

Collection
Astronomie
Mécanique Céleste

Introduction aux éphémérides astronomiques

Cet ouvrage fournit aux chercheurs, étudiants et astronomes amateurs, les outils de base pour aborder la mécanique céleste.

- unités et données astronomiques concernant les corps du système solaire
- échelles de temps utilisées
- systèmes de référence pour repérer les corps célestes et transformations entre les différents repères
- théorie de la rotation de la Terre
- solutions les plus récentes des mouvements des corps du système solaire
- présentation des éphémérides de la *Connaissance des Temps*
- éphémérides pour le Soleil, la Lune, les planètes et les satellites

Il contient un grand nombre de tables, de figures et est accompagné d'un glossaire.

Bureau des Longitudes

ISBN 2-86883-298-9 - 450 pages - Prix : 380 FF

Connaissance des Temps
1998

Cet ouvrage donne les positions du Soleil, de la Lune, des planètes ainsi que des divers satellites (de Mars, Jupiter, Saturne...). Le lecteur peut calculer les coordonnées d'un astre à l'aide de la disquette fournie.

Bureau des Longitudes

ISBN : 2-86883-304-7 - 200 pages - Prix : 250 FF

Ces ouvrages sont disponibles soit chez votre libraire soit aux

Éditions de Physique

7 av du Hoggar - Z.I. de Courtabœuf
91944 Les Ulis Cedex A

Tél. : 01 69 18 75 75 - fax : 01 69 28 84 91

<http://www.ed-phys.fr>

e-mail : customers@ed-phys.fr

de métamorphisme dans les chaînes de montagnes. Elles ont révélé que, si les vents dominants vont dans le même sens que la subduction, la majeure partie des précipitations tombe sur le versant côtier de la chaîne de montagnes, au-dessus de la plaque qui s'enfonce. Ce phénomène y intensifie la déformation et l'exhumation des roches profondes de la croûte. À l'inverse, si les vents dominants sont opposés au sens de la subduction, l'érosion est plus forte sur le versant continental de la chaîne : la déformation du massif montagneux est relativement uniforme, et l'exhumation des roches profondes est limitée au versant continental. Une étude de la répartition des roches altérées dans le cœur de certains vieux massifs montre que les empreintes laissées par l'orographie et par les vents dominants restent visibles plus de deux milliards d'années après que la chaîne a cessé d'être active.

Ayant observé que le soulèvement tectonique et l'érosion peuvent se produire sur des échelles de temps et à des vitesses similaires, de nombreux géologues admettent aujourd'hui que certaines montagnes sont stationnaires : leur hauteur et leur forme générale peuvent rester stables, sans changement notable, durant des centaines de milliers d'années, voire des millions d'années, parce que la vitesse d'érosion est compensée par l'activité tectonique.

Les trois étapes

Si peu de montagnes actuelles sont dans cet état d'équilibre parfait, la plupart d'entre elles l'ont sans doute atteint durant leur histoire. L'évolution des chaînes de montagnes se divise en trois phases. La première, la phase de formation, commence avec la convergence de deux plaques ou avec la survenue d'un événement tectonique qui provoque l'épaississement de la croûte et l'élévation du relief ; durant cette période, la croissance tectonique est plus rapide que l'érosion. Puis, lorsque l'altitude devient très importante, l'érosion s'intensifie. Selon la taille de la chaîne et le climat local, le soulèvement continue jusqu'à ce que l'érosion ou la résistance de la croûte limitent la croissance de l'altitude moyenne de la chaîne. Cette deuxième période stationnaire dure aussi longtemps que la

tectonique compense l'érosion. Enfin, lorsque la surrection ralentit, l'érosion prend le dessus, et les montagnes vieillissent ; leur altitude moyenne décroît lentement. Lors de n'importe laquelle des trois phases, l'évolution des montagnes peut être compliquée par l'intervention d'événements tectoniques ou climatiques, et par les interactions entre ces mécanismes et l'érosion.

