

Les bactéries

UN MAILLON DE LA BIOSPHERE



Premiers êtres vivants apparus sur Terre, largement répandus dans les sols et les eaux et d'une grande diversité, les bactéries interviennent dans le cycle de la matière en relation avec les autres êtres vivants. Elles jouent donc un rôle fondamental dans la biosphère. Elles peuvent être pathogènes ou vivre en symbiose avec des animaux ou des végétaux. Par ailleurs, on estime entre 4 et 6 millions le nombre d'espèces de bactéries. La biomasse ou le poids total de tous ces organismes est plus importante que celle de tous les autres organismes terrestres réunis. Enfin, le nom « bactérie » vient du grec *baktéria* qui signifie bâton, en raison de leur forme la plus commune.

DE L'ORIGINE À LA DÉCOUVERTE

PANSPERMIE ET GÉNÉRATION SPONTANÉE

En Occident, deux théories s'affrontent dès l'Antiquité au sujet de la vie : la génération spontanée, de tendance matérialiste, et la panspermie, plus spiritualiste. Selon la génération spontanée exprimée par Aristote, les animaux et les végétaux peuvent naître spontanément. La théorie acquiert ses lettres de noblesse au XVIII^e siècle avec le grand naturaliste **Buffon** qui lui donne un fondement logique. Le scientifique



imagine alors des molécules organiques primaires et inaltérables qui se moulent pour prendre des formes diverses. Lorsqu'un être ainsi constitué meurt, ses molécules de vie se séparent, puis se recomposent pour former un nouvel être. L'autre explication de la vie imaginée par les anciens est la panspermie. Selon cette hypothèse, l'univers est semé de germes de vie préexistants qui flottent dans l'air. Poussés par le vent céleste et nourris par la force de la chaleur ou de la Lune, ils se développent et sont à l'origine de toutes les transformations ou naissances.

LES DÉCOUVERTEURS

Au XVI^e siècle, Athanasius Kircher (1602-1680), un jésuite allemand, responsable de la chaire de mathématiques au Collège romain, a déjà eu une première approche de l'univers microbien. Grâce à un microscope, il affirme dès 1659 avoir observé des « corpuscules vermiculés » dans le sang des malades atteints de la peste. Il les appelle *animalcula*, *serpentiuli*, *virus* ou *vermiculi* et pense qu'ils pourraient être véhiculés par des insectes et même être à l'origine des maladies. Puis en 1674, grâce à un microscope de sa fabrication, le Flamand Antonie Van Leeuwenhoek (1632-1723) observe une goutte d'eau de pluie. Et il voit pour la première fois « de petits animaux entourés de bâtonnets et sphériques ». Si des bactéries ont été observées par ce naturaliste, il a fallu attendre les travaux du Français Louis Pasteur pour que la bactériologie prenne son essor. Au XIX^e siècle, débute l'ère de la microbiologie. Dans les années 1850,



deux chimistes, le Français **Louis Pasteur** et l'Allemand Justus von Liebig, constatèrent la présence systématique de ces « bâtonnets et sphériques »

lors des processus de fermentation tels que la transformation du vin en vinaigre. Les travaux de Pasteur démontrent que les micro-organismes à l'origine des fermentations proviennent de l'air, ce qui confirme les intuitions ancestrales des panspermistes. Désormais, Louis Pasteur se consacre à l'étude de la fermentation microbienne, puis à celle des maladies infectieuses. En 1878, à l'Académie des Sciences, le chirurgien Charles-Emmanuel Sedillot propose de baptiser « microbes » l'ensemble des « petites vies ».

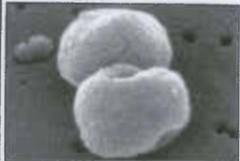
PHYLOGÉNIE ET DIVERSITÉ

La vie est apparue sur Terre il y a environ 3,8 milliards d'années et les fossiles les plus anciens sont ceux d'organismes unicellulaires : les protobactéries qui sont probablement les ancêtres des bactéries. Les bactéries sont les êtres vivants les plus nombreux sur Terre.

