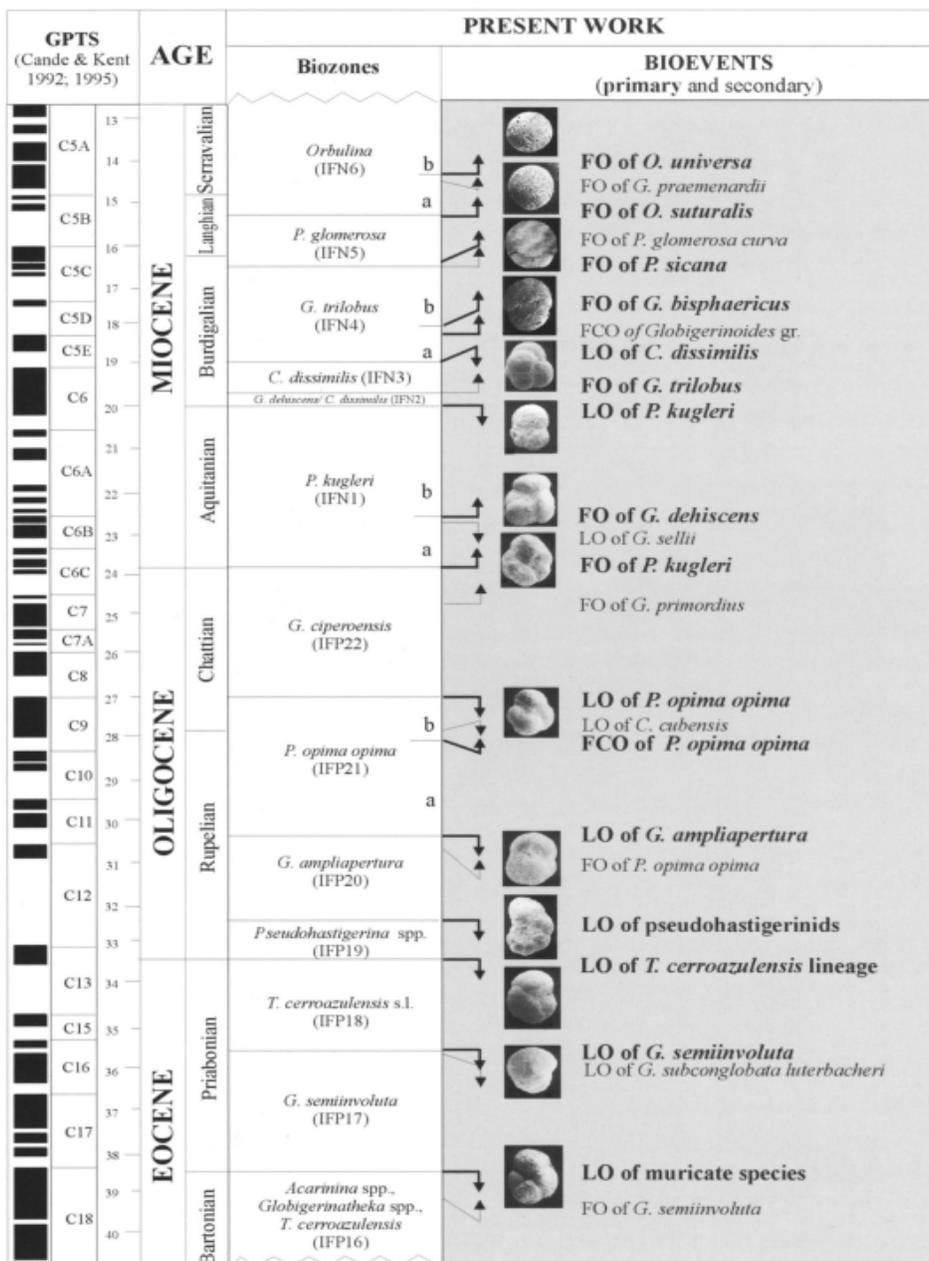


Fig. 3 : Echelle biostratigraphique basée sur les associations à foraminifères planctoniques corrélée à l'échelle radiochronologique de l'intervalle Eocène/Miocène (de 40 à 13 Ma) (Mancin *et alii*, 2003).

des intervalles de temps très précis. Les foraminifères ont donc une importance cruciale en biostratigraphie. Par exemple la limite entre le Mésozoïque et le Cénozoïque est marqué par l'extinction du genre de foraminifère planctonique **Globotruncana**.