Les nouvelles théories sur la formation des chaînes de montagnes promettent d'être aussi fructueuses que le fut la tectonique des plaques il y a 30 ans. De la même manière que celle-ci a permis d'expliquer la répartition globale des séismes, des volcans, des fossiles et de nombreux types de roches et de minéraux, les nouvelles idées orogéniques montrent comment les forces tectoniques, le climat et la topographie interagissent pour créer les paysages les plus spectaculaires de la planète. Les simulations numériques prenant en compte ces théories rendent compte d'histoires tectoniques complexes, de la variabilité des climats, et des particularités géologiques locales.

Nicholas PINTER enseigne la géologie à l'Université de l'Illinois, à Carbondale. Mark BRANDON enseigne à l'Université Yale, dans le Connecticut.

T. YOSHIKAWA, *Landform Development by Tectonics and Denudation*, in *Themes in Geomorphology*, sous la direction de A. Pitty, Croom Helm, 1985.

C. BEAUMONT, P. FULLSACK et J. HAMILTON, *Erosional Control of Active Compressional Orogens*, in *Thrust Tectonics*, sous la direction de K.R. McClay, Chapman and Hall, 1992.

B.L. ISAACS, «Long-Term» *Land Surface Processes: Erosion, Tectonics and Climate History in Mountain Belts*, in *TERRA-1 : Understanding the Terrestrial Environment : The Role of Earth Observations from Space*, sous la direction de P.M. Mather, Taylor and Francis, 1992.

R.E. RAYMO et W.F. RUDDIMAN, *Tectonic Forcing of Late Cenozoic Climate*, in *Nature*, vol. 359, n° 6391, pp. 117-122, 10 septembre 1992.

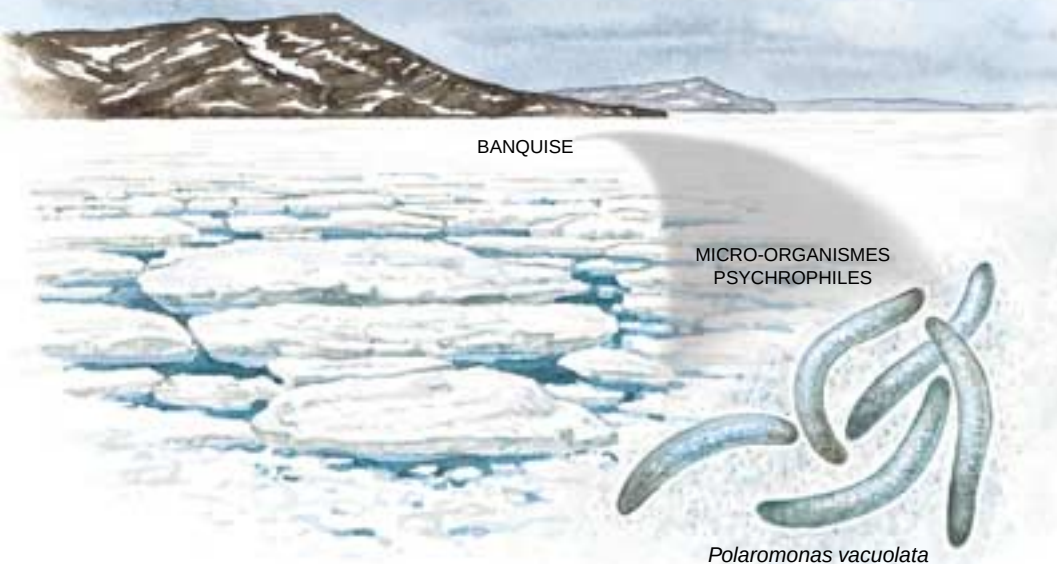
E. FIELDING, B. ISACKS, M. BARAZANGI et C. DUNCAN, *How Flat Is Tibet?*, in *Geology*, vol. 22, n° 2, pp. 163-167, février 1994.

E.A. KELLER et N. PINTER, *Megageomorphology*, in *Active Tectonics : Earthquakes, Uplift and Landscape*, Prentice Hall, 1996.

Les organismes de l'extrême

MICHAEL MADIGAN • BARRY MARRS

Certains micro-organismes survivent dans des conditions qui tueraient toute autre créature. Les molécules qui leur permettent de prospérer intéressent l'industrie.