LES EUBACTÉRIES

Les eubactéries constituent un groupe extrêmement diversifié. Elles

se présentent sous différentes formes : des coques de forme sphérique (par exemple les **streptocoques**), des bâcilles en



forme de bâtonnet (bacille de la peste), des vibrions incurvés en forme de virgule (vibron cholérique), des spirilles en forme de tire-bouchon (*Azospirillum*, une bactérie fixatrice d'azote). Les eubactéries disposent d'une grande variété de métabolismes. Les anaérobies sont les plus anciennes eubactéries qui ne tolèrent pas l'oxygène. En revanche, les aérobie facultatives, elles peuvent vivre avec ou sans oxygène. Les eubactéries peuvent être classées selon la source d'énergie qu'elles emploient. Les hétérotrophes tirent leur énergie de composés organiques, c'est-à-dire qu'elles dépendent d'autres êtres vivants. Il s'agit par exemple, des bactéries fixatrices d'azote qui vivent en symbiose dans les racines de nombreuses plantes ou celles qui habitent le système digestif des bovins (elles y décomposent les matières végétales, assurant une bonne partie de la nutrition de leur hôte). En revanche, les autotrophes fabriquent directement leur nourriture à partir du gaz carbonique et utilisent l'énergie provenant de la lumière (les photoautotrophes à l'exemple des cyanobactéries). L'énergie peut également provenir de l'oxydation de composés azotés, sulfurés ou autres, auquel cas on parle de eubactéries chimioautotrophes.

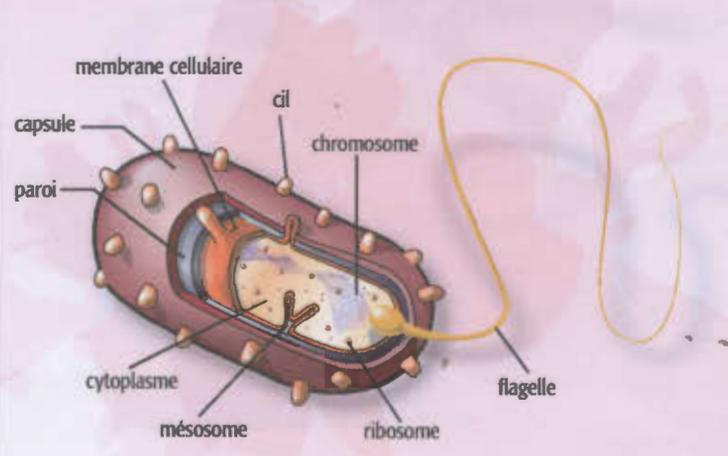
Pour se reproduire, les eubactéries se multiplient habituellement par scissiparité : la cellule se divise transversalement lorsque l'ADN (acide désoxyribonucléique), support de l'hérédité, s'est lui-même dédoublé. Le renouvellement des générations ne prend que vingt à quarante minutes. En vingt-quatre heures, une seule bactérie pourrait donner un milliard de milliards de descendants identiques... Ce taux de prolifération très élevé explique leur omniprésence : le milliard dans la petite cuillerée de terre mais aussi 25 millions dans un centimètre cube de lait. Cette reproduction à l'identité se voit complétée par trois autres systèmes (la transformation, la transduction et le conjugaison) permettant un brassage du matériel génétique. Entre elles, les bactéries échangent de l'ADN, venant en complément de l'échange de plasmides, des molécules circulaires d'ADN extra-chromosomique. Mais certaines bactéries sont déjà différenciées en bactéries mâles et femelles. Certaines peuvent fabriquer des spores qui résistent pratiquement à tout et se mettre en état de dormance. La cellule duplique son ADN et l'entoure d'une barrière extrêmement résistante. Tandis que la cellule mère se désintègre, la spore traverse sans dommages toutes sortes de conditions épouvantables : absence d'eau ou d'air... Les eubactéries présentent toutes la même structure, semblable à celles des archéobactéries. Elles disposent d'une paroi cellulaire qui protège la cellule. Puis une membrane cytoplasmique délimite le cytoplasme et régule les échanges avec l'extérieur. Le cytoplasme est, quant à lui, une masse transparente plus ou moins visqueuse, faite pour l'essentiel d'eau, où flottent de

