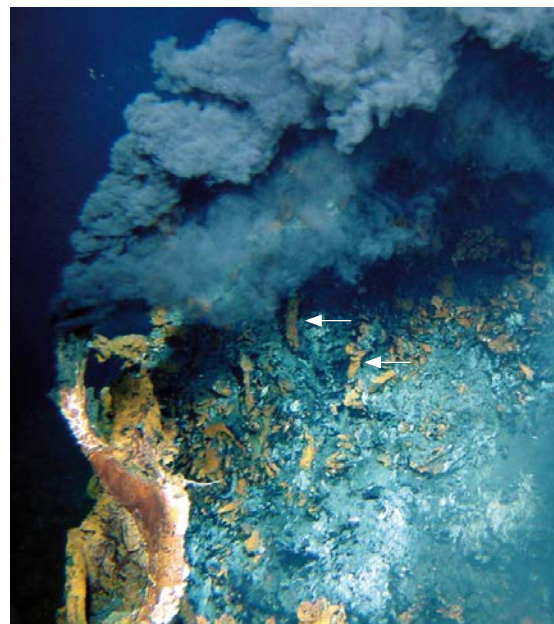




➤ d'hydrogène (H_2S ou HS^-), absent dans l'eau de mer où le soufre est présent uniquement sous sa forme la plus oxydée, le sulfate (SO_4^{2-}). L'eau de mer contient en effet de nombreux composés, comme l'oxygène et le nitrate (NO_3^-), capables d'échanger des électrons avec le sulfure, qui se transforme alors en sulfate.

Cette dernière réaction est favorisée lorsque le sulfure du fluide hydrothermal jaillit du sol et entre en contact avec l'eau de mer. Elle libère une quantité importante d'énergie, que les microorganismes exploitent. Certaines bactéries, dites sulfo-oxydantes, catalysent cette réaction, détournant à leur profit les électrons échangés et l'énergie libérée pour synthétiser des molécules d'ATP (adénosine triphosphate), vectrices de l'énergie au sein des cellules. Grâce à cette énergie, d'autres microorganismes, dits chimio-autotrophes, fabriquent des biomolécules à partir des composés inorganiques dissous dans l'eau de mer, comme le dioxyde de carbone (CO_2). Ils fournissent ainsi une ressource abondante à tout l'écosystème.

Comment expliquer la composition des fluides hydrothermaux ? Ceux-ci sont issus d'une transformation progressive de l'eau de mer (riche en sulfates), qui s'infiltre dans les fractures de la croûte océanique et réagit au contact des roches à haute température et forte pression – dans ces conditions, les sulfates captent des protons H^+ de leur environnement et arrachent des électrons aux métaux des roches pour former des sulfures –, avant de remonter vers la surface. En parallèle, le fluide s'acidifie et s'enrichit en composés volatils issus du magma, comme le CO_2 et parfois le dioxyde de soufre. De nombreux éléments incorporés dans les roches de la croûte océanique sont dissous par le fluide acide. Celui-ci emporte ainsi du silicium et de multiples

Le ver *Alvinella pompejana* (ci-dessus) survit sur les flancs des fumeurs noirs, au plus près des émanations, en construisant des tubes protecteurs (à droite, indiqués par des flèches). Au sein du tube règne un microenvironnement interne moins hostile. Des bactéries sulfo-oxydantes (les filaments blancs sur la photographie du médaillon) y prospèrent sur le dos d'*Alvinella pompejana*. Les vers *Riftia pachyptila* (les tubes rouges et blancs) atteignant deux mètres de longueur colonisent quant à eux les sources diffuses (page ci-contre). Ils vivent en symbiose avec des bactéries sulfo-oxydantes.

métaux (fer, manganèse, zinc, cuivre et, en quantités moindres, cadmium, plomb, mercure, arsenic, or et argent), dans des proportions variables selon son degré d'acidité et la nature des roches. La composition des fluides hydrothermaux varie donc d'une source à une autre.

À l'instar du sulfure, nombre de métaux des fluides réagissent avec les composés oxydants de l'eau de mer, offrant aux communautés microbiennes une grande diversité de sources d'énergie, dès lors qu'elles sont capables de concurrencer les réactions chimiques spontanées. Des écosystèmes variés se mettent alors en place autour des sources. Des colonies de microbes et d'animaux marins s'y distribuent, selon leur tolérance aux températures élevées et leur capacité à exploiter les ressources disponibles. Ainsi, entre les fluides brûlants des fumeurs noirs et ceux plus tièdes des sources diffuses se décline toute une gamme d'habitats et de communautés.

L'ENFER DES FUMEURS NOIRS

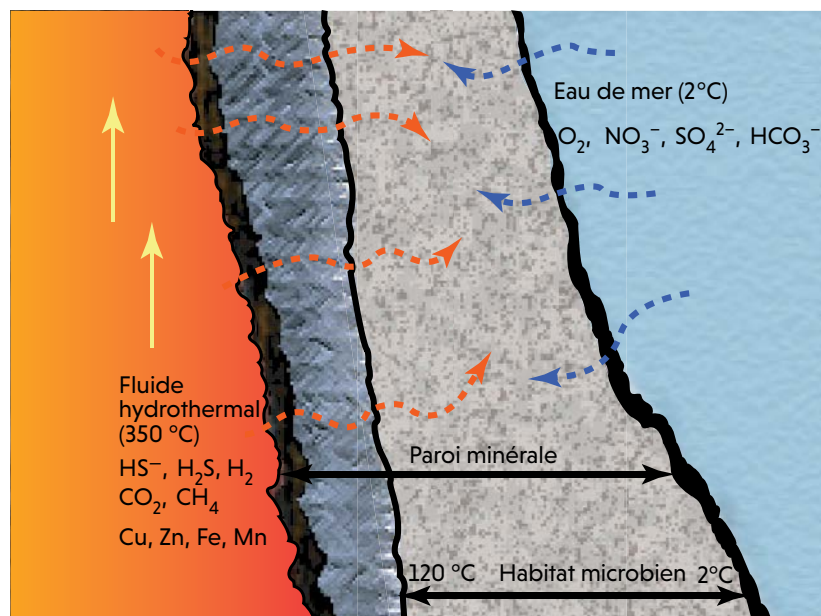
Aucun organisme ne tolère le contact direct avec les fluides des fumeurs noirs, dont la température atteint 410°C . Cependant, leur voisinage est un peu moins hostile, grâce aux métaux dissous transportés par le fluide : ceux-ci se solidifient au contact de l'eau de mer froide, isolant le fluide chaud par une paroi minérale. Les sulfures de cuivre, de fer et de zinc constituent ainsi des conduits de cheminée. Le fluide chaud qui s'en échappe au sommet forme un panache sombre chargé de particules de ces mêmes sulfures métalliques. La fraction la plus fine, composée de nanoparticules, serait transportée sur de grandes distances. Plus encore, Joseph Resing, de l'université de Washington, et ses collègues, ont récemment montré que le fer, mais aussi le manganèse et l'aluminium,



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, >