Aux périodes de crises biologiques succèdent souvent une période de radiation c'est-à-dire une période où de nouvelles espèces apparaissent. C'est le cas pour le genre **Globigerina** (Paléocène-Actuel) qui colonise les eaux des océans il y a 66 millions d'années après la crise K/T alors qu'il n'existait pas avant.

Le genre **Nummulites**, foraminifère benthique de grandes dimensions, est souvent utilisé pour dater les strates du Cénozoïque (Eocène, Oligocène). Par exemple des *Nummulites* ont été trouvés dans les blocs de calcaire constituant les pyramides du Caire, permettant ainsi de dater ces roches au Lutétien, un étage de l'Éocène (ère Cénozoïque) qui s'étend de 47,8 à 41,3 Ma.

Le genre de foraminifères planctoniques **Orbulina** est apparu dans les océans il y a environ 16 millions d'années. La découverte de ses coquilles fossilisées dans les roches sédimentaires permet ainsi de les dater au moins à 16 Ma.

La biostratigraphie, grâce à l'utilisation des foraminifères, propose une méthode précise et efficace pour dater les strates géologiques et reconstituer l'histoire de la Terre. Cependant, l'utilisation des foraminifères en biostratigraphie présente des défis, notamment en raison de la diagenèse (altération chimique des fossiles après leur dépôt) et de la résolution temporelle limitée. Les recherches futures se concentrent sur l'amélioration des techniques d'analyse, telles que la microscopie électronique et la spectrométrie de masse, ainsi que l'exploration de nouvelles espèces pour une datation encore plus précise.

FORAMINIFÈRES : INDICATEURS ÉCOLOGIQUES

LES FORAMINIFÈRES AU SERVICE DES ÉTUDES SUR LE CLIMAT

Par Meryem Mojtahid (Professeure) Univ Angers, Nantes Université, Le Mans Université, CNRS, Laboratoire de Planétologie et Géosciences, LPG UMR 6112, 49000 Angers, France

Les foraminifères sont des organismes unicellulaires marins appartenant au groupe des protistes. Ils possèdent une coquille appelée « test », souvent de nature calcaire ou agglutinée, composée de plusieurs loges et présentant une grande diversité de formes. On distingue deux grands types de foraminifères : les espèces planctoniques, qui vivent en suspension dans la colonne d'eau, et les espèces benthiques, qui vivent au fond de l'océan, sur ou dans les sédiments.

Grâce à leur abondance, leur diversité et leur large répartition, les foraminifères ont laissé dans les sédiments océaniques une archive continue des conditions environnementales depuis plusieurs millions d'années. En effet, lorsque les foraminifères meurent, leurs coquilles s'accumulent lentement sur le plancher océanique, intégrées dans des couches sédimentaires qui se superposent au fil du temps (Fig. 1). Ces dépôts forment une stratigraphie naturelle, comparable à une chronologie, dans laquelle chaque couche conserve les coquilles des foraminifères ayant vécu à une époque donnée. L'analyse de ces sédiments permet de remonter loin dans le passé, bien au-delà de la période couverte par les archives humaines ou les instruments de mesure modernes.