nombreuses substances minérales et organiques, ainsi que les organites cellulaires. Ces derniers assurent des fonctions particulières. Les ribosomes qui servent à la synthèse des protéines en sont un exemple. Enfin, le matériel génétique, constitué d'un ADN flotte librement dans le cytoplasme. À côté de cette grande boucle d'ADN, on trouve aussi des boucles plus petites : les plasmides. Ces derniers portent notamment des gènes de résistance et présentent la particularité d'être très facilement transmissibles d'une cellule à une autre.

LES ARCHÉOBACTÉRIES

À la fin des années 1970, les archéobactéries ont été découvertes. Elles diffèrent des eubactéries par leur structure biochimique et leur génome, indiquant ainsi qu'elles sont représentatives d'un groupe très ancien de bactéries. Mais elles présentent des similitudes avec les eubactéries. Leurs cellules ne possèdent pas de noyau. En outre, leur mode de reproduction habituel est principalement la division directe transversale ou la scissiparité. Plus de la moitié des gènes des archéobactéries sont uniques. Ces bactéries se développent dans des milieux hostiles tels que des volcans sulfureux ou dans l'intestin des animaux et des hommes. D'ailleurs, elles ont été découvertes dans des sources d'eau très chaudes et dans des lacs salés. Plusieurs familles d'archéobactéries se différencient en fonction de la nature de leur milieu physique. Les bactéries méthanogènes, qui produisent du méthane, vivent surtout dans les marais ou dans les stations d'épuration. Quant aux bactéries halophiles, elles vivent dans les marais salants ou dans des lacs fortement salins. La plupart

Structure d'une bactérie



Organismes prolifériques

1 heure

Temps nécessaire à *Escherichia coli*, un hôte de notre intestin, pour dégrader une quantité de glucose équivalente à 1 000 fois son poids.

10 millions

Selon le scientifique Ward, un bacille donne en 12 heures 10 millions de descendants.

3%

Pourcentage de bactéries provoquant des maladies chez l'homme.

4 à 6 millions

Nombre d'espèces différentes de bactéries.

0,75 mm

Mesure de la plus grande bactérie.

250 millions d'années

Une bactérie demeurée endormie depuis 250 millions d'années a été découverte dans un cristal de sel.

20 minutes

Temps nécessaire à une bactérie pour se diviser en 2 bactéries identiques.

100 millions à 1 milliard

Nombre de bactéries présentes dans les yaourts par gramme de produit consommé.

Les nanobactéries



50 à 500 nm

disposent de pigments rouges, jaunes ou bruns : les caroténoïdes. Ces pigments les protègent contre les effets néfastes de la lumière. En outre, une bactérie peut être caractérisée par la température de son milieu. Les thermophiles peuvent vivre dans des eaux très chaudes, au-delà de 100 °C. Par ailleurs, les acidophiles, qui prolifèrent à un pH (potentiel d'hydrogène) de 1 ou 2, meurent à un pH de 7 tandis que les alcalophiles ou basophiles aiment les milieux où le pH atteint 9 à 11. Enfin, les barophiles supportent des pressions très élevées, jusqu'à plusieurs tonnes au centimètre carré.

