

Texte de la 433^e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 14 juillet 2002**Purificacion Lopez Garcia : " La vie dans les milieux extrêmes "**

L'objet de cette conférence est la vie dans des conditions extrêmes, dans des environnements où on pensait que la vie était impossible. Il y a trente ans à peine, on pensait que certains environnements étaient stériles, dépourvus de vie, comme les zones volcaniques, terrestres ou sous-marines, les grandes fosses océaniques, et même la glace des régions polaires.

Une introduction présentera les microorganismes qui sont quasi exclusivement les êtres vivants rencontrés dans ces environnements. Ces microorganismes sont appelés "extrêmophiles" - qui aiment les conditions extrêmes-. Cette introduction décrira comment on les a découverts, et comment on les étudie.

- Dans une seconde partie, je vous décrirai les différents environnements extrêmes, où se rencontrent ces organismes

- Enfin, j'aborderai le rapport entre les organismes extrêmophiles et l'exobiologie (ou astrobiologie pour les Américains). L'exobiologie est la science qui étudie les origines de la vie et la distribution de la vie, non seulement sur Terre mais dans l'univers.

I. Introduction : les organismes extrêmophiles :***A. La découverte des organismes extrêmophiles***

Les premiers organismes extrêmophiles isolés font partie des organismes halophiles, découverts dans un environnement qu'on croyait dépourvu de vie, d'où son nom : la mer morte. Ces organismes vivent dans des concentrations de sels très élevées (du grec *halos*, sel) Les chercheurs ne se sont pas beaucoup intéressés à ces organismes, jusqu'à la découverte beaucoup plus tardive, dans les années 70, du 3^{ème} domaine du vivant, celui les Archae, auxquels ils appartiennent.

A cette même époque, en 1969, le microbiologiste Thomas Brock isole pour la première fois une bactérie thermophile, *Thermus aquaticus*, à partir des sources d'eau chaude du Parc national de Yellowstone aux Etats- Unis. Un peu plus tard, il isole, à partir de cette même source, un organisme encore plus thermophile, *Sulfolobus acidocaldarius*, qui peut supporter des températures de 90°C, et, de plus, associées à de pH très acides, entre 1 et 5.

La découverte des organismes thermophiles a brisé une idée très répandue depuis l'époque de Pasteur chez les biologistes (et les microbiologistes en particulier), selon laquelle les organismes meurent tous au-delà de 80°C. Or, on était cette fois en présence d'organismes vivants bien au-dessus de cette limite supposée.

La découverte de ces organismes dans des environnements particuliers a dès lors déclenché une sorte de chasse aux extrêmophiles. Après quelques années, cette chasse a abouti à la découverte d'une diversité inouïe, complètement inattendue, dans des milieux supposés hostiles à la vie.

B. Définition

Avant de poursuivre dans la description de ces organismes, je voudrais vous en donner une définition plus objective. Un organisme extrêmophile est un organisme qui vit aux limites de la vie, c'est-à-dire aux limites, pour un paramètre physico-chimique donné, au-delà desquelles la vie ne peut exister.

Si on prend l'exemple de la température, il existe des organismes qui se développent à des températures très négatives, de presque -20°C, et d'autres à des températures de 110-115 °C.

Dans cette fenêtre de température, on classe différents organismes dans leur propre fourchette de température, celle où ils peuvent se développer. Des températures les plus basses aux plus élevées, on rencontre des organismes dits psychrophiles, puis mésophiles, thermophiles modérés, thermophiles extrêmes et enfin hyperthermophiles. Dans chacune des gammes de températures tolérées, les organismes ont une température optimale de croissance, à laquelle leur taux de croissance est maximal. En deçà et en delà de cette température optimale, leur taux de croissance diminue.

Selon notre définition d'extrêmophile, dans le cas présent, seuls les hyperthermophiles et les psychrophiles sont considérés comme de vrais extrêmophiles, car ils vivent aux limites hors desquelles la vie ne se développe pas. Une propriété intéressante des organismes extrêmophiles est que, non seulement ces organismes tolèrent des valeurs extrêmes d'un paramètre donné, mais, réciproquement, ils dépendent de ces conditions pour vivre. Ainsi, les hyperthermophiles ne peuvent pas se développer en dessous de 60-70 °C.