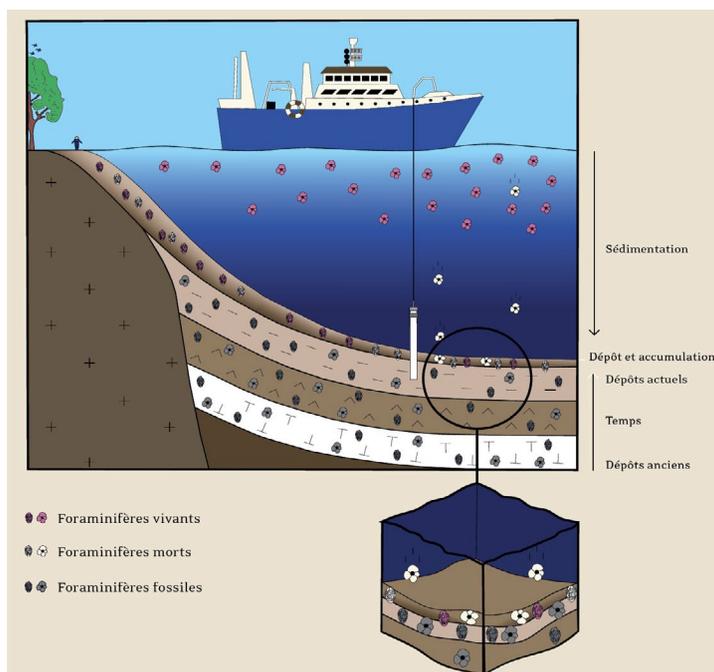


Figure 1. Représentation schématique de principe de sédimentation et d'archivage temporel

Les paléoclimatologues exploitent plusieurs informations issues des microfossiles. La première approche repose sur l'analyse de la composition chimique de leur coquille. Parmi les éléments les plus étudiés figure le rapport isotopique de l'oxygène dans la calcite. L'oxygène de l'eau de mer existe sous deux formes principales : l'isotope léger ^{16}O et l'isotope plus lourd ^{18}O . Lors des périodes glaciaires, une partie importante de l'eau océanique s'évapore et se trouve stockée sous forme de glace sur les continents, emportant préférentiellement l'isotope léger. Il en résulte un enrichissement relatif des océans en ^{18}O , qui se retrouve dans les tests des foraminifères. Inversement, lors des périodes interglaciaires, la fonte des glaces restitue l' ^{16}O aux océans, réduisant la proportion de ^{18}O . En mesurant ce rapport isotopique (appelé $\delta^{18}\text{O}$), les chercheurs peuvent reconstituer les variations passées de température et du volume des calottes glaciaires, avec une résolution parfois très fine.

Cette méthode a notamment permis de mettre en évidence l'existence de cycles climatiques récurrents au cours des deux derniers millions d'années, caractérisés par l'alternance de périodes froides glaciaires et de périodes chaudes interglaciaires. Ces cycles coïncident avec les variations des paramètres orbitaux de la Terre, comme l'a démontré la théorie de Milankovitch. Les données isotopiques issues des foraminifères fossiles ont ainsi confirmé que l'excentricité de l'orbite terrestre, l'inclinaison de son axe et la précession de cet axe modulent l'ensoleillement reçu par la planète, influençant les rythmes climatiques à long terme.

La seconde approche repose sur l'étude qualitative et quantitative des assemblages d'espèces présentes dans les couches sédimentaires. Chaque espèce de foraminifère est adaptée à des conditions environnementales spécifiques, notamment de température, de salinité et de profondeur. Par exemple, certaines espèces planctoniques sont caractéristiques des eaux tropicales, tandis que d'autres ne se développent que dans des eaux froides, comme *Neogloboquadrina pachyderma*, particulièrement abondante dans les régions polaires. Lorsque cette espèce est retrouvée en grande quantité dans des sédiments situés aujourd'hui à des latitudes tempérées, cela indique que les eaux à cette époque étaient sensiblement plus froides (Fig. 2). L'évolution de la composition des assemblages au fil des couches permet ainsi de retracer les changements de climat régionaux et globaux.