LA STRUCTURE

Chaque bactérie est composée d'une seule cellule protégée par une paroi mesurant de 1 à 2 µm. Cette paroi a une fonction protectrice et donne la forme à ce micro-organisme. Elle est principalement composée de sucres complexes. Parfois, s'ajoute à la paroi une capsule qui peut jouer un rôle dans la virulence des espèces pathogènes. En outre, cette cellule est composée d'un cytoplasme représentant le contenu cellulaire. Ce cytoplasme est un gel colloïdal constitué de 80% d'eau et de substances dissoutes (sels minéraux, protéines et glucides) et de la macromolécule organique qu'est l'acide ribonucléique ARN. Il dispose aussi de vacuoles, des inclusions et des pigments. Sa membrane cytoplasmique assure les échanges de la cellule avec le milieu extérieur grâce à des enzymes, catalyseurs de transformation chimique. Concernant le passage de substances, la membrane devient semi-perméable ou sélectivement perméable. Au sein du cytoplasme, se trouve leur matériel génétique constitué d'un chromosome en forme de cercle. Par ailleurs, certaines bactéries disposent de flagelles ou de cils qui leur permettent de se déplacer avec vivacité. Selon la quantité et l'emplacement de ces organites, les bactéries peuvent être divisées en quatre groupes. Les monotriches ne disposent que d'un seul flagelle à l'une des extrémités de la cellule. Les lophotriches qualifient les bactéries possédant une touffe de flagelles polaires et les amphotriches ne possèdent qu'un flagelle à chaque pôle. Enfin, les péritriches possèdent des flagelles qui sont placés tout autour de la cellule.

LA MORPHOLOGIE

Une des caractéristiques principales des bactéries est leur taille très petite. Les bactéries mesurent en général de 1 à 5 microns de diamètre. Elles existent sous différents aspects : cylindrique



(bactérie), sphérique (coque), en forme de virgule (vibron) ou de S (*spirille*). De nombreuses formes de bacilles

peuvent être observées : très fines ou épaisses, courtes ou longues, à extrémités arrondies, effilées en fuseaux, à bouts carrés, renflées en massue. Quant au regroupement des bactéries, il est aussi variable : bacilles isolés, groupés par paires, en chaînettes, accolés en palissades, rassemblés en paquets. En outre, les microcoques peuvent se présenter comme de petites billes sphériques ou sous un aspect rétiniforme (ménincoques et gonocoques). Ils peuvent être également oblongs ou ovalaires (pneumocoques). Ils peuvent être isolés ou groupés : soit



deux par deux (diplocoques), quatre par quatre (tétraades), en amas ou en chaînettes (streptocoques).

LA PHYSIOLOGIE

Tout comme les autres êtres vivants, les bactéries se développent, respirent et se reproduisent. Elles ont un cycle vital court qui dure de quelques dizaines de minutes à quelques heures.

NUTRITION

Leur première activité importante est la nutrition. Pour se développer, la bactérie doit réaliser la synthèse de ses substances organiques à partir de matériaux et d'énergie. Elle a donc besoin de grandes quantités d'eau, de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. À une concentration moindre, elle s'alimente d'oligo-éléments. Les différents types de nutrition permettent de distinguer les bactéries autotrophes, chimiotrophes et hétérotrophes. Mais il existe d'autres distinctions. Une bactérie est dite osmotrophe si elle absorbe des nutriments dissous dans une solution. En revanche, la bactérie phagotrophe peut ingérer des petites particules solides de nutriments.

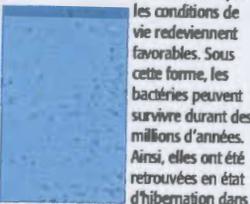
MÉTABOLISME

Les bactéries qui ont besoin d'air pour vivre sont dites aérobies. En revanche, celles qui vivent dans des milieux dépourvus d'oxygène sont des anaérobies obligatoires. On les trouve dans les intestins de mammifères et dans le lait, dans les milieux putrescents ou pollués, dans les sédiments et au fond de la mer. Les bactéries anaérobies vivent grâce à l'oxydation. À la place de l'oxygène, les micro-organismes utilisent un ion (nitrate, sulfate et carbonate) afin d'oxyder la matière organique.

REPRODUCTION

La reproduction des bactéries s'effectue par simple scission de la bactérie mère en deux bactéries filles après duplication de son génome. Certaines bactéries se reproduisent par sporulation. Elles fabriquent alors une

spore très résistante capable de régénérer une bactérie entière lorsque



les conditions de vie redeviennent favorables. Sous cette forme, les bactéries peuvent survivre durant des millions d'années. Ainsi, elles ont été retrouvées en état d'hibernation dans

de l'ambre vieux de 135 millions d'années. Par ailleurs, la croissance des bactéries peut être très rapide et progresse généralement de manière exponentielle en raison du doublement de la population à chaque génération. Elle se poursuit tant que les substances nutritives sont disponibles. Lorsque ces dernières sont épuisées, les bactéries entrent dans une phase stationnaire qui leur permet de survivre, parfois longtemps.

