

tiques classiques, elle reste plus gourmande en énergie et libère par conséquent plus de gaz à effet de serre.

Que privilégier? La préservation des ressources? Le partage des surfaces cultivables? L'élimination des déchets solides? La réduction des émissions de gaz à effet de serre? La rentabilité? Quelle que soit l'approche choisie, l'utilisation d'énergie et les émissions qui en résultent dégradent l'environnement. On ne remplacera utilement les procédés pétrochimiques actuels que si l'on parvient à réduire les émissions de gaz à effet de serre et aussi à inverser le flux de carbone : pour piéger le carbone, on devra fabriquer des plastiques non dégradables à partir de sources ayant absorbé le gaz carbonique de l'atmosphère, les plantes par exemple. Le plastique serait enfoui après usage, ce qui piégerait le carbone dans le sol plutôt que de le renvoyer dans l'atmosphère. Certains plastiques biodégradables, y compris le PLA, pourraient même servir à piéger le carbone, car les décharges où aboutissent de nombreuses matières plastiques ne favorisent généralement pas la dégradation.

On ne peut pas demander à l'industrie du plastique de réduire la quantité de gaz carbonique dans l'atmosphère, mais l'industrie tout entière, et pas uniquement celle du plastique, bénéficierait de l'utilisation de matières premières renouvelables et de sources d'énergie renouvelables. Un tel passage nécessiterait d'importantes modifications de l'infrastructure mondiale de la production de l'énergie, mais un tel effort mérite qu'on s'y intéresse. Après tout, l'énergie renouvelable est l'un des ingrédients essentiels pour construire une économie durable et, en tant que telle, elle reste l'obstacle principal à la production de plastiques vraiment «verts».

Tillman GERNGROSS est professeur au Dartmouth College. Steven SLATER est chercheur dans la Société Cereon Genomics, une filiale de Monsanto.

Y. POIRIER, D.E. DENNIS, K. KLOMPARRINS et C. SOMERVILLE, *Polyhydroxybutyrate, a Biodegradable Thermoplastic, Produced in Transgenic Plants*, in *Science*, vol. 256, pp. 520-622, avril 1992.

Tillman U. GERNGROSS, *Can Biotechnology Move Us toward a Sustainable Society?* in *Nature Biotechnology*, vol. 17, pp. 541-544, juin 1999.

Une nouvelle rencontre de la science et de l'art.



LES SECRETS DE LA CASSEROLE

Comment préparer plus de 20 litres de mayonnaise à partir d'un seul jaune d'œuf ? En explorant la physique des émulsions. Comment obtenir un bon rôti ? En empruntant à la chimie ses études des sucres et des acides aminés. Comment obtenir de bonnes gelées ? En reprenant les résultats récents de la physico-chimie des gels. Code 1585-130 F 224 pages



RÉVÉLATIONS GASTRONOMIQUES

Encore un livre de recettes ! Oui, mais des recettes garanties par des expérimentations rigoureuses, par des analyses physico-chimiques des aliments et des tours de main culinaires. Chaque geste culinaire est ici disséqué, commenté du triple point de vue culinaire, physico-chimique et gastronomique. Code 1756-130 F 320 pages

Ces deux ouvrages ont obtenu le Prix de l'Académie nationale de Cuisine 1997.

LA CASSEROLE DES ENFANTS

Laissés seuls pour la soirée, deux enfants doivent cuisiner leur dîner. Mais leur sens aigu de l'observation et de l'expérimentation leur fait découvrir les bases de la chimie et de la physique. Ce livre pourrait être un manuel, s'il n'évoquait les molécules et leurs transformations de façon si simple et si amusante.

Code 2309-80 F-128 pages



BELIN

Voir bon de commande page 98

Les foraminifères

JEAN-PIERRE DEBENAY • EMMANUELLE GESLIN • VÉRONIQUE STOUFF

Avec plus de 50 000 espèces, les foraminifères forment un groupe d'une extrême diversité. Longtemps négligés par les biologistes, ils constituent aujourd'hui un outil performant dans l'étude de l'environnement.

Les roches calcaires, tels les falaises qui bordent la Manche ou les blocs des pyramides de Gizeh, en Égypte, contiennent toutes une proportion, parfois notable, d'éléments aux formes élaborées, souvent décelables seulement au