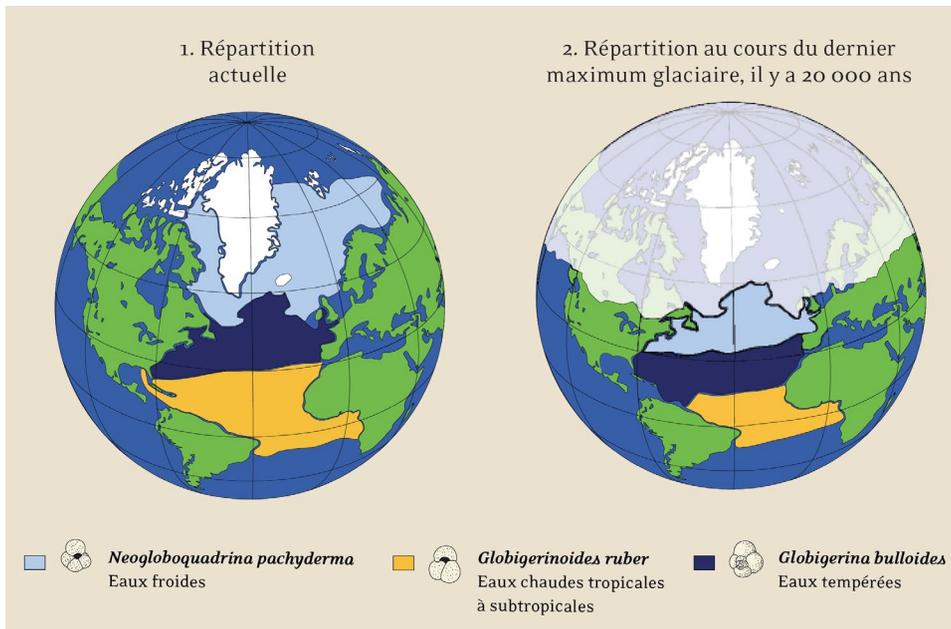


Figure 2. Répartition écologique des foraminifères planctoniques en fonction des changements climatiques

La complémentarité entre ces deux approches - géochimique et taxonomique - renforce la fiabilité des reconstructions climatiques. Dans les carottes de sédiments extraites du fond des océans, les foraminifères ont permis de dresser une courbe continue des variations climatiques sur des millions d'années. Cette courbe, basée sur les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$, constitue l'un des principaux outils de référence en paléoclimatologie. Elle révèle, par exemple, que les périodes glaciaires du Quaternaire sont relativement brèves à l'échelle des temps géologiques, alternant avec des périodes plus longues et plus stables de climat tempéré.

