

> plomb...) ainsi que les radicaux libres (des molécules très instables et très réactives) formés lors de l'oxydation du fer et du sulfure accompagnent d'importantes fluctuations de température. La croissance rapide de son tube, indispensable protection contre ces fluides agressifs, contrebalance l'épaississement des parois de la cheminée, qui emprisonne progressivement la base du tube.

UNE ESPÈCE INGÉNIEUR

Cette pionnière est aussi une espèce «ingénieur» : ses colonies denses forment peu à peu une sorte de «revêtement isolant» sur les parois des fumeurs noirs. Les conditions beaucoup plus stables et moins toxiques qui en résultent autoriseraient l'installation d'autres espèces animales sur ces parois.

Hors des zones les plus chaudes, privilégiées par *Alvinella pompejana*, s'échappent parfois des fluides dilués par l'eau de mer lors de leur passage au travers du réseau de fissures et de roches poreuses, et qui ont des températures plus compatibles avec la vie. Parfois situées à la base ou sur les flancs des cheminées, ces émissions de basse température se rencontrent aussi sur le plancher de laves basaltiques (ce sont les sources diffuses déjà évoquées). Bien que très dilués, ces fluides restent enrichis en sulfure et favorisent le développement d'assemblages denses et prolifiques d'invertébrés et de bactéries chimio-autotrophes.

On peut comparer l'environnement fluctuant des sources diffuses à celui de la zone intertidale (la partie du littoral alternativement dévoilée et recouverte par la marée). Cette comparaison est d'autant plus pertinente que la marée influe aussi sur les caractéristiques de l'environnement hydrothermal, à plus de 2000 mètres sous la surface. En effet, elle crée des courants de fond, auxquels se superposent les turbulences du mélange entre l'eau de mer et le fluide, de sorte qu'en un point donné, la température peut varier de plusieurs degrés en quelques heures, voire minutes. Ces fluctuations de la température s'accompagnent d'une alternance entre phases riches en oxygène et phases riches en sulfure, due aux variations des courants. Cet environnement est favorable aux symbioses chimio-synthétiques, où les partenaires profitent mutuellement de leurs capacités à utiliser les ressources disponibles.

Comme tous les animaux multicellulaires, les espèces endémiques des sources hydrothermales maintiennent constants leurs paramètres physicochimiques en dépit des variations du milieu externe. En outre, certains invertébrés hydrothermaux absorbent l'oxygène et le sulfure de leur environnement, qu'ils concentrent en les fixant sur leur hémoglobine pour les transporter vers différents organes ; ils font alors bénéficier leurs bactéries symbiotes



Le site de *Lost City* (la cité perdue) sur la dorsale Atlantique doit son nom à la quasi-absence d'animaux chimiosynthétiques qui prospèrent sur les autres sources hydrothermales. Les fluides sont pourtant aussi riches en hydrogène, en méthane et, dans une moindre mesure, en sulfures, mais ils se distinguent par leur pH : 10 à *Lost City* contre 2 à 6 ailleurs. En conséquence, ils ne dissolvent pas les métaux lors de leur passage dans les roches du plancher océanique. Les fumeurs noirs sont alors remplacés par des édifices blancs de carbonates de calcium et de magnésium.

d'un milieu particulièrement riche en ces deux éléments. Ainsi le ver *Riftia pachyptila*, comme les autres espèces du genre sibloglinidé, abrite des populations de bactéries sulfo-oxydantes dans son trophosome, un organe interne situé dans la partie blanche de son «tube». En retour, l'animal en dépend totalement : elles transforment le sulfure d'hydrogène et le dioxyde de carbone en composés essentiels.

L'efficacité de ces symbioses est révélée par les taux de croissance exceptionnels des individus – presque un mètre par an – et de leurs populations. La concentration intracorporelle en sulfure du fluide interne de *Riftia pachyptila* peut atteindre plusieurs dizaines de milligrammes par litre, bien au-delà de sa teneur maximale dans l'environnement et des seuils de tolérance de la plupart des animaux ; il y résiste notamment en «sélectionnant» ses formes les moins toxiques et en fixant le sulfure sur son hémoglobine pour le transporter jusqu'aux bactéries. Sa capacité à fixer le sulfure et l'oxygène explique vraisemblablement son taux de croissance record.

L'assimilation du sulfure dépend cependant de sa forme chimique dans l'environnement immédiat de la branchie de l'animal. Seul le sulfure d'hydrogène passe la membrane branchiale. Or cette propriété peut être «neutralisée» par le fer du fluide, qui a une forte affinité pour le sulfure, avec lequel il s'associe pour former des complexes bloqués par la membrane. En outre, le fer accélère l'oxydation spontanée du sulfure, le rendant inexploitable pour les organismes vivants.

Se pose aussi le problème de la toxicité. Des deux formes acide et basique du sulfure d'hydrogène (H_2S et HS^-), H_2S est la plus toxique du fait de sa capacité à diffuser au travers des membranes biologiques et à inhiber le fonctionnement cellulaire. HS^- prédomine dans l'eau de mer faiblement alcaline, mais l'acidité

du fluide hydrothermal, même en petite quantité, augmente notablement la proportion de sulfure toxique H_2S aux alentours des sources. Certaines espèces, tel *Riftia pachyptila*, semblent éviter par des adaptations biochimiques la diffusion d' H_2S à l'intérieur de leur branchie, alors que la forme moins toxique HS^- est assimilée. D'autres organismes, tels les bivalves du genre *Bathymodiolus*, sont protégés par des bactéries symbiotes qui consomment le sulfure directement dans leur branchie.