Plongés dans de l'eau bouillante, dans de l'eau presque gelée, ou encore dans du vinaigre, dans de l'ammoniaque ou dans de la saumure, les animaux meurent quasi instantanément. Toutefois de nombreux micro-organismes se sont adaptés à ces environnements rédhibitoires : ce sont les «extrémophiles», capables de survivre dans des conditions qui, du point de vue humain, sont réellement extrêmes. Mieux encore, ces micro-organismes ne se contentent pas de supporter ces environnements agressifs : ils ne se développent et ne se reproduisent bien que là.

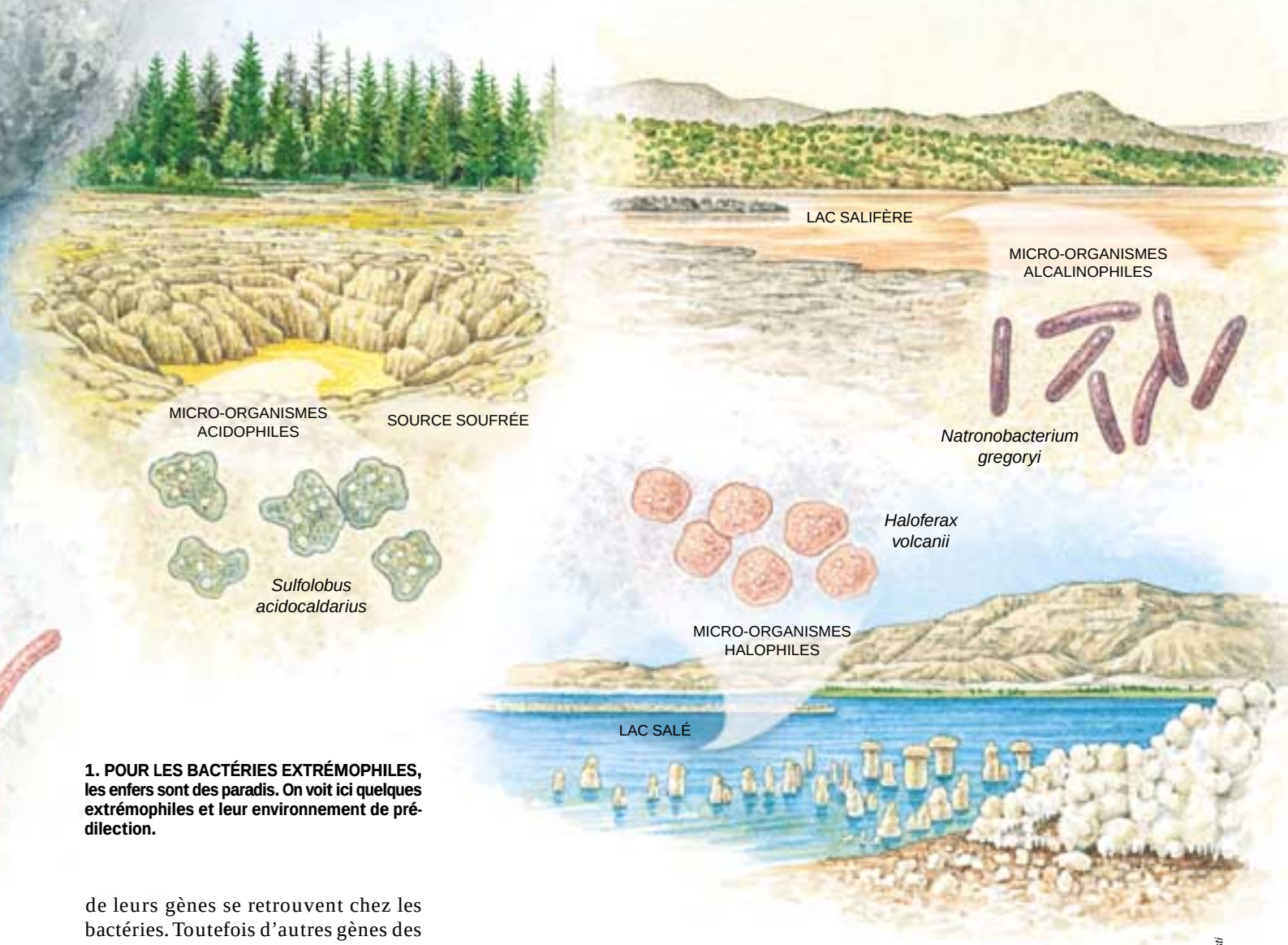
Certains extrémophiles sont connus depuis plus de 40 ans, mais la recherche de ces types d'organismes s'est intensifiée récemment, quand on a reconnu que certains endroits que l'on croyait stériles pullulent de vie microbienne. En outre, les industriels ont réalisé que les systèmes de survie des extrémophiles pouvaient avoir des applications variées.