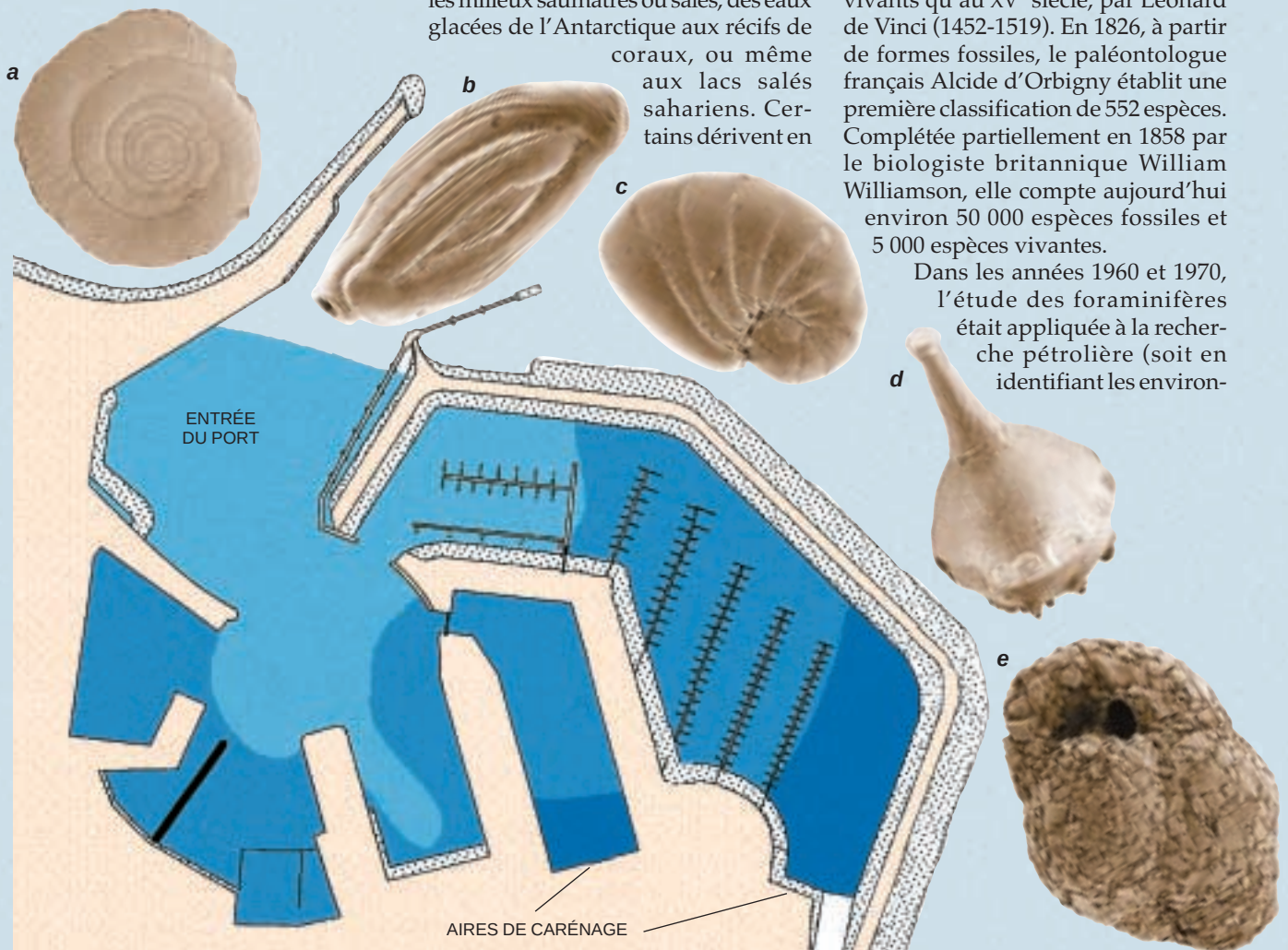
microscope : il s'agit de squelettes fossilisés d'organismes marins, les foraminifères.

D'une taille comprise entre 0,05 et 100 millimètres, ces organismes colonisent depuis le Cambrien, soit depuis plus de 500 millions d'années, tous les milieux saumâtres ou salés, des eaux glacées de l'Antarctique aux récifs de coraux, ou même aux lacs salés sahariens. Certains dérivent en

plein océan avec le plancton, d'autres vivent sur le fond.

Observés pour la première fois au ^{ve} siècle avant notre ère par l'historien Hérodote (-484 ; -425) dans les pyramides d'Égypte, les foraminifères ne sont reconnus comme organismes vivants qu'au ^{xv} siècle, par Léonard de Vinci (1452-1519). En 1826, à partir de formes fossiles, le paléontologue français Alcide d'Orbigny établit une première classification de 552 espèces. Complétée partiellement en 1858 par le biologiste britannique William Williamson, elle compte aujourd'hui environ 50 000 espèces fossiles et 5 000 espèces vivantes.

Dans les années 1960 et 1970, l'étude des foraminifères était appliquée à la recherche pétrolière (soit en identifiant les environ-



1. DANS LE PORT DE PORT-JOINVILLE, sur l'île d'Yeu, les activités humaines modifient les peuplements de foraminifères : ces derniers sont rares en face de deux aires de carénage (en bleu foncé), plus abondants et avec des espèces différentes dans les zones où l'influence marine est plus forte (en bleu plus clair) et plus abondants encore à

