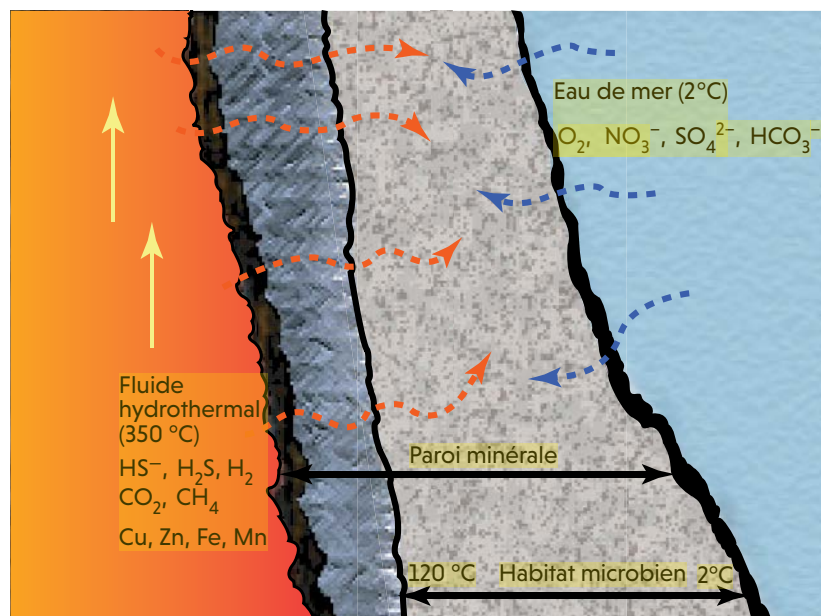




sont transportés sous forme dissoute sur de longues distances et profitent donc à des organismes plus éloignés.

Les cheminées hydrothermales atteignent 10 à 20 mètres de hauteur et plusieurs mètres de diamètre. Dans ces assemblages de conduits et de roches poreuses qui séparent l'eau de mer et le fluide, la température et les conditions chimiques varient fortement. Dépassant le plus souvent 300 °C au contact du fluide, la température de la roche n'est plus que de quelques degrés ou dizaines de degrés du côté opposé.

C'est à l'intérieur des parois de ces cheminées qu'ont été découverts les organismes les plus



Les parois minérales des fumeurs noirs sont poreuses, de sorte que les espèces chimiques des fluides hydrothermaux et de l'eau de mer diffusent à l'intérieur (flèches pointillées orange et bleues). Elles alimentent une riche vie microbienne, capable de survivre jusqu'à 120 °C.

résistants aux fortes températures. Le record est détenu par l'archéobactérie *Pyrolobus fumarii*, isolée dans une cheminée sur la dorsale Atlantique: elle supporte une température d'environ 120 °C. Au-delà, aucun organisme ne semble résister, de sorte que la zone de la cheminée la plus proche du fluide est dépourvue de vie (voir la figure ci-dessous). À partir de ce seuil de température, et jusqu'à la face externe, la paroi minérale abrite une succession de communautés microbiennes réparties selon leur tolérance thermique et de leurs besoins énergétiques.

UN HÉRITAGE LOINTAIN

La diffusion de molécules dans les parois poreuses conditionne les sources d'énergie disponibles. La plupart des composés oxydants, tels l'oxygène, les nitrates et les sulfates, proviennent de l'eau de mer; depuis l'extérieur, ils migrent au travers de la paroi où ils sont progressivement consommés. Aux plus hautes températures, vers l'intérieur de la cheminée, seul reste du CO₂ apporté par le fluide. Les archées hyperthermophiles dites méthanogènes le convertissent en méthane (CH₄) en utilisant de l'hydrogène; ce sont les seuls organismes à ne dépendre que du fluide hydrothermal. Leur métabolisme pourrait être hérité des plus anciennes formes de vie, apparues lorsque les océans étaient dépourvus d'oxygène. Certains voient même dans les conditions régnant près des sources hydrothermales, celles qui ont favorisé la naissance de la vie.

Le gradient de température à l'intérieur des parois minérales est relativement stable. À l'inverse, la région du mélange entre le fluide et l'eau de mer est une zone turbulente, où les conditions chimiques et la température fluctuent. La proximité immédiate de ces panaches, bien que riche en énergie, constitue donc un environnement *a priori* défavorable à la vie.

Quelques organismes réussissent tout de même à prospérer au plus près des sorties de fluides de haute température. C'est le cas d'*Alvinella pompejana*, un ver annélide qui s'installe sur les flancs des fumeurs, où il construit un tube dans lequel il s'abrite (voir la figure page ci-contre). Celui-ci, constitué de protéines exceptionnellement résistantes, le protège.

Grâce à des électrodes miniatures, on a montré que le milieu interne du tube comprend surtout de l'eau de mer. L'hypothèse la plus probable est que l'hôte le ventile (par des ondulations de son corps et en rentrant et sortant rapidement la partie supérieure de celui-ci) pour y maintenir une température tolérable. Ce faisant, il favorise le développement de bactéries sulfo-oxydantes, dont les filaments couvrent son dos.

Alvinella pompejana est donc armé pour l'environnement extrême des parois des fumeurs noirs, où les quantités élevées de sulfure d'hydrogène, de CO₂ et de métaux toxiques (cuivre, cadmium,

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