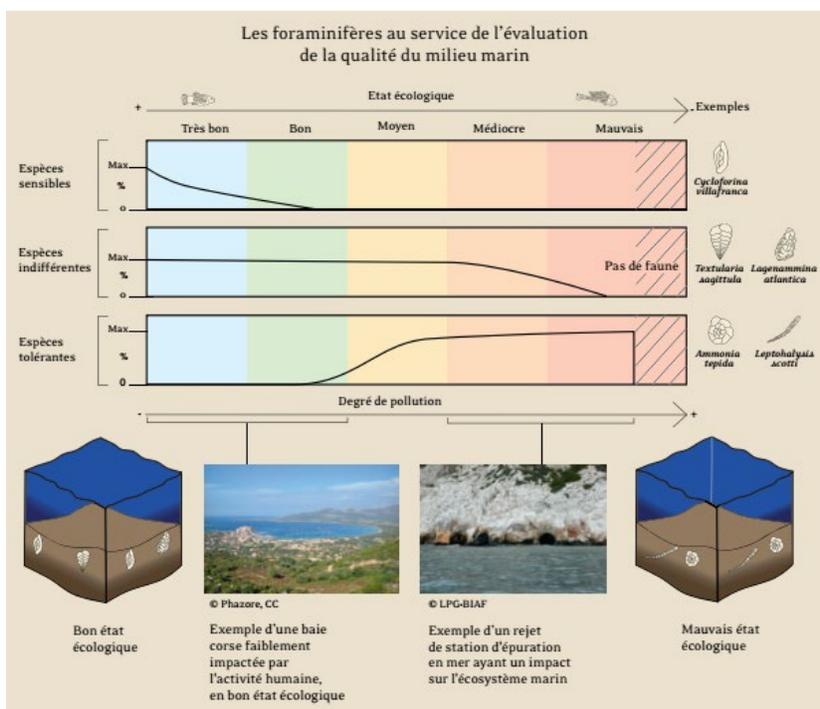
L'étude des foraminifères offre donc un accès unique aux archives naturelles du climat préindustriel. Grâce à leur grande sensibilité aux conditions océaniques et à leur préservation dans les sédiments, ils permettent de reconstituer l'histoire du climat terrestre sur des échelles de temps allant de quelques milliers à plusieurs millions d'années. Ces données anciennes sont indispensables pour comprendre les mécanismes naturels des variations climatiques à long terme, en dehors de toute influence anthropique. En révélant les rythmes passés du climat, les foraminifères permettent de replacer les changements actuels dans une perspective géologique plus large, et de mieux saisir la dynamique naturelle du système Terre.

LES FORAMINIFÈRES, SENTINELLES DE L'ÉTAT DE SANTÉ DES MILIEUX MARINS

Par Chritine Barras (*Ingénieure de Recherche*) et Emmanuelle Geslin (*Professeure*), Univ Angers, Nantes Université, Le Mans Université, CNRS, Laboratoire de Planétologie et Géosciences, LPG UMR 6112, 49000 Angers, France

L'évaluation de la qualité des masses d'eau se fait à l'aide de différents outils et notamment des indices biotiques. Intégrés aux Directives Européennes, les indices basés sur l'étude de la macrofaune sont utilisés en routine. Cependant d'autres organismes peuvent être utilisés comme bio-indicateurs comme les foraminifères benthiques. Les raisons sont multiples : 1) de fortes densités d'individus sont observés dans un faible volume de sédiment permettant d'appliquer des analyses statistiques robustes, 2) une grande diversité écologique permet de définir des espèces sensibles ou tolérantes, et 3) leurs coquilles vont se préserver dans le sédiment après la mort de la cellule et permettre de reconstituer des états de références en étudiant des carottes remontant aux périodes pré-industrielles. C'est surtout ce dernier point qui rend unique les foraminifères comme bio-indicateurs.

Avec l'augmentation de la pollution, on observe généralement une diminution de la biodiversité et une succession typique d'espèces. Les espèces les plus sensibles à la perturbation sont alors présentes uniquement en zone non polluée. Au contraire, les espèces opportunistes et/ou tolérantes sont capables de s'adapter aux conditions polluées profitant ainsi de l'absence de compétition des autres espèces. En cas de pollution extrême, on peut même assister à la disparition totale des foraminifères. Pour pouvoir décrire la qualité des milieux marins simplement grâce à une « note » et un code couleur, les chercheurs développent des indices biotiques basés sur la biodiversité ou sur les groupes écologiques des espèces (sensibles, tolérantes...). Cette note permet de déterminer si des actions doivent être mises en place pour rétablir ou maintenir le bon état écologique de la zone étudiée.



