

Nous avons commencé nos analyses en nous concentrant sur un oxydant particulièrement efficace, l'ozone (O_3). Ce gaz est connu pour protéger la Terre du rayonnement ultraviolet émis par le Soleil. En raison des transformations chimiques subies par certains gaz en présence de cet intense rayonnement solaire, l'ozone se caractérise par une anomalie de sa signature isotopique en oxygène qui, en termes simples, peut être vue comme un excès d'oxygène 17.

Lorsque l'ozone ou toute autre molécule stratosphérique riche en oxygène interagit avec le dioxyde de soufre SO_2 , elle transfère sa signature isotopique en oxygène à l'acide résultant – autrement dit, l'anomalie de l'oxygène 17 persiste dans l'acide nouvellement formé. En 2003, des géochimistes de l'Université de Californie, à San Diego, ont trouvé des preuves que cette signature est également préservée dans les pluies acides et dans les composés sulfatés qui se forment lorsque ces pluies réagissent avec des cendres sur le sol.

L'excès d'oxygène 17 et d'autres signatures chimiques que nous avons découverts dans les sulfates des cendres de Yellowstone et de Long Valley signifient ainsi que de grandes quantités d'ozone stratosphérique ont participé aux réactions impliquant les gaz issus des superéruptions survenues dans ces régions. D'autres chercheurs étudiant les cendres d'éruptions géantes plus anciennes dans le Colorado et le Nebraska ont démontré que ces événements ont également grignoté l'ozone stratosphérique. Les superéruptions volcaniques endommageraient ainsi la couche d'ozone pendant un laps de temps plus long que ne dure leur impact sur les températures.

Une perte significative d'ozone stratosphérique se traduirait par une intensification du rayonnement ultraviolet à la surface de la Terre et, *in fine*, par une augmentation des cancers et autres dégâts génétiques. L'ampleur et la durée de cette destruction de l'ozone sont encore controversées. L'examen de carottes glaciaires montre que l'éruption du mont Pinatubo, en 1999, a entraîné une diminution de trois à huit pour cent de la quantité d'ozone. Que se serait-il passé après un événement des centaines de fois plus violent ? La réponse n'est pas simple, car les processus d'oxydation atmosphérique sont fort complexes et encore mal compris.

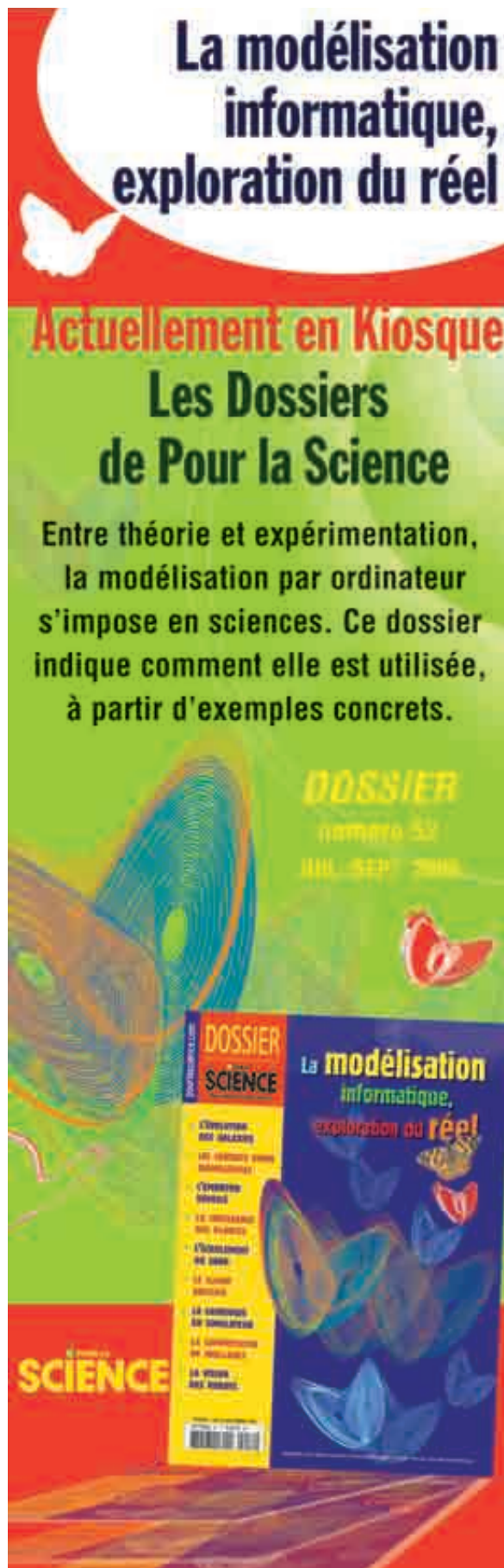
Les techniques d'étude et de surveillance des volcans se développent lentement, mais sûrement. En l'état actuel des connaissances, nous sommes incapables de parer à une superéruption, et ce que nous pouvons dire sur les conséquences d'une telle catastrophe reste encore de l'ordre de la spéculation. Seule certitude : une telle catastrophe ne surviendra pas avant longtemps.