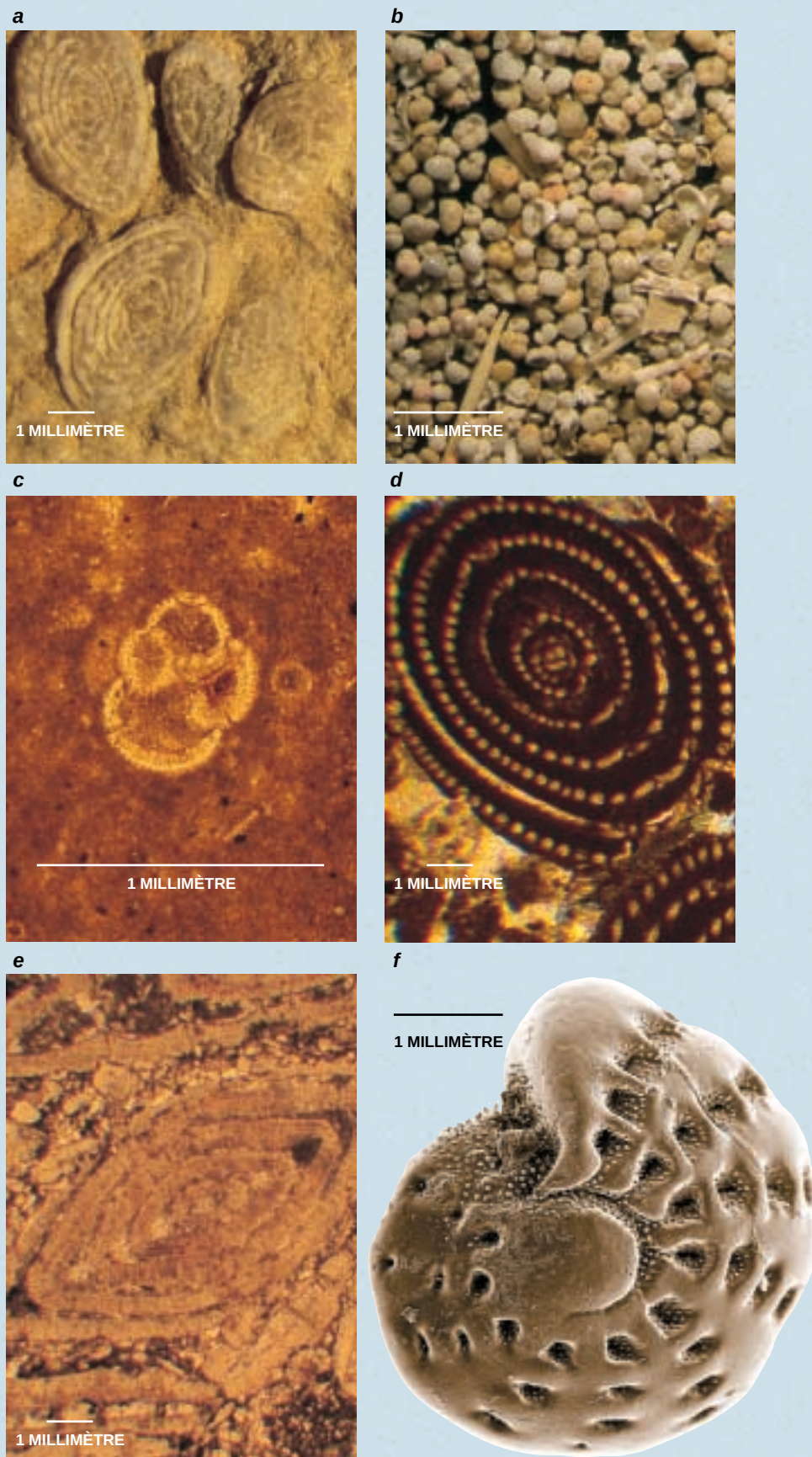
l'entrée du port où l'eau est souvent renouvelée (en bleu encore plus clair). Autour de la carte, quelques exemples de tests de foraminifères (ils mesurent quelques dixièmes de millimètre de diamètre) : une espèce de *Spirillina* (a), une espèce de *Quinqueloculina* (b) *Pseudononion atlanticum* (c), *Lagena striainterrupta* (d) et *Eggerelloides scabrus* (e).

nements où le pétrole aurait pu se former ou s'accumuler, soit en repérant les couches connues pour contenir du pétrole), puis elle a été abandonnée au profit d'autres méthodes. Depuis une vingtaine d'années, elle connaît un regain d'intérêt pour ses applications écologiques. En examinant la vie des foraminifères, nous comprendrons pourquoi ces organismes ont été récemment reconnus comme d'excellents bio-indicateurs de la qualité et des variations de l'environnement. Par exemple, dans le port de Port-Joinville, sur l'île d'Yeu, ces organismes sont plus rares et les espèces sont différentes en face de deux aires d'entretien des navires qui sont à l'abri des courants, et où les rejets toxiques riches en zinc ou en cuivre sont notables (voir la figure 1).

Un test à trous pour géologues

Un foraminifère est une cellule dans une coquille. Appartenant au groupe des rhizopodes, des organismes unicellulaires qui se déplacent grâce à des extensions nommées pseudopodes, les foraminifères se distinguent par leur coquille minéralisée, nommée test. La cellule a un cytoplasme où baignent les organites (des éléments intracellulaires entourés par une membrane) habituels des cellules animales, tels le noyau, les mitochondries, l'appareil de Golgi et le réticulum endoplasmique, ainsi que des inclusions, tels des lipides et des pigments, et, parfois, des organismes, notamment des algues unicellulaires, qui vivent en symbiose avec leur hôte. Les pseudopodes des foraminifères forment un réseau complexe (voir la figure 3d) ; ils sont dotés d'une armature de microtubules composés d'une protéine, la tubuline. Ils participent à la locomotion, à la nutrition et à la construction du test. Ce dernier est composé d'une succession de loges de plus en plus grosses que l'organisme construit et où son cytoplasme s'étend à mesure qu'il croît, occupant toutes les loges. Pendant les premiers stades de la croissance, une nouvelle loge est construite en 24 heures en moyenne.

Les espèces de foraminifères sont définies selon la nature et la morphologie des tests, tels l'agencement des loges, la forme des ouvertures ou l'ornementation : on distingue trois types



2. LES FORAMINIFÈRES ont des aspects variés. Des fossiles de nummulites se dégagent d'un bloc de calcaire vieux de 60 millions d'années (a). Des boues à globigérines, prélevées dans le golfe de Guinée, montrent l'importance des foraminifères dans les sédiments marins (b). Une globigérine est fossilisée dans un sédiment (c). Des tests de foraminifères dépourvus de pores apparaissent opaques au microscope (d). Les tests perforés sont translucides (e). Malgré leur taille, les tests sont parfois des chefs-d'œuvre d'architecture (f).

de tests. Les tests organiques sont sécrétés par la cellule ; les tests agglutinés sont construits à partir d'éléments prélevés au hasard ou triés par les pseudopodes dans le sédiment, puis cimentés par une colle organique ou par des dépôts minéralisés de silice, de calcite ou d'oxyde de fer ; les tests carbonatés sont composés généralement de calcite. Parmi ces derniers, on distingue les tests hyalins, percés de nombreux pores, et les tests porcelanés, qui en sont dépourvus.