FOSSILES EN BEAUTÉ

Une animation proposée par Simona & Jean-Paul Saint-Martin

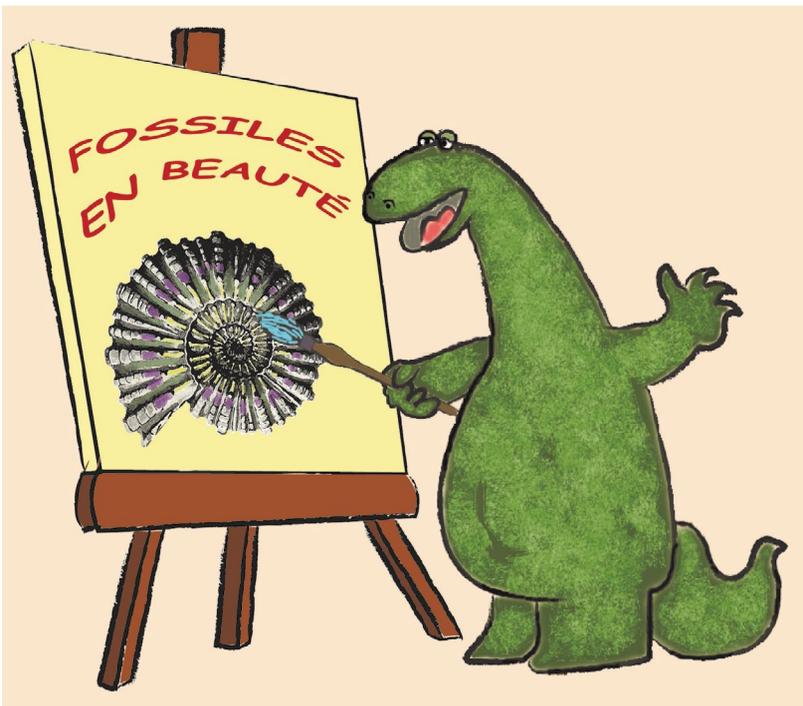
Quand l'art rencontre la vie passée de la Terre, les expressions en sont multiples. Formes, motifs, couleurs, matière, tout concourt à susciter l'intérêt et la passion de l'artiste et du scientifique, parfois réunis pour en sublimer l'esthétisme intemporel.

Véritables œuvres d'art, les fossiles offrent un large éventail de beautés aussi bien dans le monde visible que dans le monde microscopique. Les formes géométriques comme la spirale, omniprésente dans la nature actuelle comme chez les fossiles, ont guidé des architectures vivantes extraordinaires dont la perfection nous émerveille.

Le talent et l'imagination des artistes peuvent s'emparer des merveilles du passé pour exprimer une sensibilité et une créativité qui dépassent largement l'intérêt scientifique des fossiles et permettent tous les détournements.

Dessiner et faire revivre la vie du passé demandent aux illustrateurs à la fois une grande rigueur scientifique et une véritable inspiration artistique qui ne peuvent que produire des tableaux dignes de grands maîtres.

L'animation aborde ces thèmes par diverses illustrations et propose également de parcourir les aspects surprenants des merveilles du monde microscopique fossile.



PARCOURS MUSÉAL

Visite Musée – Valoriser les collections avec un outil numérique.

Présentation réalisée par Maëlle Escurier, *stagiaire* sous la direction de Lucille Bourroux¹

*Depuis plusieurs années le consortium **J'peux pas j'ai musée** accompagne les musées de Nouvelle-Aquitaine désireux de proposer des outils numériques d'aide à la visite pour leurs visiteurs. Ces applications, développées avec les étudiants de l'IUT de La Rochelle, permettent à la fois aux institutions de mobiliser et mutualiser leurs efforts sur des projets répliquables et aux étudiants de se former.*

C'est ainsi que, parmi d'autres propositions, est née l'application Visite Musée, qui permet, via les propres appareils des visiteurs ou, éventuellement, des tablettes mises à disposition du public à l'accueil des musées.

Muni de son appareil, le visiteur est invité à découvrir le musée en scannant des QR codes ou à suivre des parcours mis en place. L'intérêt de ce dispositif est de proposer du contenu augmenté et de donner accès à des images numériques d'objets qui ne seraient pas exposés, faire des liens avec les expositions temporaires, les événements voire même d'autres musées de la région qui recèleraient des collections complémentaires.