Leurs enzymes des extrémophiles sont ainsi des catalyseurs de réactions biologiques extrêmement résistants : comme les catalyseurs chimiques, les enzymes accélèrent les réactions chimiques sans y participer, de sorte qu'elles peuvent être réutilisées indéfiniment. En 1997, diverses sociétés ont consacré plus de dix milliards de francs à l'étude des enzymes capables de produire des édulcorants, de délayer les jeans, d'identifier les criminels par leurs empreintes génétiques ou de diagnostiquer les maladies infectieuses ou génétiques. Comme les enzymes classiques perdent leurs propriétés lorsqu'elles sont excessivement chauffées ou placées dans des conditions extrêmes, les industries qui les utilisent doivent souvent prendre des précautions pour les protéger au cours de leurs réactions ou de leur conservation. La résistance des enzymes d'extrémophiles – surnommées «extrémozymes» – pourrait simplifier les méthodes de génie

enzymatique et accroître le rendement des réactions tout en réduisant les coûts. De surcroît, les ingénieurs peuvent utiliser ces extrémozymes dans des procédés nouveaux.

Une vingtaine d'équipes, dans le monde, analysent les extrémophiles, à la recherche de leurs enzymes. Seulement quelques-uns de ces micro-organismes sont utilisés aujourd'hui, mais d'autres le seront prochainement. Tout comme pour des enzymes classiques, la transformation d'une extrémozyme nouvellement isolée en un produit industriel nécessite plusieurs années d'études.

D'autre part, l'analyse des extrémophiles a bouleversé l'arbre de l'évolution. Naguère, on divisait les créatures vivantes en deux groupes principaux : les bactéries, dont les cellules sont simples et dépourvues de noyau, et les eucaryotes, d'organisation plus complexe, avec le matériel génétique enfermé dans le noyau cellulaire. L'étude des extrémophiles laisse supposer l'existence d'un troisième groupe : les archéobactéries. Ces dernières n'ont pas de noyau et ressemblent beaucoup aux bactéries ; certains



1. POUR LES BACTÉRIES EXTRÊMOPHILES, les enfers sont des paradis. On voit ici quelques extrémophiles et leur environnement de prédilection.

de leurs gènes se retrouvent chez les bactéries. Toutefois d'autres gènes des archéobactéries ne sont présents que chez les eucaryotes et, même, certains semblent être uniques. On y recherche des indices sur l'évolution de la vie primitive sur la Terre (voir l'encadré des pages 88 et 89).

Certains l'aiment chaud

La plupart des bactéries vivent aux températures comprises entre 20 °C et 40 °C, et aucun organisme pluricellulaire ne tolère des températures supérieures à 50 °C ; les micro-organismes eucaryotes, eux, ne résistent pas longtemps à plus 60 °C. Pourtant les hyperthermophiles apprécient des températures supérieures à 80 °C, voire 100 °C!

On connaît depuis longtemps des thermophiles s'accommodant de températures de 60 °C, mais les véritables extrémophiles – ceux qui se développent à des températures supérieures – ne furent découverts qu'il y a une trentaine d'années : à l'Université de Madison, Thomas Brock et ses collègues découvrirent les premiers spécimens

à l'occasion d'un recensement de la vie microbienne dans les sources chaudes et diverses mares du parc de Yellowstone. À leur grand étonnement, les biologistes découvrirent ainsi que la vie existait même dans les sources les plus chaudes, et, vers les années 1960, ils identifièrent le premier extrémophile vivant à des températures supérieures à 70 °C : il s'agissait de la bactérie *Thermus aquaticus*, dont l'utilisation fut cruciale pour la mise au point de la technique d'amplification de gènes (ou PCR, de l'anglais *polymerase chain reaction*, soit «réaction en chaîne utilisant la polymérase»). Peu après, T. Brock et ses collègues trouvèrent également le premier micro-organisme hyperthermophile dans une source extrêmement chaude et acide : cette archéobactérie, qui a été nommée *Sulfolobus acidocaldarius*, prolifère à des températures atteignant 85 °C. La voie était ouverte vers la recherche de micro-organismes survivant dans l'eau bouillante : on en trouva aussi.