Les tests hyalins, qui apparaissent translucides au microscope, se for-

ment par minéralisation de part et d'autre d'un moule de matière organique déposé par les pseudopodes. Lors de la construction d'une nouvelle loge, la paroi est ainsi constituée de deux lamelles de calcite séparées par le moule organique dont les glycoprotéines (des molécules composées d'une protéine liée à un sucre) commandent au moins partiellement la minéralisation. L'inhibition de la minéralisation forme, dans certaines zones, des pores par où des gaz et des substances dissoutes sont échangés. Chez certaines espèces, la lamelle externe des nouvelles loges recouvre l'ensemble des loges précédentes : chaque lamelle est alors séparée de la précédente par une couche organique très mince ; les pores qui se prolongent à travers les lamelles successives sont obstrués par ces couches organiques ainsi que par l'épais revêtement organique interne.

Lors de la construction d'un test porcelané, opaque, l'appareil de Golgi produit des aiguilles de calcite, pendant que les pseudopodes délimitent l'espace de la paroi à construire. Les

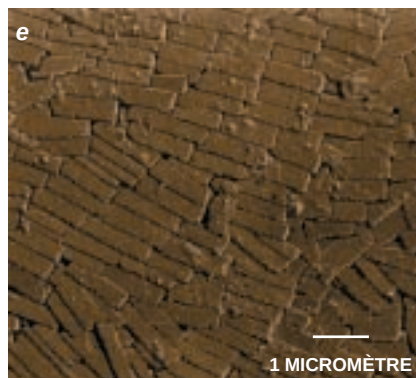
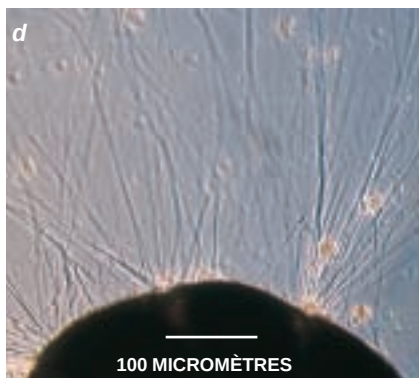
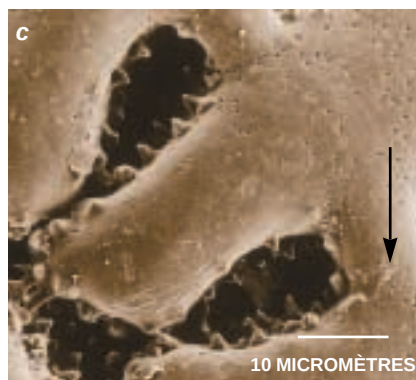
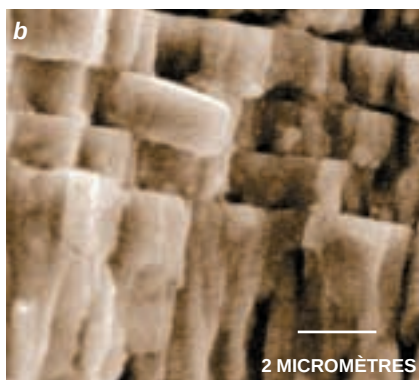
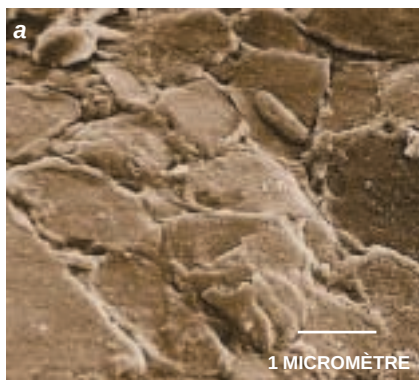
aiguilles de calcite sont transportées à l'intérieur de cet espace où elles sont déposées dans un ordre aléatoire. Une mince couche organique est ensuite déposée sur chaque face de l'amas d'aiguilles. Enfin, les éléments carbonatés externes se réorganisent et forment la surface du test, par exemple celle au pavage régulier d'une espèce de *Quinqueloculina*.

Les tests vides des foraminifères morts s'accumulent dans les sédiments et peuvent s'y fossiliser. Ils sont abondants en milieu tropical, où ils constituent parfois plus de 90 pour cent des sables des plages, et dans les fonds marins, où l'accumulation des tests planctoniques forme un sédiment nommé boue à globigérines, du nom d'un groupe de foraminifères très répandu (voir la figure 2).

Le grand nombre de fossiles préservés, leur petite taille et leur présence dans des environnements variés en font un outil précieux pour les géologues. Parmi les 50 000 espèces fossiles, certaines ont eu une évolution rapide au cours des temps géologiques : ainsi, on peut dater les couches géologiques et établir des échelles biostratigraphiques précises. D'autres espèces avaient des exigences écologiques très strictes : à partir d'échantillons fossiles, on reconstitue l'environnement et le climat de l'époque où les organismes vivaient. Avant le développement des techniques géophysiques (sismique réflexion, sismique réfraction, etc.), ces indications fournies par les foraminifères étaient utilisées pour guider l'avancée des forages pétroliers.

Une sexualité débridée

Pénétrons maintenant à l'intérieur du test, et examinons la vie cellulaire des foraminifères. Lors de leur cycle de reproduction, voisin de celui de certaines plantes, ces organismes alternent les générations de cellules haploïdes (leurs chromosomes n'existent qu'en un seul exemplaire), nommées gamontes, et de cellules diploïdes, les agamontes (les chromosomes sont en double, comme chez la plupart des êtres vivants dotés d'une reproduction sexuée). Les agamontes se reproduisent par division du noyau et fragmentation du cytoplasme, donnant naissance à des gamontes haploïdes. Les gamètes, formés par division de ces derniers,



3. LE TEST DES FORAMINIFÈRES, vu au microscope électronique, inclut parfois des grains agglutinés, maintenus par un ciment organique qui forme des boursouflures entre les grains (a). Coupé transversalement, les tests de type « hyalins » apparaissent formés d'un empilement de lamelles (b). Entre deux loges successives, le test d'*Elphidium* montre des espaces profonds, partiellement recouverts par des ponts suturaux (flèche, c). De ces espaces, la cellule, telle celle d'*Ammonia beccarii*, émet des prolongements, les pseudopodes (d). En (e), on voit le pavage régulier qui recouvre le test de certaines quinqueloculines.

fusionnent et forment des œufs diploïdes qui se développent en donnant des agamontes. Puis le cycle redémarre.