C. Place des microorganismes extrêmophiles dans l'évolution

La découverte des organismes extrêmophiles a été liée à la découverte des organismes de 3^{ème} domaine du vivant, les Archae (Archaeobactéries pour certains). A l'inverse : la découverte des

extrêmophiles a conduit à l'identification de ce groupe, mais également à une "révolution" méthodologique et conceptuelle en microbiologie.

En raison de leur petitesse, les microorganismes sont difficiles à étudier. Chez les organismes plus grands, comme les animaux, il est facile de distinguer les espèces par la morphologie. Grâce à l'évolution de la morphologie suivie sur le registre fossile, il est possible de retracer l'histoire évolutive des animaux et de faire des arbres phylogénétiques (des arbres "généalogiques", qui expriment les relations de parenté). En revanche, la morphologie n'est pas assez informative dans le cas des microorganismes. C'est particulièrement vrai pour les organismes procaryotes, où le matériel génétique n'est pas isolé du reste de la cellule par un noyau membraneux, contrairement aux organismes eucaryotes.

Certes, on reconnaît des formes différentes chez les microorganismes procaryotes - on a des coques, des bacilles, des spiriles... etc. Néanmoins, ces types morphologiques sont en nombre restreint, alors qu'il existe des milliers d'espèces de coques, des milliers d'espèces de bacilles... Les morphologies ne permettent donc pas d'établir de relations de parenté entre les microorganismes. Les microbiologistes s'étaient donc contentés d'étudier des microorganismes isolés dans des cultures pures, soit par des méthodes d'isolement dans des milieux liquides, soit par étalement sur des boîtes. On pouvait ainsi obtenir des cultures pures (des cultures où toutes les cellules appartiennent à une même espèce). A partir de là, on pouvait ensemercer les microorganismes de ces cultures pures dans de milieux de cultures différents pour étudier leurs propriétés physiologiques. Ainsi, on pouvait classer les microorganismes selon les capacités physiologiques de chacun. On restait cependant incapable d'établir une classification naturelle (ou phylogénie), c'est-à-dire une classification fondée sur des relations de parenté entre organismes.

Une idée révolutionne complètement la phylogénie, en 1965. Il s'agit d'une idée émise par Emile Zuckerkandl et le prix Nobel Linus Pauling, qui proposent dans un article très connu que les macromolécules biologiques accumulent l'histoire évolutive. Ces macromolécules, ce sont par exemple les protéines, l'ADN (le matériel génétique qui code l'information de la cellule) ou encore l'ARN (une sorte d'empreinte de l'ADN). En principe, parmi ces macromolécules, on pourrait en choisir une qui soit présente chez tous les organismes et en obtenir la séquence. En comparant cette séquence chez tous les organismes du monde vivant, on pourrait établir leurs relations de parenté. En effet, la similitude entre les séquences de macromolécules révèle s'ils sont plus ou moins apparentés.

C'est effectivement ce qui a été fait. On a choisi l'ARN ribosomique 16 S 18 S comme carte d'identité moléculaire des organismes. Pourquoi cet ARN ribosomique ? Cette molécule fait partie des ribosomes, qui sont les machines à synthétiser les protéines pour toute cellule. Ils sont indispensables à la vie de n'importe quelle cellule. L'ARN ribosomique, présent dans ces structures,

est donc une molécule universelle. En principe, cette molécule peut être utilisée comme marqueur moléculaire des organismes : en comparant sa séquence chez différents organismes, on peut construire des arbres phylogénétiques, c'est-à-dire des arbres où on repère les relations de parenté entre organismes. La longueur des branches de ce type d'arbres indique la distance génétique (c'est-à-dire évolutive) entre ces organismes. Il existe deux représentations de ces arbres : sous forme d'échelle ou sous forme radiale.

En comparant la séquence des ARN ribosomiques de milliers d'espèces, on a ainsi pu construire un arbre universel du vivant, qui regroupe tous les organismes vivants.

Cet arbre a créé une surprise importante. On a découvert que tout un groupe d'organismes dont la morphologie ressemblait beaucoup aux bactéries classiques, se retrouvait isolé, distant à la fois des bactéries classiques (procaryotes) et des eucaryotes, qui rassemblent la plus grande diversité morphologique (plantes, champignons, animaux et microorganismes eucaryotes). Cela remettait en question la traditionnelle représentation des relations entre organismes vivants.