Observant que des bactéries supportent des températures supérieures à celles où vivent les eucaryotes, T. Brock prédit alors que l'on trouverait probablement des micro-organismes partout où de l'eau est sous la forme liquide. De nombreux travaux ont montré qu'il avait raison. Notamment, depuis la fin des années 1970, les biologistes ont identifié les micro-organismes vivant dans les sources chaudes et à proximité immédiate des sources hydrothermales sous-marines, émanations volcaniques, d'où jaillit parfois (dans «les fumeurs noirs») une solution chargée en minéraux, extrêmement chaude (sa température atteint 350 °C à la bouche des fumeurs).

Plus de 50 espèces d'hyperthermophiles ont été isolées ; beaucoup furent découvertes par Karl Stetter et ses collègues de l'Université de Regensburg. *Pyrolobus fumarii*, le micro-organisme le plus thermorésistant, se développe sur les parois des fumeurs sous-marins. Sa repro-

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-

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 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).

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

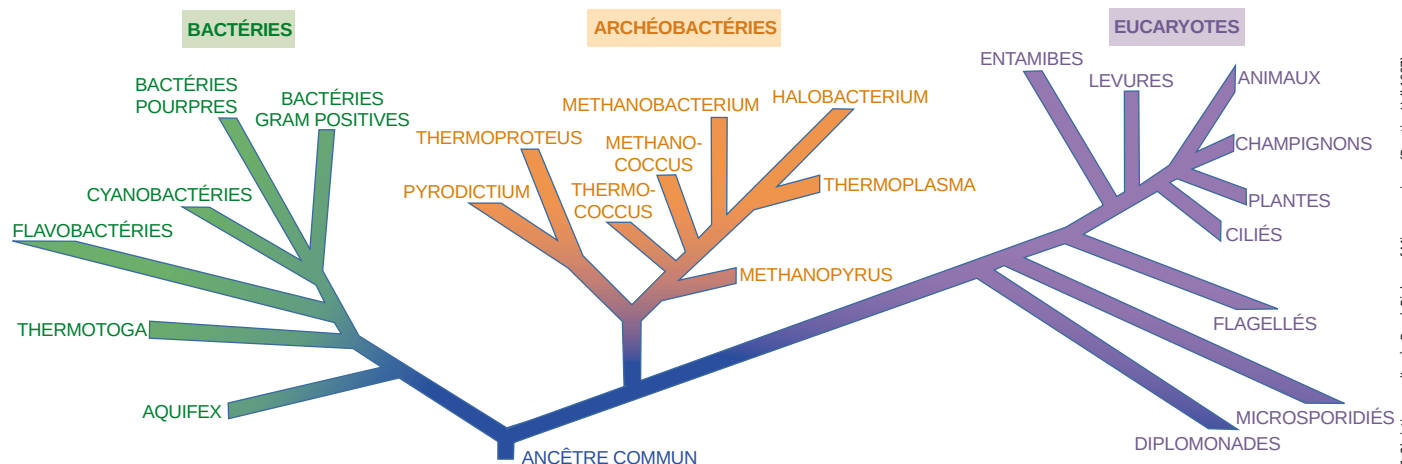
aux pH inférieurs à un (le pH du vinaigre est généralement supérieur à deux, par exemple).

