

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.

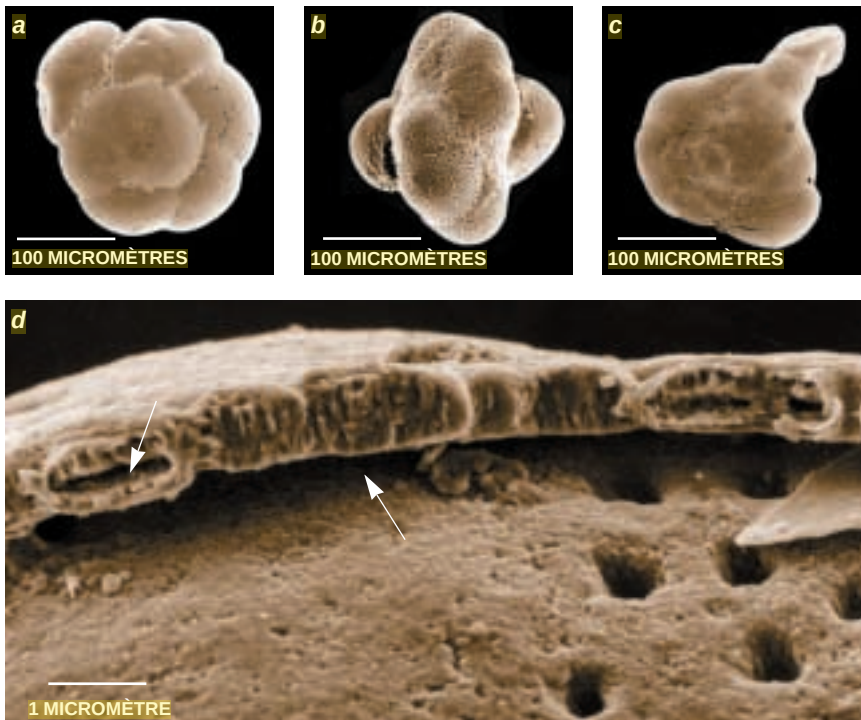
Dans la lagune d'Araruama, près de Rio de Janeiro, une étude menée en collaboration avec l'Institut océanographique de São Paulo a montré que le nombre d'espèces et le nombre d'individus diminuent fortement dans les sites soumis à l'impact des deux principales zones de résidence que sont Cabo Frio, d'une 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'accompagne 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.