La découverte de cette troisième branche est très importante de deux points de vue. D'une part, du point de vue phylogénétique, pour étudier l'évolution et les origines de la vie. D'autre part, les premiers Archae isolés étaient des extrémophiles, issus d'environnement à forte température, à forte concentration saline ou encore très acides. On sait que ces Archae sont présentes dans d'autres environnements, presque partout, mais souvent les Archae possèdent le record d'extrémophiles connus. Quelle signification donner à la propriété de ce domaine ?

D. Les adaptations aux conditions extrêmes

Tout d'abord, les organismes extrémophiles sont intéressants pour étudier les adaptations moléculaires qu'imposent les différentes contraintes - forte température, acidité...etc. La question est de savoir comment les molécules peuvent résister à des stress extérieurs extraordinaires.

On peut considérer que les cellules sont formées de trois grands types de macromolécules : les membranes (les lipides), les protéines, l'ADN. Des adaptations sont nécessaires à ces trois niveaux pour qu'un organisme supporte des conditions extrêmes.

Les membranes sont essentiellement constituées de lipides. Elles délimitent le contenu cellulaire, maintiennent la cellule en équilibre avec le milieu extérieur, et permettent les échanges avec l'environnement. Les facteurs environnementaux, entre autres la température, affectent la structure de lipides qui sont disposés en bicouche. Les lipides sont constitués d'une petite tête polaire ou hydrophile ("qui aime l'eau") et d'une longue chaîne hydrophobe ("qui n'aime pas l'eau"). Les têtes polaires sont tournées vers l'extérieur (au contact du milieu extra- ou intra- cellulaire aqueux), les chaînes hydrophobes à l'intérieur de la membrane. Les fortes températures augmentent la fluidité

des lipides, ce qui déstabilise les membranes et provoquent des pertes d'ions, avec des conséquences néfastes pour la cellule. Parmi les adaptations rencontrées chez les organismes thermophiles, il y a, par exemple, la formation de mono-couches qui rigidifient la membrane, ce qui contrebalance l'effet délétère des fortes températures. Il existe de la même façon des adaptations des membranes pour chacun des paramètres physico-chimiques de l'environnement.

De la même manière, les protéines peuvent être adaptées aux différents stress auquel fait face l'organisme extrêmophile. Les protéines réalisent différentes fonctions dans la cellule. Or, la fonctionnalité de la protéine est fortement liée à sa forme, à sa configuration. A température élevée, les protéines peuvent développer le plus d'interactions possibles, à l'intérieur de la protéine, mais aussi avec d'autres molécules, pour maintenir leur configuration et leur stabilité. Au contraire, à basse température, les protéines sont adaptées pour augmenter leur flexibilité, par un ensemble d'ajustements.

Enfin, les acides nucléiques doivent également être protégés des agressions induites par les paramètres physico-chimiques extrêmes. En général, les organismes extrêmophiles, en particulier les hyperthermophiles, ou les organismes soumis à de fortes radiations UV, possèdent des systèmes de réparation de l'ADN très puissants.

Quel est l'intérêt de ces organismes ?

En raison de ces adaptations moléculaires très performantes, les organismes extrêmophiles sont très intéressants d'un point de vue biotechnologique, en particulier à cause de leurs systèmes enzymatiques. Les enzymes sont des protéines qui catalysent des réactions chimiques dans la cellule. Chez les organismes extrêmophiles, on les appelle extrémozymes.

De façon logique, les enzymes sont adaptées aux conditions optimales de croissance de l'organisme dont elles font partie. Dans le cas des extrêmophiles, ces systèmes enzymatiques sont donc capables de fonctionner dans des conditions extrêmes. Cette résistance à des conditions drastiques peut présenter des intérêts pour des processus industriels particuliers – dont on verra quelques exemples.

D'un point de vue scientifique, la découverte des extrêmophiles, liée à celle des *Archae*, a représenté un réel bouleversement dans le domaine de l'évolution. De plus, cette découverte a permis de formuler de nouvelles hypothèses sur l'origine de la vie et, au final, du point de vue de l'exobiologie, pour de nouvelles recherches sur l'existence de formes de vie hors de la Terre.