Les agamontes sont souvent plus grands que les gamontes et possèdent une première loge, nommée proloculus, plus petite. Par ailleurs, ils sont polynucléés, c'est-à-dire que leur cellule renferme plusieurs noyaux, alors que les gamontes sont souvent uninucléés. Les noyaux des agamontes sont de deux types : les noyaux germinaux, plus petits, participent à la reproduction ; et les noyaux somatiques règlent la vie de la cellule.

Pendant la reproduction sexuée, les gamètes fusionnent, soit à l'intérieur du test du foraminifère unique qui les a produits (on parle d'autogamie), soit à l'intérieur d'une chambre d'incubation formée des tests de deux ou de plusieurs gamontes (c'est la gametogamie), soit dans l'eau lorsqu'ils sont libérés (gamétogamie).

Toutefois, ce schéma général est souvent perturbé : l'alternance des générations n'est pas toujours régulière ; le nombre de chromosomes dans les noyaux peut varier ; enfin, les foraminifères existent sous une troisième forme, nommée schizonte, à gros proloculus, qui se reproduit toujours selon un processus asexué.

Des modes de vie diversifiés

Les modes de vie des foraminifères sont aussi variés que leurs formes. Certaines espèces encroûtantes construisent leur test sur des supports solides immobiles, tels des coquilles, des galets et des coraux, sur lesquels elles sont définitivement fixées. D'autres espèces croissent sur des algues, avec lesquelles elles sont parfois transportées. Par exemple, l'algue verte *Cladophora rupestris* qui porte des foraminifères *Elphidium pulvereum*, ou encore l'algue rouge *Gigartinia acicularis*, où s'installent des espèces de *Rosalina* (voir la figure 4). Des espèces se fixent temporairement grâce à une colle organique, qu'elles dissolvent ensuite, probablement à l'aide d'une enzyme, pour se libérer.

D'autres espèces encore vivent et se déplacent librement dans le sédiment, jusqu'à cinq millimètres par heure. Parmi ces formes, certaines ont un test allongé en fuseau, tel celui de *Quinqueloculina*, qui facilite la cir-

culatation entre les grains de sable. D'autres pénètrent dans le sable grâce à la spirale de leur test qui tourne en un mouvement de vis. Leur dispersion, par leur déplacement propre, très lent, est quasi impossible. Cependant, certaines formes libres qui vivent sur le fond deviennent planctoniques pendant la reproduction : les cellules filles colonisent alors d'autres zones. Les formes qui n'ont pas cette possibilité sont dispersées par les courants marins quand ceux-ci sont assez forts pour mettre en suspension le sédiment et les organismes qu'il contient.

Enfin, des formes en permanence planctoniques flottent à l'aide de gouttelettes de lipides réparties dans leur cytoplasme. Transportés passivement par les courants, ces foraminifères se dispersent à travers les océans. Ces différentes espèces occupent des zones parallèles à l'équateur et symétriques par rapport à celui-ci. Ces zones, dont les conditions de température sont similaires, sont parfois reliées par les grands courants océaniques qui bordent les continents : les échanges qui en résultent expliquent la présence des mêmes espèces dans l'hémisphère Nord et dans l'hémisphère Sud.

Les foraminifères se déplacent parfois à la faveur d'activités humaines : certains sont accidentellement importés lors de l'implantation de mollusques d'élevage, par exemple des huîtres, et d'autres sont transportés dans les eaux de ballast des navires.

La prédation joue également un rôle dans la dispersion des foraminifères : certains survivent au transit dans le tube digestif de leur prédateur et retrouvent leur activité après leur rejet

dans les pelotes fécales. Ils sont ainsi rejetés loin de leur milieu d'origine quand les prédateurs se déplacent sur de longues distances, tels les oiseaux.

À une telle diversité de modes de vie correspond une alimentation diversifiée. Certaines espèces sont «omnivores», d'autres sont très sélectives, mais toutes consomment des bactéries.

Les espèces qui vivent sur le sédiment, entre le littoral et la plate-forme continentale, consomment principalement les bactéries et les algues microscopiques, telles les diatomées et les chlorophycées, qu'elles trouvent sur le fond. Toutefois, certaines formes se nourrissent d'algues macroscopiques : par exemple, *Rotaliella elatiana* vit sur une espèce d'*Enteromorpha*, dont elle perfore les cellules afin d'en consommer les chloroplastes.



4. DES FORAMINIFÈRES, tels *Rosalina* (en haut) et *Calcarina* (en bas), vivent sur des algues. Pour se nourrir, ils amassent parfois de la nourriture dans un «kyste de nutrition» à la périphérie du test (flèche).

Les espèces des grands fonds se nourrissent plutôt des restes d'organismes planctoniques qui tombent sur le fond. Certaines collectent les particules nutritives à la surface du sédiment avec leur réseau de pseudopodes qui s'étend jusqu'à plusieurs centimètres du test. D'autres, tels les astrophoridés, ont des tests arborescents grâce auxquels ils étendent leurs pseudopodes à plusieurs centimètres au-dessus du sédiment : ils capturent ainsi les particules en suspension dans l'eau. Près de dix pour cent de la matière organique arrivant sur le fond est ainsi recyclée par les foraminifères : ces organismes ont un rôle important dans la régulation du cycle du carbone.