Le parcours proposé pour les rencontres d'Orbigny suit cette idée de mise en relation entre les collections. Le but est de mettre en valeur les dessins détenus par la Société des sciences naturelles de la Charente-Maritime qui, par souci de conservation ne sont pas exposés de manière permanente, en proposant un parcours dans le Muséum de La Rochelle.

À destination du grand public, il s'agit de faire découvrir une éminente figure locale :

Alcide d'Orbigny, sa vie, sa famille, son travail sur les foraminifères.

À travers un voyage sur les lieux de son enfance, de son voyage en Amérique du Sud, le visiteur est invité à parcourir plusieurs salles du Muséum pour en apprendre plus sur ce personnage passionnant et son intérêt pour l'infiniment petit.

TÉLÉCHARGEZ L'APPLICATION
DU MUSÉUM DE LA ROCHELLE



Apple Store



Play Store

¹ Attachée de conservation, Responsable de la Bibliothèque scientifique, Muséum d'Histoire Naturelle de La Rochelle



L'Espace de Culture Océane du Littoral et de l'Environnement - E.C.O.L.E de la mer - est une association loi 1901, créée en 1999 et présidée par Isabelle AUTISSIER.

Les missions de l'E.C.O.L.E de la mer se déclinent en plusieurs axes que sont :

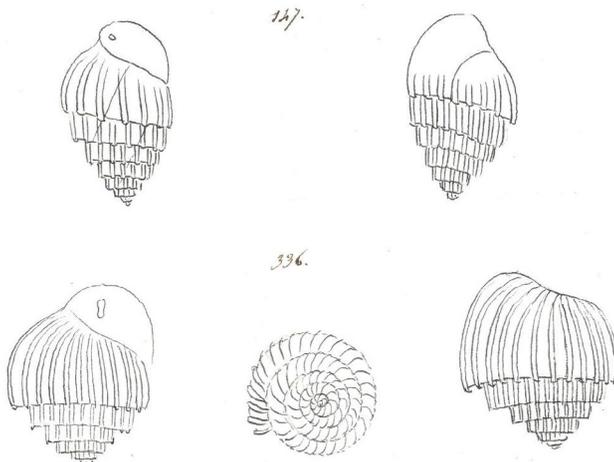
- la **diffusion de la culture scientifique**, par l'organisation de conférences grand public, d'activités de sciences participatives,
- des **animations pédagogiques** auprès de la jeunesse,
- des **missions de sensibilisation** auprès des habitants et usagers du littoral : animations de découverte de la mer, de la biodiversité marine et des activités humaines pour comprendre le littoral, ses spécificités, ses enjeux.

L'association a développé le travail en partenariat. C'est donc tout naturellement qu'elle a intégré une dizaine de réseaux locaux, régionaux, nationaux.

Ainsi depuis 20 ans, l'E.C.O.L.E. de la Mer a reçu plus de 150 000 enfants (scolaires et hors scolaires) en activités pédagogiques, conçu une quarantaine d'outils (expositions légères, malle pédagogique, guides de terrain, affiches etc...), pouvant être mises à disposition. Plus de 50 000 personnes ont participé aux événements, sorties, conférences et autres manifestations organisées par l'association.

Elle a accompagné une centaines de jeunes dans leur projet en les accueillant en stages, apprentissage, mission ou service civique.

Dans le cadre des **Rencontres d'Orbigny**, l'E.C.O.L.E de la mer propose un **atelier pédagogique** pour les scolaires. Dans la peau de jeunes scientifiques, les scolaires partent à la découverte d'êtres vivants microscopiques : les foraminifères.



PROGRAMME

MERCREDI 1 OCTOBRE

Bibliothèque scientifique du Muséum

17h

Introduction patrimoniale aux Rencontres par Elise Patole-Edoumba
Conservateur du Patrimoine, Directrice du Muséum d'Histoire naturelle.