ÉCOLOGIE BACTÉRIENNE

DU CORDON AU FROID

Les bactéries thermophiles vivent dans les volcans et les sources hydrothermales sous-marines chaudes. Ainsi, dans le sulfatar de Pouzzols, une espèce d'archéobactérie, *Sulfolobus solfataricus*, vit à des températures proches de 100 °C. Quant aux bactéries psychrophiles, elles sont adaptées au froid et se trouvent dans les régions polaires. En outre, les bactéries halophiles sont présentes dans des milieux très salés. Ainsi, les océans, la mer Morte et les lacs saturés en sel en contiennent. Les bactéries qui résistent à des fortes pressions sont, quant à elles, appelées barophiles. Enfin, certaines tolèrent les milieux acides et alcalins : elles sont dites acidophiles ou alcalophiles. Les bactéries présentes dans les volcans sulfureux ou dans les sources hydrothermales sous-marines acides en sont des exemples. L'espèce *Thermophila acidophilum* vit à des températures extrêmement élevées et à 3,5 km de profondeur sous la surface terrestre dans un milieu dont le pH est d'environ 1 ou 2. Certaines d'entre elles, les thiobactéries, fabriquent même de l'acide et se trouvent dans les volcans et dans les mines de pyrite.

DES BACTÉRIES PATHOGÈNES

Seulement 3% des bactéries provoquent des maladies chez l'homme. La plupart des maladies infectieuses apparaissent lorsque les défenses corporelles naturelles sont désorganisées et lorsque le système immunitaire est affaibli. Elles dépendent aussi de la virulence de la bactérie. La bactérie peut infecter de quatre façons différentes :

- elle peut endommager les cellules et les tissus de l'hôte en les colonisant ;
- elle peut également produire une toxine qui empoisonne la partie infectée du corps ou le corps tout entier ;
- elle entraîne des réactions allergiques ou d'hypersensibilité qui commandent au système immunitaire de réagir et d'attaquer le corps lui-même. Le tréponème de la syphilis, le vibron du choléra et les bacilles du tétanos en sont des exemples ;

• les bactéries peuvent aussi être responsables de maladies contagieuses chez les animaux de ferme (la tuberculose bovine ou la salmonellose du cheval). La bactérie a elle-même des parasites comme les virus bactériophages.

DES BACTÉRIES INOFFENSIVES

Mais de nombreuses espèces sont inoffensives ou jouent un rôle positif dans la chaîne du vivant. Elles participent à la digestion chez les animaux, aux chaînes alimentaires et à la biodégradation. Certaines bactéries vivent en association avec des algues. Accolées les unes aux autres, leurs cellules forment les lichens dont celles sur les toits des maisons. Une des principales caractéristiques des micro-organismes est leur adaptabilité. Ainsi, quand le milieu devient sec, certaines bactéries peuvent former des spores, cellules au repos dotées de parois isolantes. Des spores de bactéries datant d'un millier d'années ont été trouvées dans des sédiments. Lorsque l'environnement redevient favorable, la spore germe et se multiplie. Mais la variabilité des bactéries est aussi un mécanisme d'adaptabilité. Plusieurs modes de variation existent.

- L'ADN du micro-organisme peut subir une mutation spontanée.
- Le mécanisme de conjugaison peut se déclencher lorsqu'une bactérie mâle donne une partie de son ADN à une bactérie femelle.
- Dans le mécanisme de transformation, la bactérie peut absorber l'ADN de son environnement et l'intégrer à son propre ADN. Dans ces deux derniers cas, les nouveaux gènes acquis par la bactérie, seront transmis à leurs descendantes. Ainsi, certaines bactéries deviennent capables d'utiliser un nouveau nutriment ou de résister à une substance toxique ou à un antibiotique. Enfin, certains microbes peuvent vivre en association avec d'autres organismes. Par exemple, les lichens sont des associations algue-bactérie. Quant aux commensaux, ils sont une association entre la bactérie et l'animal.