Ilya BINDEMAN est professeur de géochimie à l'Université de l'Oregon, aux États-Unis.

I. BINDEMAN, J. EILER, B. WING et J. FARQUHAR, *Rare sulfur and triple oxygen isotope geochemistry of volcanologic sulfate aerosol*, in *Earth and planetary science letters*, à paraître.

B. HUIMING, M. THIEMENS, D. LOOPE et X.-L. YUAN, *Sulfate oxygen-17 anomaly in an oligocene ash bed in mid-north america : was it the dry fogs ?*, in *Geophysical research letters*, vol. 30, pp. 1843-1848, 2003.

I. BINDEMAN et J. VALLEY, *Magmatic evolution based on analyses of zircons and individual phenocrysts*, in *Journal of petrology*, vol. 42, pp. 1491-1517, 2001.



La vie d'une marée à

Les organismes de la zone littorale soumise aux marées affrontent des variations considérables de leurs conditions de vie selon que la mer est haute ou basse.

Le plus grand inventaire de ces espèces jamais mené en France commence : c'est l'occasion d'examiner les stratégies qu'elles déploient pour survivre.

François Lallier • André Toulmond

Cet été, peut-être fréquentez-vous les plages de nos côtes, notamment celles de l'Atlantique et de la Manche où, deux fois par jour, la mer se retire et découvre une large zone. Là, sur et sous le sable, sur et sous les rochers, vivent des animaux marins tels le crabe vert ou le bigorneau, qui doivent affronter chaque jour la disparition de leur milieu naturel, l'eau (voir la figure 1). Ces animaux qui subissent les marées suscitent un regain d'intérêt et font aujourd'hui l'objet de l'inventaire le plus exhaustif jamais réalisé sur le littoral français. Il a été lancé après le naufrage de l'*Erika*, quand les biologistes se sont rendu compte qu'il n'existait pas, pour évaluer avec exactitude l'impact de la pollution, de description suffisamment précise de la faune et de la flore colonisant les zones touchées.