Certaines espèces planctoniques, tel *Globigerinoides sacculifer*, ou certaines espèces qui vivent sur le fond, tel *Pillulina argentea*, sont des prédateurs redoutables qui capturent parfois des proies plus grosses qu'elles, notamment de petits crustacés, qu'elles fragmentent avant de les digérer. Elles utilisent leur réseau de pseudopodes à la manière d'un filet, où les proies sont piégées. *Pillulina argentea* creuse dans la vase une cavité dont l'ouverture est masquée par les pseudopodes recouverts de sédiment : les petits crustacés qui y tombent sont immobilisés par les pseudopodes, puis consommés.

D'autres se nourrissent peu, et consomment les composés organiques que les algues symbiotiques de leur cytoplasme synthétisent. Les foraminifères hôtes n'ont alors qu'à fournir l'azote

et le phosphore nécessaires aux symbiotes et à se procurer les métabolites non fabriqués par ceux-ci.

De grands foraminifères en forme de disques et abritant des algues dans le cytoplasme sont particulièrement adaptés aux environnements pauvres où ils vivent en associant plusieurs mécanismes : disposés à la surface du sédiment, ils bénéficient à la fois du flux de nutriments dissous, issus de l'action bactérienne sur la matière organique, et de l'activité photosynthétique de leurs symbiotes, favorisée par une bonne exposition à la lumière.

Enfin, les foraminifères herbivores, accrochés aux algues, captent les particules nutritives avec leurs pseudopodes, puis les rassemblent autour du test en un kyste de nutrition. Ils se nourrissent à partir de cet amas, qui en outre les protège, puis se déplacent et en reconstituent un nouveau (voir la figure 4).

Le cycle de vie des foraminifères dépend de la nourriture disponible : ainsi, dans le golfe d'Elat, au fond de la mer Rouge, un petit nombre d'individus de *Peneroplis planatus* vit habituellement dans le sédiment. Au printemps, ils se multiplient rapidement par reproduction asexuée et colonisent les feuilles des algues *Halophila*, alors en pleine croissance.

De nombreux animaux, essentiellement des invertébrés (crustacés, gastéropodes...), consomment les foraminifères. L'un des prédateurs le mieux étudié est le gastéropode *Olivella biplicata*, dont les larves se nourrissent de foraminifères

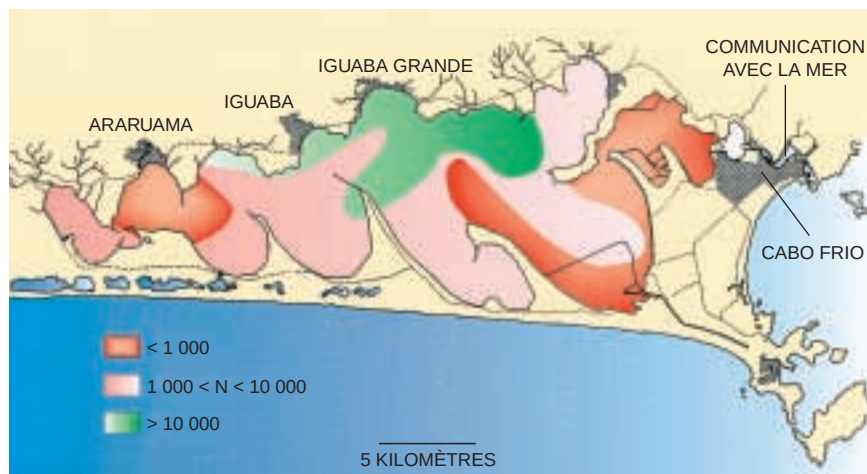
avant de changer de régime alimentaire pendant leur croissance. Leur tube digestif contient jusqu'à 60 pour cent de foraminifères, avec une concentration 1 000 fois supérieure à celle du sédiment. Cependant, les grands foraminifères qui constituent une ressource potentielle considérable sont peu consommés : des substances toxiques sécrétées par les symbiotes ou la faible quantité de matière organique par rapport au test minéralisé découragent peut-être les prédateurs.

De remarquables bio-indicateurs

Les foraminifères dont nous avons examiné ici les principales caractéristiques ont un intérêt qui dépasse la zoologie fondamentale. Dès 1839, d'Orbigny, qui relevait leur «admirable diversité et l'élégance de leur forme», insistait sur l'abondance de ces organismes qui «constituent une des classes les plus nombreuses du monde animal» et sur la facilité avec laquelle ils peuvent être récoltés et étudiés ; partout «l'observateur trouve sous ses pieds, et dans une seule pincée de sable, une grande quantité de foraminifères qu'il peut étudier avec le seul secours d'une loupe».

Une large répartition aussi bien spatiale que temporelle, ainsi qu'une grande diversité confèrent aux foraminifères la qualité d'indicateur biologique par excellence. Ils ont d'autres atouts : leur taille, comprise le plus souvent entre 0,05 et 0,5 millimètre, qui facilite une observation à la loupe sans préparation spéciale ; leur abondance dans la plupart des sédiments (jusqu'à 50 000 tests sur 100 centimètres carrés) fournit une base statistique fiable, même pour un petit volume de sédiment ; leur vie sur ou dans le sédiment, lequel reçoit et adsorbe les polluants auxquels les foraminifères sont directement exposés ; leur cycle de reproduction relativement court (quelques semaines à quelques mois), grâce auquel ils réagissent rapidement aux changements de l'environnement ; et, enfin, la conservation de leurs tests après la mort des cellules.

L'accumulation de ces tests donne une image moyenne des conditions écologiques qui règnent sur les lieux de récolte, en effaçant les variations de courtes périodes, tels les cycles de marée. Cette propriété est particulièrement intéressante dans les lagunes



5. LES MODIFICATIONS DES PEUPLEMENTS DE FORAMINIFÈRES révèlent l'impact des activités humaines sur l'environnement. Au Brésil, dans la lagune d'Araruama, les deux zones très urbanisées de Cabo Frio et d'Araruama ont un impact sur les peuplements de foraminifères, tandis que l'apport modéré d'effluents chargés de matière organique d'origine domestique au Nord de la lagune, favorise le développement de ces peuplements (les zones sont établies selon le nombre de tests dans 50 centimètres cube de sédiment).

côtières et dans les estuaires, où le milieu est extrêmement variable.