II. Les organismes extrêmophiles et leur environnement

Les environnements extrêmes présentent deux caractéristiques importantes. D'une part, la prédominance de la vie microbienne. Dans les milieux les plus extrêmes, les plus limitants

pour la vie, seuls certains microorganismes sont capables de se développer. D'autre part, dans ces environnements, la diversité diminue : au fur et à mesure qu'on s'approche des conditions limites pour la vie, on rencontre de moins en moins d'espèces.

On classe les organismes extrémophiles selon le paramètre physico-chimique auquel ils sont adaptés dans une valeur extrême. Par exemple, pour la température, on a des organismes hyperthermophiles et psychrophiles. Pour le pH, on a des organismes qui vivent à pH bas, les alcaliphiles, ou élevé, les acidophiles. On va maintenant parcourir brièvement les environnements où vivent ces différents organismes.

Les températures extrêmes

Les hyperthermophiles sont probablement les plus populaires des extrémophiles. Leur température optimale de croissance est supérieure à 80°C.

C'est à température élevée que la propriété selon laquelle la diversité diminue près des conditions limitantes est la mieux avérée. Ainsi, à basses températures, on rencontre toute une diversité d'organismes qui peuvent se développer et qui appartiennent aux trois domaines du vivant (archae, eucaryotes, bactéries). En revanche, les eucaryotes n'arrivent pas à vivre au-delà de 60°C. Seuls quelques champignons et quelques eucaryotes unicellulaires supportent 60°C. Au-dessus de cette température, on trouve seulement des archae et des bactéries thermophiles et hyperthermophiles. Aucune bactérie ne se développe à plus de 95 °C. Au-dessus de cette température, c'est le territoire des Archae. Seules des Archae sont capables de vivre au-delà de 100°C, jusqu'à 110-115°C.

Les environnements où se développent les thermophiles sont liés au volcanisme. Les sources chaudes du Parc National de Yellowstone aux Etats-Unis sont le premier type d'environnement où on les a isolés. On les rencontre également au niveau des *solfatares* de plusieurs régions volcaniques : Islande, Nouvelle Zélande, Australie, Italie etc. Un autre type d'environnement correspond aux sources hydrothermales continentales, notamment en Islande, en Italie et en Grèce. Cependant, la plupart de ces sources restent marines, en relation avec les grandes fosses dorsales océaniques. On les rencontre à de très grandes profondeurs, entre - 1500 et - 3000 mètres. Elles ont notamment été étudiées au niveau des rift médio atlantique et de l'est pacifique. On en trouve également au niveau de l'Océan Indien.

Ces sources sous-marines ont été découvertes pour la première fois en 1977 grâce à un sous-marin américain. A cette occasion, on a pu isoler les microorganismes. On rencontre parfois des colonies d'animaux - par exemple le ver géant *Riftia pacifica*.

Il existe deux types de sources hydrothermales :

- les fumeurs noirs, découverts deux ans plus tard, où les fluides sortent à des températures de 350-400 °C ;
- les fumeurs, diffuseurs froids, où la température est plus basse, en raison du mélange d'eau de mer froide avec les premières couches de fluides.

Les sources hydrothermales émettent des fluides très réduits, et souvent des gaz très toxiques pour nous (sulfure d'hydrogène, méthane), mais aussi beaucoup de métaux lourds provenant du lessivage des couches basaltiques. Ces gaz très toxiques s'avèrent très utiles pour le développement des communautés d'organismes qui y vivent. Ils sont en effet autotrophes c'est-à-dire capables de fabriquer leur propre matière organique à partir de matière inorganique (CO₂) et obtiennent leur énergie à partir de réactions d'oxydoréduction qui font intervenir les composés réduits issus des fluides. Leur métabolisme est dit chimiolitho-autotrophe.

Ces organismes sont très importants parce qu'ils sont à la base de la chaîne trophique : ils réalisent la production primaire dans l'écosystème, qui est complètement indépendant de la lumière solaire (Dans les écosystèmes terrestres, les plantes occupent la même fonction, mais fixent le carbone inorganique en utilisant l'énergie solaire (processus de photosynthèse).