17h30

Foraminifères, microfossiles bâtisseurs par Jean-Paul Saint-Martin,
Professeur émérite Muséum National d'Histoire Naturelle.

JEUDI 2 OCTOBRE

Bibliothèque scientifique du Muséum

10h30

Présentation du parcours muséal par Maëlle Escurier.

11h

Quelques traits d'histoire sur la vie des foraminifères par Mickaël Airaud,
PRAG Biologie / écologie La Rochelle Université.

14h15

Où et comment vivent les foraminifères par Maria Pia Nardelli *Maitresse de conférences de l'Université d'Angers au LPG (Laboratoire de Planétologie et Géosciences).*

15h

De la taxonomie classique basée sur la forme des tests aux analyses phylogénétiques par Magali Schweizer *Maitresse de conférences de l'Université d'Angers au LPG (Laboratoire de Planétologie et Géosciences).*

16h15

Comment la composition de la coquille aide en micropaléontologie ?
par Christine Barras *Ingénieure de recherche LPG.*

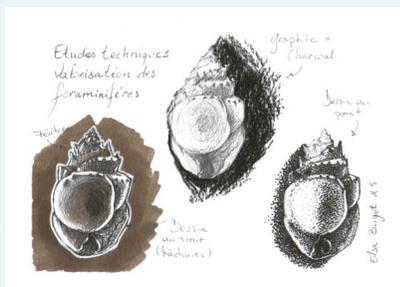


Illustration Elsa Bugot

Animation artistique Elsa Bugot :

De tout temps, l'homme s'est intéressé et a représenté son environnement : des peintures rupestres à la peinture numérique actuelle, le dessin naturaliste a permis de décrire la diversité de la faune et la flore qui existe, a existé ou existera !

Dans le cadre des Rencontres d'Orbigny qui porteront cette année sur les foraminifères, Elsa Bugot vous propose un atelier de découverte de l'illustration naturaliste et scientifique.

Que ce soit des croquis, des dessins détaillés, en couleur ou non, au trait ou au point, venez découvrir l'art de représenter le vivant.

VENDREDI 3 OCTOBRE

Matin

9h30-10h30
10h30-11h30

Animations scolaires - 2 ateliers « Découvrons les foraminifères »
par E.C.O.L.E de la mer. (Salle démo)

10h30-12h

Animation artistique « l'illustration scientifique et naturaliste »
par Elsa Bugot, *Illustratrice scientifique. (Bibliothèque)*

Après-midi :

Bibliothèque scientifique du Muséum

14h15

Les foraminifères au service des études sur le climat par Meryem Mojtahid,
Professeure de l'Université d'Angers au LPG (Laboratoire de Planétologie et Géosciences).

15h

Les foraminifères, sentinelles de l'état de santé des milieux marins
par Christine Barras *Ingénieure de recherche LPG & Emmanuelle Geslin Professeure de l'Université d'Angers au LPG (Laboratoire de Planétologie et Géosciences).*

16h - 17h

La biostratigraphie par Erica Bicchi *Maitre de conférences à l'ESAIP et à l'Université d'Angers au LPG (Laboratoire de Planétologie et Géosciences).*

SAMEDI 4 OCTOBRE

Bibliothèque scientifique du Muséum - Atelier conférence – Tout public

14h30-16h30

Fossiles en beauté par Simona et Jean-Paul Saint-Martin *MNHN*

La programmation des Rencontres d'Orbigny, par la Société des Sciences Naturelles de la Charente-Maritime, a reçu le soutien des PAI (programmes d'animations d'initiatives) en 2025 de la Région Nouvelle-Aquitaine, qui encouragent la diffusion de la culture scientifique, technique & industrielle dans tous les territoires néo-aquitains.

Société des Sciences Naturelles



Société des Sciences Naturelles
28 rue Albert 1^{er} - 17000 La Rochelle
I.S.S.N. 0373.9929

www.societesciences17.org

Partenaires animations :



Partenaires financiers :