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-

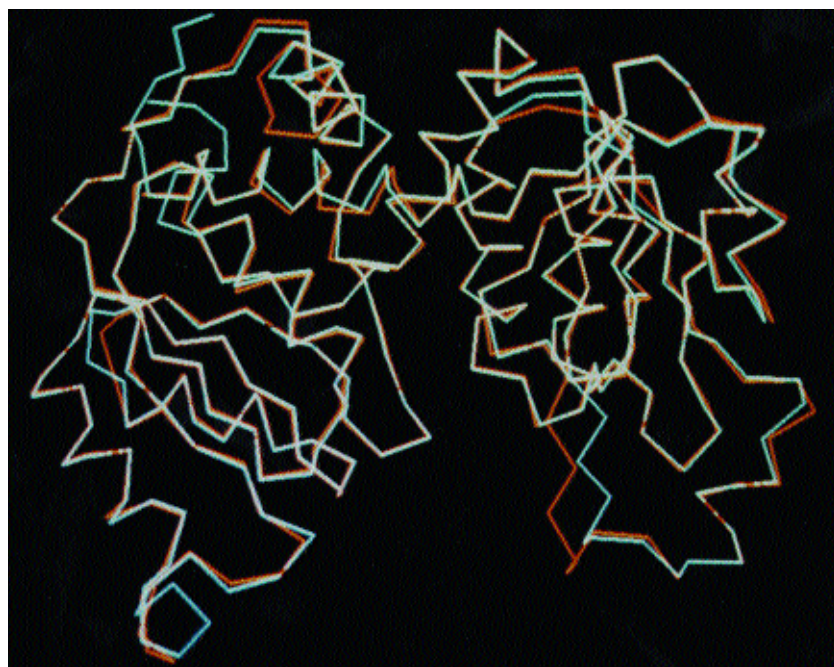
lisée de l'enzyme (*en rouge*) et de la structure, connue par cristallographie, de la protéine d'*Escherichia coli* (*en vert*). Des différences sont localisées dans des régions externes, dont on sait qu'elles sont importantes pour les propriétés catalytiques et régulatrices de l'enzyme. La chaîne catalytique 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



plasmiques ne fonctionnent qu'en présence de concentrations élevées de ce sel. Les protéines de ses structures cellulaires en contact avec le milieu extérieur ne sont fonctionnelles qu'en présence de fortes concentrations de chlorure de sodium.

Les enzymes halophiles sont aujourd'hui moins utilisées que d'autres extrémozymes, mais une application au moins est à l'étude : les biochimistes tentent d'utiliser des extrémozymes halophiles afin de mieux récupérer le pétrole des roches.

Pour créer des voies permettant au pétrole piégé dans les roches de passer dans le puits où s'effectue la récupération, les ingénieurs injectent généralement un mélange d'une gomme visqueuse (le guar, qui provient de certaines plantes) et de sable par le puits, puis ils cassent la roche au moyen d'explosifs, poussant simultanément le mélange injecté dans les fissures formées par l'explosion. Le guar facilite la dispersion du sable dans les fentes, de sorte que les grains maintiennent ultérieurement les fissures ouvertes. Comment éliminer la gomme et laisser circuler le pétrole, après cette opération ? Une solution consiste à injecter, avant le mélange de gomme et de sable, des enzymes qui dégraderont la gomme : celle-ci conserve sa viscosité le temps que le sable soit charrié jusqu'aux fissures, puis elle est dégradée.

Toutefois les puits de pétrole sont des endroits très chauds et souvent salés, où les enzymes « ordinaires » perdent leurs propriétés. Une extrémozyme fonctionnant de manière optimale à des températures et à des salinités élevées resterait probablement inactive à proximité de la sortie du puits, froide et non salée ; elle deviendrait progressivement active à mesure qu'elle pénétrerait dans le puits, puisque la température augmente avec la profondeur.

Moisson d'extrémozymes

Où trouver les extrémozymes utiles à l'industrie ? Classiquement les biologistes de l'industrie isolent les souches de micro-organismes qui contiennent les enzymes utiles, puis ils les cultivent en laboratoire. Toutefois, dans le cas des extrémophiles, ces méthodes sont souvent peu efficaces et coûteuses. Aussi les ingénieurs se sont-ils intéressés à la production d'extrémozymes par des techniques de recombinaison

de l'ADN, qui évitent les cultures d'extrémophiles. Les gènes, constitués d'ADN, codent les enzymes et les diverses protéines des cellules. Aussi, à partir de micro-organismes extrémophiles collectés dans les milieux naturels ou cultivés en laboratoire, on peut former de nombreuses copies des gènes qui codent les enzymes pour, ensuite, synthétiser ces dernières : on introduit les gènes clonés dans des micro-organismes que l'on sait bien cultiver et qui produiront les enzymes en quantités illimitées.