DANS LES CYCLES BIOLOGIQUES

Les organismes vivants dépendent des bactéries. Ces derniers représentent 90% des réactions biochimiques produites sur terre. Ils sont à la base des chaînes alimentaires et participent aussi à la digestion. Certains éléments chimiques sont nécessaires pour la croissance des organismes vivants. Par exemple l'azote entre dans la composition des protéines. Dans le cycle de l'azote, il passe de l'état libre dans l'air, à l'état combiné (ammoniac, nitrate) dans le sol puis à l'état organique (protéine) dans les plantes. Ce cycle de l'azote comprend deux processus : d'une part la captation et l'assimilation de l'azote par les plantes pour élaborer leurs constituants azotés organiques et d'autre part la dégradation de ces mêmes matières végétales ou animales. L'action microbienne joue un rôle important dans la transformation de l'azote inorganique en azote organique ou lors de l'opération inverse. Des bactéries du sol capturent donc l'azote abondant dans l'atmosphère comme les aérobies

(*Azotobacter*) ou les anaérobies (*Clostridium*, *Plectridium* ou *Desulfotribrio*). La fixation peut être également symbiotique. Les bactéries *Rhizobium* forment des nodosités dans les racines des légumineuses.



Puis, à la mort des végétaux et des animaux ou lors de l'élimination des déchets, les bactéries restituent l'azote organique sous forme de nitrates ou d'azote atmosphérique. Elles décomposent alors les matières azotées organiques et forment de l'ammoniac. Ce dernier est ensuite oxydé en nitrites par des bactéries telles que les *Nitrosomas* puis en nitrates par des *Nitrobacter*.

Ces nitrates sont réutilisés par les plantes ou sont transformés en azote moléculaire qui rejoint l'atmosphère. Le cycle de l'azote peut alors reprendre. Les micro-organismes interviennent également dans le cycle du carbone, lié à celui de l'oxygène. Les bactéries aérobies consomment l'oxygène de l'air et rejettent du gaz carbonique. De plus, les micro-organismes aérobies et anaérobies permettent de restituer le gaz carbonique dans l'atmosphère à partir de la matière organique issue de la putréfaction de matières telles que le bois. Enfin, le cycle du soufre dépend presque exclusivement des bactéries. Dans le sol, les bactéries sulfureuses décomposent la sulfure issu de la décomposition des organismes morts en sulfates utilisables par les plantes. De plus, au fond des océans, certains vers marins abritent des bactéries sulfureuses. Ils se nourrissent de la matière organique que les micro-organismes ont synthétisé à partir des sulfures absorbés par ces mêmes vers et présente dans les sources hydrothermales.

RÔLE DANS LA DIGESTION

Le corps humain renferme dix fois plus de bactéries que de cellules humaines, soit cent mille milliards. Ces bactéries commensales utilisent l'individu comme source d'alimentation et de chaleur sans lui nuire. S'ils apportent un bénéfice à l'hôte tel que produire des vitamines, ils sont nommés symbiotes. La peau, la gorge, le nez, l'oreille et la conjonctive de l'œil sont peuplés de staphylocoques et de streptocoques. Les bactéries sont responsables de l'odeur des aisselles. Elles sont aussi présentes dans la bouche à travers la plaque dentaire et dans les intestins. Certaines bactéries contribuent à la digestion grâce à des enzymes que l'homme ne possède pas. Enfin, certains micro-organismes participent à la digestion animale. Les ruminants comme la vache et le mouton possèdent un premier estomac dans lequel la digestion de la cellulose s'effectue grâce à l'action de bactéries aérobies. Dans l'intestin des termites et de certains mollusques, des bactéries décomposent aussi la cellulose présente dans le bois rongé.