Ils peuvent ainsi nourrir les autres animaux à proximité.

C'est justement à proximité d'une cheminée du rift medio-atlantique qu'on a isolé l'organisme le plus thermophile connu jusqu'à présent *Pindobus fumari*, une archae qui peut vivre jusqu'à 113 °C.

Une condition indispensable pour la vie est la présence d'eau à l'état liquide. Dans ces sources hydrothermales de grande profondeur, on peut encore trouver de l'eau liquide à plus de 100°C grâce au poids de la colonne d'eau, dont la pression maintient l'eau à l'état liquide. Ces organismes sont en général anaérobies stricts c'est-à-dire que la présence d'oxygène les tue. Le fluide étant très réduit ne contient pas d'oxygène.

Comme exemple d'Archae hyperthermophiles sous-marines, je tiens à citer *Pyrococcus abyssi*, isolé par une équipe française de Roscoff, très connu, car il a été choisi comme modèle biologique pour ces organismes et son génome complètement séquencé. Enfin, il existe quelques exemples de bactéries hyperthermophiles, moins thermophiles que les Archae. Ainsi, *Thermotoga maritana* caractérisé par la présence de capsules, ou *Aquifex pyrophilus*.

Là où la vie se développe, les parasites de la vie apparaissent également. Les hyperthermophiles n'échappent pas à la règle. On trouve des virus capables de parasiter ces organismes – virus filamenteux ou en forme de citrons. Ils ne sont pas encore très connus. Il n'y a pas d'inquiétude à avoir en ce qui nous concerne : nous sommes trop loin dans la fourchette de température pour qu'ils nous affectent.

Les organismes hyperthermophiles sont importants au niveau de la biotechnologie. Ils peuvent être utilisés pour décontaminer des polluants ou des boues résiduelles de l'industrie, qui sont très chaudes. Certaines de leurs enzymes sont ajoutées au détergent pour la lessive à haute température. L'application probablement la plus importante concerne l'utilisation de certaines ADN polymerases pour la réaction de PCR – la Réaction en Chaîne de Polymérisation de l'ADN. Cette réaction permet d'amplifier l'ADN, c'est-à-dire qu'à partir d'une infime quantité d'ADN, on peut en produire de grande quantité, à l'identique. Cette technique a été une révolution en biologie moléculaire. Aujourd'hui, la PCR est utilisée en routine par tous les laboratoires de biologie moléculaire, mais aussi par les hôpitaux, ou la police – elle permet à partir d'un cheveu, de relever une empreinte génétique et de la comparer à celle d'un suspect.

A l'opposé de la gamme de température, se situent les organismes psychrophiles (qui aiment le froid). Ils se développent à moins de 5°C, aux alentours de 0°C. Comme pour les organismes vivant à hautes températures, le facteur limitant reste les ressources en eau liquide. On peut rencontrer de l'eau liquide à moins de 0°C : par exemple dans les eaux salées, ou sous les glaciers, où l'eau reste liquide sous l'effet de la pression. Ces organismes se rencontrent dans les grands fonds océaniques : en profondeur, la température avoisine les 2°C. On les retrouve également dans la neige de montagne ou les banquises. Ce sont par exemple des algues rouges qui forment des tâches rougeâtres. Souvent, ils se développent au niveau de petites crevasses où l'eau salée s'accumule en saumures, qui abritent ces organismes. Un des environnements les plus étudiés pour ces organismes psychrophiles est l'Antarctique, à partir des carottes de glace. Ces organismes peuvent se développer dans la glace, où ils forment des couches – couches d'algues rouges ou vertes.

D'autres microorganismes peuvent être présents : des organismes hétérotrophes, qui profitent de la fixation de matière organique par la photosynthèse, réalisée au niveau des couches supérieures. C'est au niveau du pôle sud qu'on a détecté le record d'activité microbienne à basse température : à - 12°C à - 17°C.

Il faut cependant distinguer les organismes psychrotolérants qui peuvent vivre dans les mêmes environnements que les organismes psychrophiles. Par exemple, les ours sont dits psychrotolérants, car leur métabolisme interne se réalise à 37 °C (ils réalisent une homéostasie de leur température interne). Ce n'est pas le cas des microorganismes psychrophiles vrais, qui supportent la température extérieure sans homéostasie.