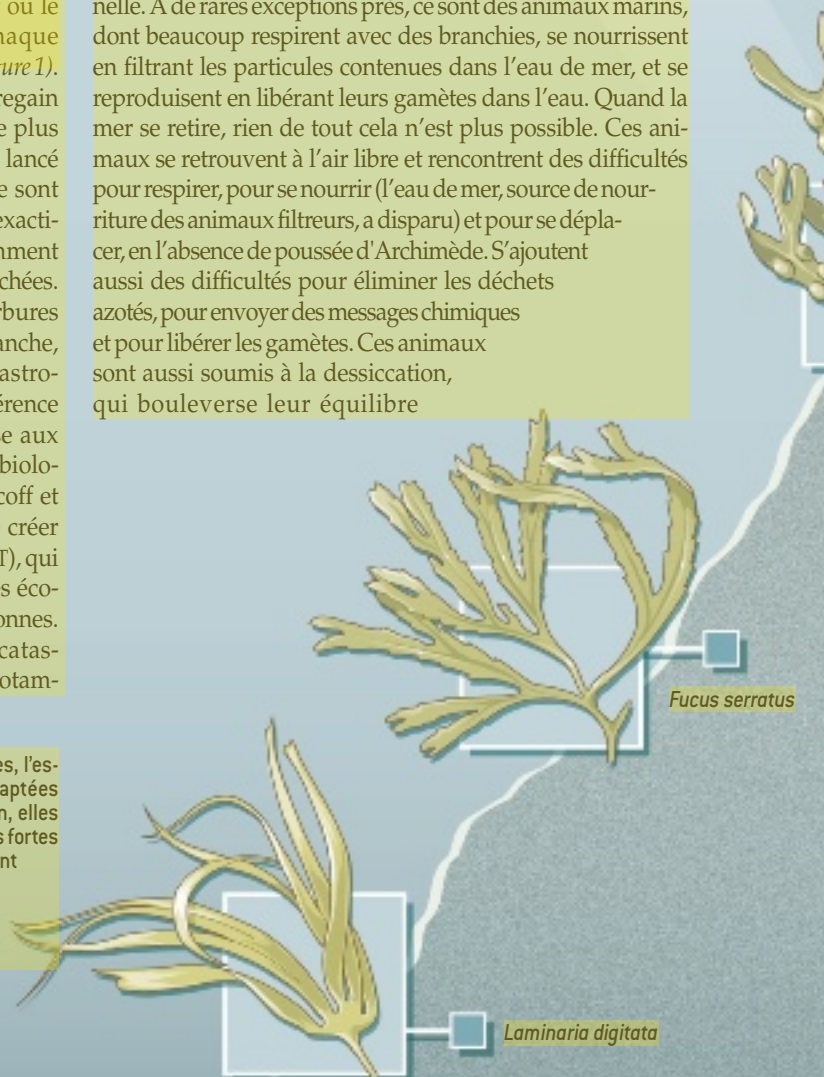
Suite à un naufrage, tant que la nappe d'hydrocarbures flotte, les dégâts qu'elle cause restent modérés. En revanche, dès qu'elle se dépose sur la côte, les effets sont catastrophiques, mais difficiles à expertiser sans état de référence fiable. Or les dernières études sur la faune soumise aux marées sont éparpillées et datent des années 1960. Les biologistes de l'IFREMER, de la Station biologique de Roscoff et des Universités de Brest et de Rennes ont décidé de créer un réseau de surveillance, le réseau benthique (REBENT), qui a pour objectif d'établir un état des lieux complet des écosystèmes benthiques sur plus de 70 sites des côtes bretonnes. Il servira à estimer l'impact d'éventuelles futures catastrophes, mais aussi à suivre l'évolution des espèces, notam-

ment de leur répartition en fonction des changements climatiques (voir la figure 2). Cette année, le réseau va être étendu au reste des côtes françaises.