Deux techniques permettent d'identifier des extrémozymes potentiellement efficaces. Tout d'abord, on peut faire de petites cultures d'une bactérie extrémophile récupérée dans un milieu intéressant, puis rechercher des molécules utiles. Par exemple, on cherche des enzymes qui dégradent des protéines en ajoutant à une solution de protéines des extraits des cultures de cellules ; quand on observe une dégradation, on isole les enzymes responsables de cette activité, ainsi que les gènes qui codent ces enzymes, en espérant que ces gènes pourront être introduits dans des cellules qui les exprimeront.

On peut aussi isoler directement l'ADN d'échantillons d'eau, de terre ou de tout autre prélèvement provenant d'un milieu extrême. Puis, par des techniques de recombinaison de l'ADN, on introduit des segments d'ADN sélectionnés au hasard dans des cellules domestiquées (idéalement on n'introduit qu'un fragment par cellule) et l'on teste les colonies issues des cellules modifiées, à la recherche d'activités enzymatiques. Quand une nouvelle activité apparaît, on sait qu'elle provient d'un gène inséré. Cette méthode évite les nombreuses manipulations du procédé classique et ne sélectionne que les enzymes qui pourront, ultérieurement, être produites par des cultures de cellules domestiquées. En outre, elle procure les gènes qui codent ces enzymes sans imposer des cultures d'extrémophiles, généralement très difficiles.

Bien que la diversité des micro-organismes soit considérable, on trouve difficilement les enzymes parfaitement adaptées aux tâches qu'on veut leur confier. Aussi les enzymologues les plus en pointe modifient aujourd'hui les extrémozymes, afin de leur donner des activités sur mesure. Par exemple, après avoir découvert une extrémozyme qui dégrade efficacement des

protéines à haute température, ils sont intervenus afin de la faire fonctionner dans une gamme plus étendue d'acidité et de salinité.

Aujourd'hui, les biologistes effectuent ces transformations de deux façons. Les partisans de la « méthode rationnelle » cherchent d'abord la base structurale d'une propriété donnée ; puis ils modifient le gène de l'enzyme afin que la protéine catalytique qui en résultera détienne, à coup sûr, cette propriété. Les partisans de l'autre approche, nommée évolution dirigée, font varier de façon plus ou moins aléatoire le gène codant une enzyme choisie, et, à partir des gènes modifiés ainsi obtenus, ils fabriquent des milliers de versions différentes de cette enzyme. Ils testent alors l'ensemble pour déceler si l'une des versions a acquis le caractère escompté. Cette dernière stratégie est « edisonienne », car lorsque Thomas Edison rechercha des matériaux pour confectionner les filaments d'ampoule électrique, il testa tous les matériaux à sa disposition, de l'éclat de bambou jusqu'au fil de soie.

Aujourd'hui les extrémozymes utilisées dans l'industrie sont peu modifiées, mais les deux approches, rationnelle et edisonienne, produiront certainement des enzymes mieux adaptées aux tâches qu'on leur confie. Par ces mêmes méthodes, on étudie d'ailleurs la transformation d'enzymes ordinaires en extrémozymes artificielles.

Michael MADIGAN est professeur de microbiologie à Carbonsdale (Illinois). Barry MARRS est directeur de la Société *Photosynthetic Harvest*.

M.W.W. ADAMS et R.M. KELLY, *Enzymes Isolated from Microorganisms That Grow in Extreme Environments*, in *Chemical and Engineering News*, vol. 73, n° 51, pp. 32-42, 18 décembre 1995.

Extremophiles, numéro spécial de *Federation of European Microbiological Societies (FEMS) Microbiology Reviews*, vol. 18, nos 2-3, mai 1996.

K.O. STETTER, *Hyperthermophiles in the History of Life*, in *Evolution of Hydrothermal Ecosystems on Earth (and Mars?)*, sous la direction de Gregory R. Bock et Jamie A. Goode, John Wiley & Sons, 1996.

Michael T. MADIGAN, John M. MARTINKO et Jack PARKER, *Brock Biology of Microorganisms*, huitième édition, Prentice Hall, 1997.