Les milieux hyper salins

Les organismes halophiles aiment les fortes concentrations de sel, et peuvent vivre jusqu'à saturation en sel – le sel précipite. On les retrouve dans certaines mines de sel, et très souvent dans les salines d'eau de mer. D'étang en étang, la concentration en sel augmente jusqu'à atteindre la saturation. La couleur rouge des différents étangs correspond à la couleur des pigments de ces microorganismes. Ils peuvent adopter des formes parfois très surprenantes. Dans les étangs les plus salés, on peut avoir des cellules carrées et très aplaties.

Les pH extrêmes

Les organismes alcaliphiles vivent à pH alcalin, au dessus de pH 9. Ils sont capables de résister à l'eau de Javel. Très souvent, ces organismes sont associés à des milieux très salés. C'est le cas de lacs de type Natron, en Afrique du Nord, où les Egyptiens se procuraient les natrons pour embaumer leurs morts. On en retrouve également dans d'autres types de lacs, moins salés, où ils forment des stromatolites qui peuvent atteindre plusieurs mètres de haut.

Les organismes acidophiles au contraire, se rencontrent à pH très bas. Certains peuvent vivre sans problème dans l'acide sulfurique. Ils se rencontrent dans différents milieux - zones volcaniques, zones minières, rivières acides du Nord de l'Espagne. La couleur rouge est due à la présence de fer, à pH 2. L'organisme le plus acidophile connu est *Picrophilus_achemai*, isolé d'un solfatare au Japon. Son pH optimum est de 0,7 et il peut vivre sans problème à pH 0. Ils sont très utiles en biotechnologie, pour la lixiviation des métaux - On arrose des piles de minéraux avec de l'eau contenant ces microorganismes. Ces microorganismes se chargent de lessiver et de solubiliser les métaux présents dans les piles de minéraux - On les utilise également pour la désulfuration du charbon.

Pression

Les organismes barophiles (ou piezophiles) aiment les fortes pressions. On les trouve dans les grands fonds, autour de -11 000 mètres, comme dans la fosse des Mariannes ou dans la croûte terrestre, sous la masse du sol continental.

Sécheresse et radiations

Les organismes xérophiles supportent les forts dessèchements. On les retrouve dans le désert, connus sous le nom de « vernis du désert ». Ils peuvent vivre dans des cailloux, ce qui leur permet de se protéger, à la fois de la perte d'eau et des fortes radiations solaires.

Les organismes radiotolérants supportent les fortes radiations. Ce sont des bactéries normalement protégées contre les fortes dessiccations, ce qui implique des systèmes de réparation de l'ADN très puissants. Cela leur confère également une protection contre les radiations. On a pu par exemple isoler ces microorganismes à Tchernobyl ou dans l'Antarctique, sous le trou d'ozone.

Le sous-sol

Pour l'instant, nous avons fait un petit parcours pour différents types d'environnements extrêmes, sur Terre. Il nous manque encore un environnement très étendu : la biosphère souterraine.

La vie existe également dans la croûte terrestre : on a détecté de l'activité microbienne dans les sous-sols océaniques ou continentaux, dans des dépôts de sels, des mines profondes, des aquifères profonds et les grottes.

Les microorganismes de ces environnements occupent de petites crevasses, en densité très faible. Souvent, dans les environnements souterrains, les nutriments manquent par rapport aux besoins des organismes. Dans ces conditions, on suppose que ces organismes présentent une activité métabolique très faible et qu'ils ne se divisent qu'une fois par mois ou par an - très rarement, sans doute. En général, ces organismes sont chimiolitho-autotrophes. Ce sont des organismes qui fabriquent leur propre matière organique, en utilisant des composés inorganiques de la croûte pour produire des réactions énergétiques.

On a isolé des organismes jusqu'à 100 km de profondeur dans la croûte. Ainsi, *Vasilius infernus* a été isolé à une profondeur de 2, 7 km. Parfois, on n'arrive pas à isoler et/ou cultiver ces microorganismes en laboratoire. On réussit cependant à les visualiser, en utilisant des colorants spécifiques.

Apparemment, c'est la température qui limite la vie en profondeur. On parvient à détecter des traces de vie à des profondeurs où la température est compatible avec la vie, autour de 100-110 °C.

