

Le froid, l'acide et la base

Les milieux froids sont plus courants que les milieux chauds. Les océans, dont la température moyenne est comprise entre 1 °C et 3 °C, couvrent plus de la moitié du Globe, et de vastes zones émergées de l'Arctique et de l'Antarctique sont gelées en permanence ou ne dégèlent que pendant quelques semaines, en été. Ces milieux inhospitaliers abritent également des micro-organismes : les bactéries psychrophiles (étymologiquement «qui aiment le froid»).

James Staley et ses collègues de l'Université de Washington ont montré que des micro-organismes variés peuplent l'eau de l'Antarctique, pourtant gelée pendant une grande partie de l'année. De tous les eucaryotes photosynthétiques, algues, diatomées et bactéries récoltés par le groupe de J. Staley, la bactérie *Polaromonas vacuolata* est la plus remarquable : sa température de croissance optimale est de 4 °C, et des températures supérieures à 12 °C sont trop chaudes pour sa reproduction. De tels organismes intéressent les industriels, car ces derniers ont besoin d'effectuer certains traitements à la température des réfrigérateurs : pour modifier des aliments frais, pour limiter l'évaporation des parfums ou pour les lavages à froid.

Les extrémophiles qui se développent en milieu acide ou basique (res-

pectivement nommés acidophiles et alcalinophiles) sont également recherchés. La plupart des milieux naturels terrestres sont neutres, avec un pH compris entre cinq et neuf (le pH se mesure sur une échelle comprise entre 0 et 14; la neutralité correspond au pH égal à sept). Les acidophiles se rencontrent dans les milieux assez rares dont le pH est inférieur à cinq, tandis que les alcalinophiles préfèrent les endroits où le pH est supérieur à neuf.

Les milieux les plus acides résultent surtout d'activités géochimiques, telles que le dégagement de gaz soufrés par les événements hydrothermaux ou par quelques sources chaudes; certains résultent des activités métaboliques de certains acidophiles eux-mêmes. On trouve aussi ces organismes dans les résidus de l'industrie du charbon. Leur tolérance à l'acidité du milieu externe ne s'accompagne pas d'une acidification interne, qui détruirait les molécules importantes, tel l'ADN. Aussi une des clefs de la survie dans les milieux acides tient à la neutralisation du milieu interne, à l'aide de molécules de neutralisation et de molécules qui, restant en contact avec le milieu externe, évitent l'acidification interne; ces deux types de molécules défensives restent opérationnelles en milieu très acide : on a isolé de la paroi et de la membrane de certains acidophiles des extrémozymes qui fonctionnent

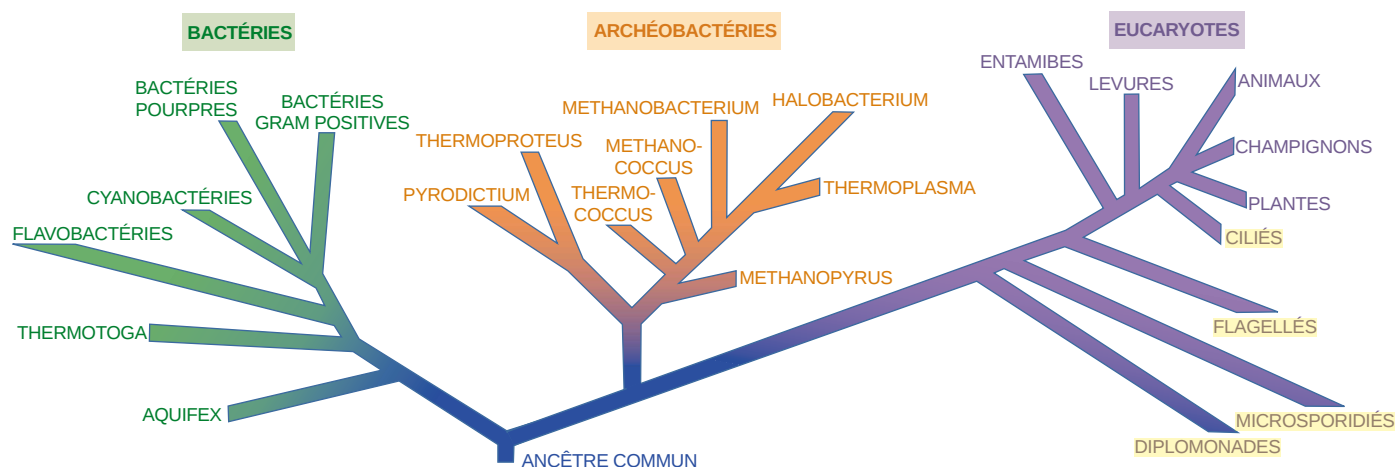
aux pH inférieurs à un (le pH du vinaigre est généralement supérieur à deux, par exemple).

