

duction est optimale à des températures voisines de 105 °C, mais il se multiplie même aux températures supérieures à 113 °C. Aux températures inférieures à 90 °C, sa croissance cesse, parce qu'il a trop froid ! Les biologistes s'intéressent également à une autre bactérie hyperthermophile qui vit dans les cheminées sous-marines, l'archéobactérie productrice de méthane *Methanopyrus* ; comme elle semble très primitive, on espère que l'analyse de ses gènes et de ses activités éclairera le fonctionnement des cellules qui peuplaient la Terre quand la vie y est apparue.

Jusqu'à quelle température trouvera-t-on la vie ? Des «super-hyperthermophiles» prolifèrent-ils à 200 °C ou à 300 °C ? Les biologistes ont appris à se méfier, mais ils admettent que la température limite est de l'ordre de 150 °C : au-delà de cette température, les liaisons chimiques qui assurent l'intégrité de l'ADN et des autres molécules essentielles semblent menacées.

Les gènes amplifiés

Les biochimistes qui s'intéressent aux relations entre la structure des molécules et leur activité essaient de comprendre comment les molécules des micro-organismes thermophiles et des autres extrémophiles restent fonctionnelles, malgré des conditions auxquelles ne résistent pas les molécules analogues

des organismes classiques. Ce travail n'est pas achevé, mais les différences entre les diverses molécules ne semblent pas considérables. Par exemple, de nombreuses extrémozymes de bactéries thermophiles ont une structure analogue à celle des enzymes de bactéries thermosensibles, mais un nombre supérieur de liaisons ioniques et de forces intramoléculaires semble stabiliser les édifices moléculaires.

Quelle que soit la raison exacte de leur activité intense dans des conditions extrêmes, les enzymes issues des micro-organismes thermophiles sont déjà largement utilisées par l'industrie. L'exemple le plus remarquable est celui de la polymérase *Taq*, provenant de *Thermus aquaticus* et utilisée pour l'amplification de gènes. Inventée au milieu des années 1980 par Kary Mullis, cette méthode permet d'utiliser l'ADN comme empreinte génétique, mais elle est également devenue indispensable en recherche biologique, pour le diagnostic médical (tel celui des infections par le VIH) et, de plus en plus, pour le dépistage de prédispositions génétiques aux maladies, tels certains cancers.

Pour synthétiser des copies d'un segment d'ADN, on utilise une enzyme de la classe des ADN polymérases ; puis, pour décrocher la polymérase de l'ADN recopié et laisser à l'enzyme la possibilité de synthétiser un nouveau brin d'ADN, on chauffe la solution réactionnelle. Initialement, les polymérases,

qui provenaient de micro-organismes qui n'étaient pas thermophiles, cessaient de fonctionner aux températures élevées ; il fallait renouveler les enzymes après chaque cycle.

Les ingénieurs de la Société *Cetus* analysèrent des échantillons de *Thermus aquaticus* isolés par T. Brock et en purifièrent l'ADN polymérase (la polymérase *Taq*). Sa résistance à la chaleur permit la mise au point d'un système d'amplification de l'ADN entièrement automatique. Plus récemment, certains biochimistes ont remplacé la polymérase *Taq* par une polymérase *Pfu*, isolée de la bactérie hyperthermophile *Pyrococcus furiosus*, qui se développe surtout à des températures voisines de 100 °C.

L'amplification d'ADN n'est que l'une des nombreuses applications des extrémozymes thermophiles. Par exemple, une de ces enzymes assure la production de cyclodextrines, des molécules formées lors de la fermentation de l'amidon. Ces molécules en forme d'abat-jour sont solubles dans l'eau, mais elles peuvent se lier à des molécules insolubles, qui se placent alors en leur centre. On les utilise pour retarder la libération de molécules volatiles, telles celles des arômes alimentaires, pour ralentir la libération de principes actifs de médicaments dans l'organisme, pour réduire l'amertume des aliments ou pour masquer des odeurs désagréables.

Les trois grands groupes

Au cours de l'été 1996, des biologistes de plusieurs laboratoires ont achevé l'analyse génétique complète de *Methanococcus jannaschii*, un micro-organisme extrémophile méthanogène qui se développe à des températures voisines de 85 °C. Connaissant ainsi l'enchaînement des diverses sous-unités de l'ADN du micro-organisme, ils ont confirmé que les organismes vivants étaient de trois types, et non réduits aux procaryotes et aux eucaryotes.

Les bactéries (avec leurs cellules simples dépourvues de vrai noyau)

composent la lignée des procaryotes ; les cellules de l'autre lignée, celle des eucaryotes, ont leur matériel génétique enfermé dans un noyau (c'est le groupe auquel appartiennent les plantes, les humains et les autres animaux). En comparant les molécules d'ARN riboso-



LE SOUS-MARIN DE RECHERCHE ALVIN (à gauche) tend un bras (au milieu) pour récupérer des micro-organismes aux alentours d'une source sous-marine profonde. En 1982, il a ainsi capté le micro-organisme *Methanococcus jannaschii*, cellule sphérique entourée de nombreux flagelles (en bas).

mal, pour les diverses cellules, Carl Woese avait conclu, en 1977, qu'un groupe de micro-organismes préalablement classés parmi les bactéries, le groupe des archéobactéries, était distinct des procaryotes et des eucaryotes. *Methanococcus jannaschii* est la première archéobactérie dont on a séquencé tous les gènes : 44 pour cent de ses gènes ressemblent à ceux des bactéries ou des eucaryotes ; 56 pour cent sont totalement différents de tout autre gène déjà décrit.

Aussi a-t-on conclu que les archéobactéries, les procaryotes et

les eucaryotes ont un lointain ancêtre commun. De nombreuses archéobactéries, ainsi que certaines bactéries, sont adaptées aux conditions que l'on imagine identiques à celles de la Terre primitive : des températures élevées et une faible concentration en oxygène. De nombreux biologistes sup-

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.