Les formes de survie

Du point de vue de la résistance à long terme et de la longévité, un aspect important est la survie dans les conditions extrêmes. Il n'est plus question ici de vie, mais de survie ou de résistance à long terme.

Quand les conditions deviennent trop défavorables, beaucoup d'organismes sont capables d'entrer en dormance, en adoptant des formes de résistance spécifiques. C'est le cas de nombreuses bactéries qui fabriquent des spores. Sous de telles formes, ils sont capables de résister très longtemps à des conditions très défavorables. Quand les conditions sont de nouveau favorables, ils se "réveillent" et peuvent se développer de nouveau.

Ainsi, on a exposé des formes de résistance de bactéries halophiles, présentes à l'intérieur de cristaux de sel, au rayonnement cosmique, pendant deux semaines. Elles y ont résisté.

Les deux meilleures adaptations pour assurer sa survie à long terme sont :

- d'une part, la dessiccation. C'est la méthode développée par les organismes halophiles, au centre de nucléation des cristaux. Ils peuvent résister ainsi pendant des années.

- d'autre part, la cryopréservation. Les microbiologistes savent que la meilleure façon de conserver des souches microbiennes consiste à les congeler à -80°C . Le froid agit de la même manière dans la nature et permet la survie des organismes. Un exemple est donné par une mousse issue du permafrost (sol gelé en permanence), datant de 40 000 ans, qu'on a pu faire pousser.

III. Le lien entre organismes extrémophiles et exobiologie

A. L'existence de vie hors Terre

La découverte des extrémophiles a permis de s'interroger de façon beaucoup plus convaincante sur la question de l'existence de vie ailleurs que sur Terre, dans l'univers. En effet, il est certain que plusieurs types d'organismes extrémophiles pourraient se développer dans les conditions offertes par d'autres planètes.

Dans notre système solaire, les deux planètes les plus favorables à l'étude de vie "extra terrestre" sont :

- Europa, une planète satellite de Jupiter, très froide. Elle possède une calotte de glace sous laquelle pourrait exister de l'eau à l'état liquide. La présence de liquide est un élément indispensable à la vie, telle qu'on la connaît du moins.

- Mars, la planète rouge, est le deuxième candidat. Sa surface est complètement stérile. Cependant, on pense qu'à l'intérieur pourrait se trouver de l'eau, et, comme la température augmente avec la profondeur, cette eau pourrait être liquide. La vie pourrait donc se développer à l'intérieur de la croûte. Même si la vie sur Mars n'existe pas actuellement, ce qui reste probable, les conditions régnant sur cette planète au début de son histoire étaient très semblables à celles de la Terre. Par la suite, comme Mars a moins de masse que la Terre, elle a perdu son atmosphère.

B. L'origine de la vie sur Terre

Tout d'abord, un petit rappel sur l'histoire de la vie sur Terre. Elle s'est formée il y a 4,6 milliards d'années. Les premiers organismes seraient apparus vers 3,8 - 3,9 milliards d'années. On date les premiers fossiles procaryotes à 3,5 milliards d'années. La nature de ces fossiles est aujourd'hui très controversée : on pensait qu'il s'agissait de cyanobactéries, mais il est possible qu'il

s'agisse de procaryotes thermophiles - le débat reste ouvert. Les organismes eucaryotes apparaissent beaucoup plus tard. L'oxygène, absent au début la vie, apparaît il y a 2,1 milliards d'années. Nous, les êtres humains, sommes apparus à la fin de l'échelle : il y a 2 millions d'années.

Le modèle le plus classique pour expliquer l'origine de la vie sur Terre a été développé dans les années 1920 par le chimiste russe, A.I. Oparin et l'anglais J.B.S. Haldane. Cette théorie défend une origine de la vie à basse température et hétérotrophe. Les premiers organismes vivants se seraient développés au niveau des mares à partir de molécules organiques simples formées grâce à la synthèse prébiotique, favorisée par les rayonnements UV et les décharges électriques. A partir de ces molécules organiques simples, les macromolécules se seraient formées : ARN, protéines, puis ADN. Ensuite, les premières cellules et... l'évolution de la vie.