Ces extrémozymes acidophiles sont utiles comme catalyseurs pour la synthèse chimique en solutions acides ou comme additifs pour l'alimentation animale (ils conservent leur activité dans l'estomac des animaux) : elles dissocient des molécules difficiles à digérer, ce qui permet l'emploi de graines bon marché.

Les alcalinophiles, d'autre part, vivent dans les sols riches en carbonates et dans les «lacs salifères», tels ceux que l'on trouve en Égypte, dans la vallée du Rift, en Afrique ou à l'Ouest des États-Unis. Aux pH supérieurs à huit, certaines molécules vitales, notamment les ARN, se dégradent. Aussi, comme les acidophiles, les alcalinophiles maintiennent un pH interne neutre, avec des extrémozymes en surface ou à proximité de la membrane, ainsi que dans les sécrétions des cellules. Plusieurs fabricants de détergents sont intéressés par ces enzymes, car, pour laver efficacement, les détergents doivent éliminer les taches d'origine alimentaire ou autres, ce dont s'acquittent des enzymes comme les protéases (qui dégradent les protéines) et les lipases (qui dégradent les graisses); or les protéases et les lipases classiques sont dégradées aux pH de la plupart des lessives. Les versions alcalinophiles de ces enzymes conservent leur activité; plusieurs de celles qui sont

posent donc que ces deux groupes sont apparus les premiers, se différenciant peu de temps après l'apparition de l'ancêtre commun à toutes les formes de vie. Les eucaryotes se seraient ultérieurement séparés des archéobactéries. L'arbre ci-dessous est conforme à cette hypothèse : les micro-organismes hyperthermophiles, tels que *Methanopyrus* (archéobactérie) et *Aquifex* (bactérie), divergent près de la racine de l'arbre.

Les biologistes s'intéressent aujourd'hui beaucoup aux gènes qui n'existent que chez les archéobactéries. Ces gènes codent l'information nécessaire à la synthèse des enzymes et d'autres protéines importantes pour la structure et la fonction cellulaires. De nombreux gènes archéobactériens codent probablement des protéines inconnues, à partir desquelles on veut étudier la vie primitive sur le Globe.



J. Christiansen, d'après Brock Biology of Microorganisms (Prentice Hall 1997)

efficaces à chaud ou à froid sont utilisées ou en cours de développement. On étudie également les extrémozymes alcalinophiles pour le délavage des jeans : en dégradant la cellulose et en libérant les colorants fixés aux fibres, certaines enzymes assouplissent et décolorent les tissus, comme si on avait frotté ceux-ci avec des cailloux.

Une existence saumâtre

La liste des extrémophiles ne se limite pas aux thermophiles, aux acidophiles

ou aux alcalinophiles : les halophiles, par exemple, se plaisent dans les milieux extrêmement salés, notamment les lacs salés naturels et les marais salants. Certains de ces milieux salins sont également alcalins, car la dégradation du carbonate de sodium et d'autres sels dégage parfois des ions basiques. Les micro-organismes qui vivent dans ces milieux sont doublement adaptés à la présence de bases et de sels.