La composition des peuplements de foraminifères dépend des caractéristiques des environnements où ils vivent : à partir du peuplement contenu dans un échantillon, on peut donc reconstituer l'environnement où ils vivaient, qu'il s'agisse d'un environnement actuel ou fossile.

Notre équipe étudie les foraminifères qui vivent sur le sédiment près des côtes et, notamment, dans les estuaires, les lagunes et les ports. Dans ces environnements, les conditions changent constamment avec le cycle de la marée : les caractéristiques environnementales ne peuvent donc pas être définies par des analyses chimiques ponctuelles qui, de plus, ne détectent qu'une partie des éléments présents dans le milieu.

À l'inverse, les foraminifères que nous étudions se déplacent peu sur le fond : ils réagissent à l'ensemble des conditions qui se succèdent au cours de cycles de différentes périodes (marées, saisons). Les peuplements qui s'adaptent intègrent toutes les variables et donnent une image moyenne des conditions environnementales. C'est un des atouts majeurs des foraminifères.

Du peuplement à l'individu

À partir d'échantillons régulièrement prélevés, on établit un schéma de répartition des différentes espèces de foraminifères pour chaque type d'environnement, par exemple les estuaires. Grâce à ce schéma de référence, on situe les échantillons prélevés lors d'études ultérieures selon leur position écologique et l'on obtient une évaluation rapide des caractéristiques moyennes de l'environnement. Ces évaluations sont utiles aux projets d'aménagement ou de mise en valeur de ces milieux très changeants.

Au-delà de leur simple répartition, des espèces réagissent individuellement aux caractéristiques locales du milieu, devenant pour l'écologie des « espèces indicatrices », encore nommées « espèces index ». L'étude de ces espèces et des modifications des peuplements permet d'évaluer les caractéristiques globales de l'environnement et de détecter les stress d'origine naturelle ou humaine. Par exemple, notre équipe intervient en Guyane, dans le cadre du Programme

national d'écologie côtière (PNEC) : à partir des foraminifères, nous participons à l'exploration de la dynamique des bancs de vase, issus de l'Amazonie, qui se déplacent le long du littoral en modifiant constamment la morphologie côtière.

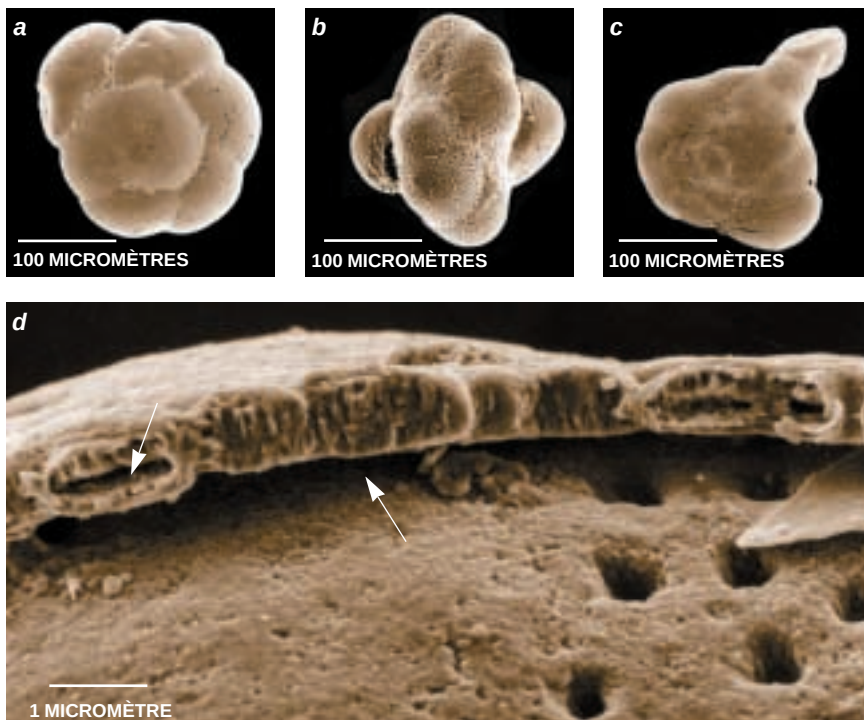
Dans la lagune d'Araruama, près de Rio de Janeiro, une étude menée en collaboration avec l'Institut océanographique de São Paulo a montré que le nombre d'espèces et le nombre d'individus diminuent fortement dans les sites soumis à l'impact des deux principales zones de résidence que sont Cabo Frio, d'une part, et Araruama et Iguabinha, d'autre part. Toutefois, au Nord de cette même lagune, des rejets modérés de zones de résidence de moindre importance ont un effet bénéfique sur les peuplements de foraminifères (voir la figure 5). En présence de rejets de matière organique ou de polluants, une espèce tolérante se développera, alors que des espèces sensibles disparaîtront.

Grâce aux mêmes méthodes, on reconstitue des environnements anciens à partir de foraminifères fossilisés. De plus, on retrace l'évolution historique des environnements, dont l'effet des activités humaines. Ainsi, les peuplements de foraminifères étudiés dans des forages effectués dans la baie de Bourgneuf, en Vendée, ont mis en évidence l'impact des activités ostréicoles.

Par ailleurs, les effets du développement industriel ont été étudiés dans l'estuaire de Bilbao, par une équipe espagnole. L'étude de carottes de forage a mis en évidence la raréfaction des peuplements de foraminifères depuis 40 ans. Néanmoins, dans l'estuaire, des zones refuges, protégées de la pollution, abritent quelques espèces prêtes à recoloniser le milieu lorsque la qualité de l'environnement s'améliorera.