En plus d'être extrêmes, les environnements hydrothermaux sont soumis à de violentes perturbations naturelles. Les plus spectaculaires sont les éruptions volcaniques majeures, qui couvrent de lave un grand nombre de sites et suppriment toute trace de vie. Après ces épisodes, la vie se réinstalle vite autour des sources, selon une séquence de recolonisation qui dure quelques années.

POMPEÏ SOUS LES MERS

Les tapis microbiens réapparaissent en premier. En moins d'un an, ils sont rejoints par des espèces pionnières telle *Tevnia jerichonana*, un ver apparenté à *Riftia pachyptila*. La suite est plus variable: ces espèces prospèrent ou laissent la place à d'autres qui deviennent à leur tour dominantes, mais les populations déclinent parfois et s'éteignent. La recolonisation s'accompagne de changements rapides dans la composition des fluides, et donc dans les formes d'énergie disponibles, ainsi que dans les contraintes de température et de toxicité. Le rôle de ces changements sur les successions observées reste l'une des grandes questions actuelles; en particulier, les conditions qui favorisent une espèce symbiotique plutôt qu'une autre sont débattues, faute de bien connaître les besoins physiologiques des différentes espèces et de leurs bactéries symbiotes.

Des événements moins violents que les éruptions volcaniques conduisent aussi à l'extinction locale des populations. Ainsi, un phénomène de séparation de phase se produit parfois à plusieurs centaines de mètres sous le plancher océanique: une fraction du fluide, concentrée en éléments lourds (sels, métaux...), se condense sous forme de saumure, tandis qu'une fraction plus légère, enrichie en composés volatils (sulfure d'hydrogène, hydrogène, méthane...), remonte à la surface. La composition des fluides hydrothermaux change alors au cours du temps, les éléments les plus volatils étant émis en premier et les plus lourds ensuite. Lorsque la fraction légère riche en sulfure s'épuise, les espèces symbiotiques, dont c'est la ressource principale, disparaissent.

Nous l'avons vu, la composition des fluides dépend des roches à travers lesquelles ils passent. Or dans certains cas, ces roches sont

celles du manteau terrestre: situées sous la croûte, elles sont le plus souvent loin de la surface et inaccessibles aux fluides, mais parfois, déplacées par des forces tectoniques, elles s'en rapprochent, allant jusqu'à affleurer sur les fonds marins. Très réactives, les roches du manteau s'altèrent au contact de l'eau. Ce phénomène, nommé serpentinitisation, produit de l'hydrogène en grande quantité, qui réagit lui-même spontanément à haute température et haute pression avec le CO_2 pour former du méthane. Ces deux composés constituent des sources d'énergie alternatives au sulfure pour les communautés chimiosynthétiques peuplant les sources hydrothermales.

MÉTHANE ET SULFURE AU MENU

Sur le site *Rainbow*, au sud des Açores, où les fluides sont très concentrés en fer et les sulfures libres quasi absents de l'environnement, le méthane constitue par exemple la source d'énergie principale de la moule *Bathymodiolus azoricus*. Celle-ci est aussi associée à des bactéries sulfo-oxydantes, et cette double symbiose lui permet de proliférer sur de nombreux sites de la dorsale Atlantique, aux teneurs variables en méthane et en sulfure.

Outre *Rainbow*, plusieurs sites hydrothermaux sont situés sur des roches serpentinitisées: *Logatchev*, *Ashadze*... Ce dernier, découvert en 2007 par une équipe franco-russe, est le plus profond, à 4000 mètres sous la surface. Sur les dorsales océaniques au volcanisme peu actif, qualifiées de lentes, ces environnements offrent une large gamme d'habitats aux populations chimiosynthétiques, dont la croissance et l'extinction sont rythmées par la durée de vie des sources, souvent éphémères. Sur certains sites, les fluides sont non pas acides, mais basiques. Les fumeurs noirs sont alors remplacés par de spectaculaires «cités blanches» (voir la figure page ci-contre). Celles connues aujourd'hui sont principalement peuplées de microorganismes, mais elles pourraient avoir abrité des faunes macroscopiques abondantes.

Les sites hydrothermaux offrent donc de multiples preuves des spectaculaires facultés d'adaptation des organismes, mais ce n'est pas leur seul intérêt. Ils représentent aussi des réserves potentielles d'hydrogène pour nos sociétés humaines à la recherche d'énergies non polluantes. ■

Les sites hydrothermaux recèlent des réserves potentielles d'hydrogène

BIBLIOGRAPHIE

S. TOXVAERD, A Prerequisite for Life, *J. Theor. Biol.*, vol. 474, pp. 48-51, 2019.

E. BAKER ET AL., How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 449, pp. 186-196, 2016.

J. RESING ET AL., Basin-scale transport of hydrothermal dissolved metals across the South Pacific Ocean Nature, vol. 523, pp. 200-203, 2015.

N. LE BRIS ET F. GAILL, How does the annelid *Alvinella pompejana* deal with an extreme hydrothermal environment ?, in *Rev. in Env. Sc. Biotech.*, vol. 6, pp. 197-221, 2007.