Les halophiles présentent des particularités très intéressantes, qui leur évitent de se vider de leur eau interne par le phénomène d'osmose. Normalement, les molécules diffusent, des zones de concen-

tration supérieure vers les zones de concentration inférieure. L'eau, par exemple, migre à travers les membranes cellulaires, de sorte qu'une cellule placée dans une solution très salée perd de l'eau et se déshydrate, à moins que son cytoplasme ne contienne une concentration en sel (ou en autres solutés) supérieure ou égale à la concentration dans le milieu. Les halophiles évitent la dessiccation osmotique en produisant en quantité des solutés internes ou en captant des solutés de leur environnement. Par exemple, l'archéobactérie *Halobacterium salinarum* accumule du chlorure de potassium, et ses enzymes cyto-



Thomas D. Brock



NASA



Thomas D. Brock

2. LES MILIEUX EXTRÊMES sont parfois très colorés. C'est aux halophiles que les marais salants de la baie de San Francisco doivent leur teinte rosée (à gauche), tandis que des bactéries thermophiles font

briller une source chaude du parc de Yellowstone (à droite). Une lame de verre plongée dans l'une des sources bouillantes de Yellowstone (en haut) s'est immédiatement couverte de nombreux micro-organismes.



Michael Milstein



James T. Staley, University of Washington

3. LA PROSPECTION BIOLOGIQUE impose la fréquentation de milieux inhospitaliers. À gauche, Karl Stetter, de l'Université de Regensburg, examine une source chaude du parc de Yellowstone. À droite,

James Staley, de l'Université de Washington, creuse la glace de l'Antarctique. Les bactéries psychrophiles présentes dans l'échantillon de glace apparaissent sous la forme d'une bande sombre.

Structure modifiée

En France, plusieurs laboratoires s'intéressent aux micro-organismes extrémophiles, notamment à ceux qui vivent dans les sources hydrothermales et autour d'elles, au fond des océans. Les échantillons sont prélevés lors des campagnes de plongée utilisant le *Nautilus*, le sous-marin océanographique de l'IFREMER. C'est lors d'une telle expédition que Daniel Prieur, du Laboratoire de biologie marine de Roscoff, a isolé, de l'intérieur d'un fumeur noir, une nouvelle souche d'archéobactérie hyperthermophile et barophile (adaptée à la pression) qu'il a nommée *Pyrococcus abyssi*. Les conditions optimales de croissance de cet extrémophile sont une température de 96 °C, sous une pression de 200 atmosphères. Au Laboratoire de biochimie des signaux régulateurs cellulaires et moléculaires, nous avons étudié l'enzyme aspartate transcarbamylase de cette bactérie : elle résiste très bien aux températures et pressions élevées. Le clonage de son gène, la modélisation de la structure tridimensionnelle de l'enzyme et sa comparaison avec l'enzyme homologue d'*Escherichia coli* (qui vit à 37 °C) ont mis en évidence des particularités structurales qui doivent être à la base de l'adaptation de la bactérie.

La figure ci-dessous montre la superposition de la structure modé-

lisée de l'enzyme (*en rouge*) et de la structure, connue par cristallographie, de la protéine d'*Escherichia coli* (*en vert*). Des différences sont localisées dans des régions externes, dont on sait qu'elles sont importantes pour les propriétés catalytiques et régulatrices de l'enzyme. La chaîne catalytique de *Pyrococcus abyssi* possède presque deux fois plus d'acides aminés chargés (positivement et négativement) que la chaîne d'*Escherichia coli*. Tous ces acides aminés sont à la surface de la chaîne, ce qui suggère que la stabilisation résulte de l'accroissement de la taille et de la compacité du cœur hydrophobe de cette enzyme, les acides aminés chargés supplémentaires participant plutôt à la stabilisation de la structure quaternaire (l'arrangement des sous-unités).

Le gène codant l'aspartate transcarbamylase de l'espèce voisine *Pyrococcus furiosus* est en cours de séquençage dans le Laboratoire de Nicholas Glansdorff, à Bruxelles. Cette archéobactérie est également une hyperthermophile, mais elle vit à la pression atmosphérique.

Nous effectuons le même type d'analyse pour l'aspartate transcarbamylase d'une bactérie psychrophile et provenant de l'Antarctique.

Guy HERVÉ

Université Pierre et Marie Curie