Cependant, la découverte des hyperthermophiles, plus que tout autre extrémophile, a ravivé le débat sur l'origine de la vie sur Terre. Leur connaissance a en effet suggéré de l'idée d'une origine de la vie chaude et autotrophe. Dans ce cadre, la vie serait apparue dans des environnements similaires aux sources hydrothermales sous-marines. Les premiers organismes vivants auraient été des chimiolitho-autotrophe - qui fabriquent leur matière organique et obtiennent leur énergie à partir de composés réduits. Cette idée d'une origine chaude et autotrophe de la vie est soutenue par trois types d'arguments :

- des arguments géologiques. La Terre était probablement plus chaude au moment où la vie est apparue. En effet, la Terre venait de s'agréger et se serait refroidie peu à peu.
- des arguments phylogénétiques : certains auteurs ont proposé une origine de la vie dans la branche des bactéries. Dans ce cas, les lignées les plus proches de la racine de la vie correspondent à des hyperthermophiles. L'ancêtre commun de tous les êtres vivants serait lui-même un hyperthermophile. Le problème est que cette position de la racine n'est restée pour l'instant qu'une hypothèse non validée.
- des arguments métaboliques. Les métabolismes rencontrés chez les hyperthermophiles représentent toute une variété de réactions d'obtention d'énergie qui font intervenir des composés qu'on trouve dans les sources hydrothermales. Le soufre et le fer sont souvent impliqués dans ces réactions. Ce constat rappelle une théorie de Günther Wächtershäuser en 1988, selon laquelle la vie serait apparue sur des surfaces de pyrite (sulfure de fer), car le gaz carbonique de l'atmosphère aurait pu former des molécules organiques en présence de sulfure d'hydrogène et de sulfure de fer.

Cependant, l'idée d'une origine chaude et autotrophe de la vie est très contestée. Certains auteurs proposent que le dernier ancêtre commun soit un organisme de type eucaryote. Or, comme les eucaryotes ne peuvent pas être hyperthermophiles, la vie serait apparue à basse température. D'autres avancent que la vie aurait effectivement pu apparaître à basse température, mais que le dernier ancêtre commun serait un hyperthermophile. En effet, seuls des hyperthermophiles auraient

pu survivre aux bombardements de météorites qu'a connu la Terre au début de son histoire et qui auraient presque entièrement stérilisé la Terre, sauf, justement, les sources hydrothermales sous-marines.

Cependant, hormis les hyperthermophiles, d'autres extrémophiles dans d'autres environnements sont importants pour la recherche en exobiologie :

- ceux des environnements froids (zones glaciaires, permafrost) et les psychrophiles, en raison d'une possibilité de vie sur Europa.
- ceux des milieux hyper salés, notamment les évaporites, roches obtenues par évaporation, qui préservent très bien les traces de vie passée. On a détecté sur Mars des structures qui ressemblent à ces roches. Si la vie a existé sur Mars, il est possible que ces formations en conservent des traces.
- ceux du milieu souterrain, sous la croûte terrestre, en raison des possibilités de formes de vie similaires sur Mars.

Conclusion

Les extrémophiles nous montrent donc quelles sont, sur Terre, les limites de la vie, mais ils permettent également d'ouvrir des horizons nouveaux à la vie, dans l'Univers.

Glossaire

Fumeur : édifice en forme de cheminée construit sur les fonds océaniques par des fluides hydrothermaux qui précipitent des sulfures polymétalliques

Solfatare : terrain volcanique d'où sortent des fumerolles sulfureuses chaudes

Natron : carbonate de sodium hydraté naturel. Les Egyptiens utilisaient le natron pour déhydrater les corps à momifier.

Hétérotrophe : qui a besoin d'une source organiques déjà synthétisé pour assurer sa nutrition.

Autotrophe : qui peut fabriquer sa matière organique à partir d'éléments exclusivement minéraux.

Homéostasie : faculté qu'ont certains êtres vivants de maintenir ou de rétablir certaines constantes physiologiques (pression artérielle, température) quelles que soient les variations du milieu extérieur

Stromatolite : concrétion discoïde constituée par des amas de bactéries fossilisées

Cyanobactérie : procaryote capable de réaliser la photosynthèse (anciennement « algue bleu »)