Des anomalies

Une autre utilisation des foraminifères en tant que bio-indicateurs est fondée sur les anomalies morphologiques qui affectent parfois leur test à la suite d'un stress. On rencontre principalement des protubérances, des tailles de loges réduites, des formes anormales, des tests doubles ou triples... Ces anomalies sont soit d'origine mécanique, telle la régénération après cassure partielle du test par des prédateurs ou par



6. LES FORAMINIFÈRES sont sensibles aux stress environnementaux d'origine naturelle ou résultant d'activités humaines : le test d'*Ammonia tepida* normal est une spirale (a), alors que les tests prélevés dans la lagune d'Araruama, au Brésil, ont soit deux plans d'enroulement (b), soit des loges surnuméraires hors de l'enroulement normal (c). Les lacunes observées (flèches) entre les lamelles du test (d) d'un individu de la même espèce sont similaires à celles qui ont été observées à la suite de la marée noire de l'*Amoco Cadiz*.

les courants, soit d'origine écologique (voir la figure 6).

Dans les années 1960 à 1970, selon certains zoologistes, les anomalies morphologiques du test des foraminifères résultaient de variations environnementales naturelles, telles celles de la salinité. Toutefois, depuis les années 1980, la plupart des études mettent l'accent sur l'effet des activités humaines, telle la pollution par les métaux lourds ou par les hydrocarbures. Les tests anormaux sont reconnus comme des indicateurs de stress environnementaux dus à des causes naturelles ou à la pollution.

En collaboration avec l'Institut océanographique de São Paulo, nous avons étudié les anomalies morphologiques des tests de foraminifères dans l'estuaire de Santos-São Vicente, dans l'État de São Paulo (Brésil). Ce système côtier est très sensible aux activités industrielles, telles celles du parc industriel de Cubatão, aux activités portuaires (le port de Santos est le plus grand port d'Amérique latine) et aux activités touristiques. Parallèlement, des analyses chimiques du sédiment ont montré l'importance de la contamination du milieu par les rejets domestiques, par les hydrocarbures et par les métaux lourds.

Sur 59 échantillons étudiés, seuls cinq avaient des proportions de malformations supérieures à cinq pour cent. Ces fortes proportions ont été le plus souvent localisées dans les mangroves en amont du système estuarien, soit à proximité de la zone industrielle de Cubatão. Ces mangroves sont des lieux de stockage des substances contaminantes ; elles sont aussi soumises à de fortes variations de salinité et de température.

Jean-Pierre DEBENAY, Emmanuelle GESLIN et Véronique STOUFF travaillent au Laboratoire d'étude des bio-indicateurs marins de l'île d'Yeu, qui dépend du Laboratoire de géologie EA 2644 de l'Université d'Angers.

J.-P. DEBENAY, J. PAWLOWSKI et D. DECROUEZ, *Les foraminifères actuels*, Éditions Masson, Paris, 1996.

J.-P. DEBENAY, J.-J. GUILLOU et M. LESOURD, *Cristallogénèse de la calcite d'origine colloïdale dans les tests de foraminifères*, in *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, t. 323, série IIa, pp. 171-178, 1996.

E. GESLIN, J.-P. DEBENAY et M. LESOURD, *Abnormal textures in the Wall of Deformed Tests of Ammonia (Hyaline foraminifer)*,

Dans la même région, des études parallèles ont été effectuées dans une réserve écologique protégée de toute pollution humaine. Toutefois, jusqu'à 29 pour cent des tests observés avaient des formes anormales : un stress naturel, engendré par l'acidité des eaux saumâtres qui envahissent la zone pendant la saison des pluies, a été mis en évidence.

Caractérisée par son hypersalinité permanente, la lagune d'Araruama abrite des foraminifères dont 3 à 22 pour cent (selon les espèces) ont des tests anormaux. Ces valeurs élevées s'expliquent probablement par l'hypersalinité et les variations de salinité : les valeurs les plus faibles sont celles relevées dans la partie centrale de la lagune, alors que les valeurs les plus élevées ont été mesurées à l'Ouest et à l'Est, où se produisent les plus fortes variations physico-chimiques, car les apports en eaux douces ou en eau marine moins salée y sont les plus importants. Ainsi, des anomalies morphologiques révèlent un stress, mais n'en déterminent pas l'origine, naturelle ou humaine.

Une instabilité ou une modification brusque du milieu s'accompagnent toujours d'une forte quantité de malformations : des études effectuées après la catastrophe de l'*Amoco Cadiz*, sur le littoral des Côtes d'Armor, ont montré de telles anomalies des tests, notamment le décollement des lamelles successives qui les constituent et la formation de lacunes. Les foraminifères sont ainsi précieux dans le suivi d'épisodes catastrophiques telles les pollutions accidentelles de type marée noire.

in *Journal of Foraminiferal Research*, vol. 28, n° 2, pp. 148-156, 1998.

V. STOUFF, J.-P. DEBENAY et M. LESOURD, *Double and Multiple Tests in Benthic Foraminifera*, in *Marine Micropaleontology*, vol. 36, n° 4, pp. 189-204, 1999.

A. CEARRETA, M.J. IRABIEN, E. LEORRI, I. YUSTA, I.W. CROUDACE et A.B. CUNDY, *Recent Anthropogenic Impacts on the Bilbao Estuary, Northern Spain : Geochemical and Microfaunal Evidence*, in *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n° 50, pp. 571-592, 1999.

M.T. VÉNEC PEYRÉ, *Les foraminifères et la pollution : étude de la microfaune de la Cale de Dourduff (Embouchure de la rivière de Morlaix)*, in *Cahiers de biologie marine*, n° 22, pp. 25-33, 1981.