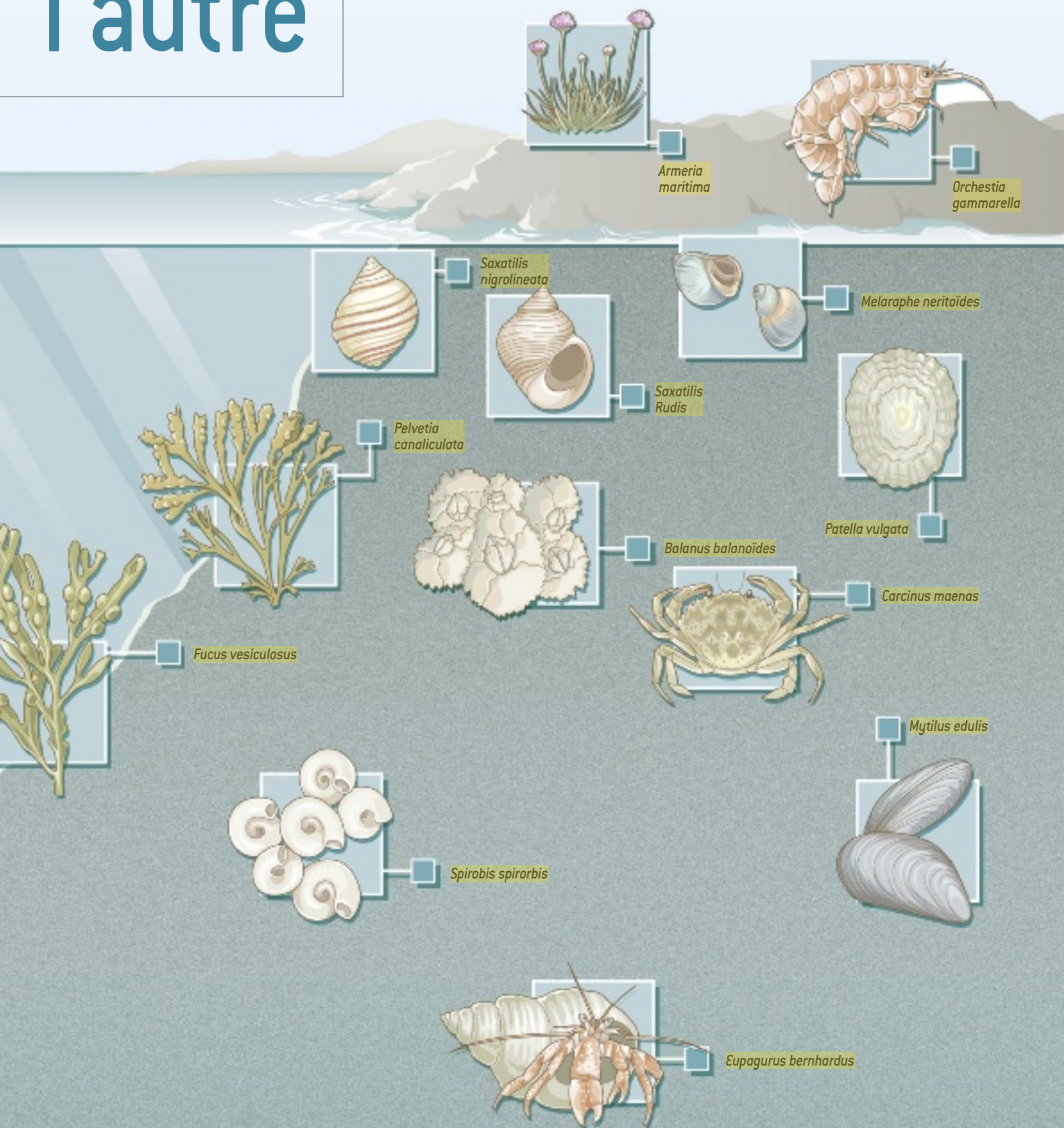
Les animaux qui vivent dans la zone soumise aux marées (zone intertidale ou estran) sont d'une richesse exceptionnelle. À de rares exceptions près, ce sont des animaux marins, dont beaucoup respirent avec des branchies, se nourrissent en filtrant les particules contenues dans l'eau de mer, et se reproduisent en libérant leurs gamètes dans l'eau. Quand la mer se retire, rien de tout cela n'est plus possible. Ces animaux se retrouvent à l'air libre et rencontrent des difficultés pour respirer, pour se nourrir (l'eau de mer, source de nourriture des animaux filtreurs, a disparu) et pour se déplacer, en l'absence de poussée d'Archimède. S'ajoutent aussi des difficultés pour éliminer les déchets azotés, pour envoyer des messages chimiques et pour libérer les gamètes. Ces animaux sont aussi soumis à la dessiccation, qui bouleverse leur équilibre

1. Les espèces qui vivent dans la zone soumise aux marées, l'estran, sont, pour la majorité, des espèces marines, qui se sont adaptées à des conditions aériennes passagères. Dans le bas de l'estran, elles sont à l'air libre pendant seulement quelques heures lors des plus fortes marées basses de l'année. En revanche, plus haut, elles doivent affronter des conditions extrêmes (disparition de l'eau, chocs thermiques...) d'autant plus longtemps qu'elles se situent à proximité de la frange supérieure. Là, les espèces deviennent plus rares.

Delphine Bailly



l'autre



hydrominéral, au risque d'insolation, à des chocs thermiques, notamment lors de l'émersion, et à une salinité variable. Enfin, la marée basse expose les habitants de la zone intertidale aux prédateurs, le plus souvent des oiseaux ou des crabes « terrestres ». Même dans les quelques endroits où l'eau de mer subsiste (flaques, écoulements, eau résiduelle dans les sédiments meubles), les animaux conservent un peu de leur milieu aquatique, mais ils s'y retrouvent confinés : l'oxygène vient donc à manquer et l'équilibre acido-basique du milieu est perturbé, notamment lorsque la biomasse végétale ou microbienne est importante...

Les animaux de la zone intertidale sont confrontés à des conditions de vie extrêmes, plus contraignantes à mesure que l'on se rapproche de la partie haute de la zone intertidale, celle qui est sèche le plus longtemps. Seules des espèces sélectionnées et tolérantes (euryèces), adaptées à une certaine forme de vie amphibie, peuvent y vivre. Ces espèces sont peu nombreuses, mais comptent une grande densité d'individus, ce phénomène s'accroissant en haut de l'estran. Trouver sa place, respirer, lutter contre la dessiccation et se reproduire requièrent des adaptations hors du commun, parfois uniques en leur genre.

Le plus souvent, les animaux intertidaux sont adaptés aux conditions régnant à un niveau bien précis de l'estran. Cela est surtout vrai pour les espèces du haut de l'estran dont beaucoup sont paradoxalement incapables de supporter une immersion continue. Parmi elles, figurent quelques espèces terrestres qui supportent d'être aspergées régulièrement par l'eau de mer, par exemple la ligie (*Ligia oceanica*), un arthropode proche des cloportes. On trouve

également des espèces marines qui ne supportent plus d'être continuellement immergées, telle la petite littorine *Melaraphe neritoides* (une cousine du bigorneau) qui, placée dans un récipient d'eau de mer, en gravit « rapidement » les parois pour se placer hors de l'eau.

Trouver et garder sa place

Les espèces intertidales conservent un positionnement optimal grâce à des adaptations anatomiques et comportementales, notamment lors du passage de la vie larvaire ou juvénile à la vie adulte. C'est le cas des balanes des niveaux supérieurs, ces petits crustacés (Cirripèdes) enfermés dans leur muraille calcaire, solidement et définitivement fixée au rocher. Leurs larves évoluent dans le plancton marin jusqu'au stade où, lors d'une marée haute, elles sont attirées par les phéromones sécrétées par les adultes et par les propriétés physico-chimiques du substrat. Elles se fixent alors sur le rocher adéquat grâce à une glande adhésive et commencent une mue pour se métamorphoser en jeune balane. Ainsi, dans les zones favorables, chaque millimètre carré est colonisé et les individus, tassés les uns contre les autres, grandissent en hauteur, ce qui leur confère une morphologie différente de celle des individus isolés. De même, les spirorbes, des petits vers Annélides vivant dans un tube calcaire enroulé en spirale, ont des larves attirées par les pierres ou par les frondes des *Fucus*, des algues brunes abondantes dans la zone intertidale, quand celles-ci sont couvertes d'un film bactérien. Les ascidies coloniales (des organismes filtreurs également fixés au substrat) ont elles

Un tremplin vers la vie terrestre ?

L'origine de la vie est sans conteste marine, mais deux voies sont possibles pour coloniser le milieu terrestre : directement de la mer à la terre, via la zone intertidale, ou indirectement après un passage par les eaux douces des fleuves ou des marais. Ce changement radical de milieu de vie modifie d'abord la respiration, l'équilibre hydrique et ionique, ainsi que l'excrétion azotée, puis la régulation thermique, la locomotion, et enfin, la reproduction. En fait, seuls deux grands groupes ont réussi cette colonisation du milieu aérien : les vertébrés et les arthropodes. Deux autres groupes ont eu un succès plus limité : les annélides et les mollusques.

Pour les vertébrés, la transition de « poisson » à « tétrapode » s'est probablement déroulée en partie dans l'eau douce. Les élipistostégaliens, un groupe fossile de sarcoptérygiens (la classe de poissons osseux comprenant les coelacanthes et les dipneustes), vivant en eau douce il y a 370 millions d'années, constituent sans doute le groupe frère des tétrapodes. Par ailleurs, tous les téléostéens actuels (les poissons osseux) ont eu un ancêtre vivant en eau douce : en effet, la concentration osmotique de leur milieu intérieur est trois fois inférieure à celle de l'eau de mer, alors que celle des autres espèces marines est équivalente. Cela laisse supposer pour les téléostéens marins un retour à la mer, après un passage en eau douce.

Les insectes sont probablement issus de crustacés et seraient sortis de l'eau encore plus tôt (plus de 400 millions d'années), grâce à des « inventions » originales : la respiration trachéenne (les tra-

chées sont de fins canaux qui assurent le transport de l'air jusqu'aux cellules) et l'osmorégulation par une glande rectale qui évacue les excès de sels.

Chez certains crabes, nous assistons actuellement à un passage de la vie marine à la vie terrestre : les crabes terrestres, communs en zone intertropicale, ne sont pas encore complètement indépendants du milieu aquatique, notamment pour la reproduction, comme en témoignent les migrations massives des forêts vers le rivage des crabes rouges de Christmas Island. Ces crabes terrestres sont, pour la plupart, d'origine marine, transformant leur chambre branchiale, de plus en plus étanche, en véritable poumon avec des branchies réduites et une vascularisation accrue des parois. Leur excrétion azotée évolue également vers la production d'acide urique, qu'ils éliminent sous forme de cristaux, au lieu de l'ammoniac, rapidement toxique en l'absence d'eau.



Hee Chee Seng/Shutterstock