

SPOT
SCIENCES

Jean-Pierre Gratia

Sexualité, génétique et évolution des bactéries



edp sciences

Sexualité, génétique et évolution des bactéries

SPOT
SCIENCES
PANORAMA

Jean-Pierre Gratia

L'ouvrage expose des données scientifiques actuelles sur le monde des bactéries encore trop peu connu, dont l'importance dans la biosphère, les écosystèmes et la vie quotidienne de l'homme est indiscutable. Il est fort question de ce qui les caractérise au niveau sexualité et génétique. Longtemps considérées immuables et ne connaissant aucune sexualité, les bactéries sont pourtant bien sujettes aux mutations et capables d'échanges génétiques et d'évolution. Des cas de sexualité véritable consistant en la formation de zygotes diploïdes ont bien été découverts et sont en voie d'analyse au niveau de l'évolution.

L'avancement des connaissances sur cet univers d'êtres vivants microscopiques nous incite à prévoir ce que le monde de demain, qui en dépend, peut nous apporter de bien et nous invite aussi à la prudence.

Jean-Pierre Gratia, de nationalité belge, a été Chercheur Qualifié du Fonds National Belge de la Recherche Scientifique, puis agrégé de faculté à l'Université Libre de Bruxelles et collaborateur scientifique à l'Institut Pasteur de Bruxelles. Il est auteur d'essais et articles de vulgarisation scientifique.

ISBN :

978-2-7598-2538-7



Sexualité, génétique et évolution des bactéries

JEAN-PIERRE GRATIA

The logo for 'edp sciences' features the lowercase letters 'edp' in a stylized, rounded font, followed by the word 'sciences' in a clean, sans-serif font.

17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

DU MÊME AUTEUR

Genetic Flux and Horizontal Evolution in Bacteria, Proceedings of the Bageco Colloquium (1987) Éditions de l'Université Libre de Bruxelles.

Microbiologie et Biologie moléculaire en Belgique. Histoire des premiers artisans (2001) Essai, L'Harmattan, Paris.

Lettres à ma petite-fille Salomé (2016) I. *Petite histoire de la Biologie, du microbe à l'homme*. Essai, Edilivre, Saint-Denis.

Comment la Nature peut concilier l'Homme et le Microbe (2019) Essai, Edilivre, Saint-Denis.

La vie sur Terre et son devenir (2020) Essai, L'Harmattan, Paris.

Composition et mise en pages : Flexedo

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-2538-7

ISBN (ebook) : 978-2-7598-2569-1

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2021

SOMMAIRE

<i>Avant-propos</i>	5
1. Origine de la vie	7
Position des virus à l'origine	11
2. Les bactéries, leur caractérisation et leur position dans l'évolution	13
Classification sommaire des bactéries.....	17
Probiose	17
Antibiose.....	20
La place des bactéries dans l'évolution	21
Endosymbiose et participation des bactéries dans l'évolution des eucaryotes.....	23
3. Appareil génétique et mutations chez les bactéries	25
Structure et fonction des génomes procaryotiques et eucaryotiques	26
Mutations	31
4. Sexualité bactérienne et échanges génétiques	35
Cas de reproduction sexuée chez des procaryotes	36
5. Mécanismes de recombinaison génétique chez les bactéries	45
6. Génétique des virus bactériens : bactériophages et plasmides	51
Mutations de bactériophages et plasmides.....	52
Diversité des phages transducteurs.....	55
Recombinaison génétique entre phages hétérologues.....	56
Plasmides	61
7. Épigenétique bactérienne	63
8. Mouvements évolutifs chez les bactéries	67
9. Aspects génétiques et épigénétiques des écosystèmes bactériens	75
Écosystèmes bactériens terrestres.....	76
Fixation de l'azote	79
Écosystèmes bactériens marins.....	80
Bactéries bioluminescentes	83
Bactéries extrémophiles.....	84
Adaptation aux changements de conditions environnementales.....	87
10. De la génétique moléculaire des bactéries et leurs virus à la bioingénierie	91
Manipulations génétiques à visée bioingénierie	93
Autres performances biotechnologiques.....	96

11. Analyse génétique de la pathogénicité bactérienne	99
Déterminants génétiques de l'antibiorésistance	104
Stratégies de défense naturelle	105
Bactéries cancérogènes.....	106
12. Quelques questions en quête de réponse	107
Observations qui posent question.....	109
Inquiétudes	111
En conclusion.....	113
<i>Glossaire</i>	115
<i>Références</i>	135
<i>Bibliographie complémentaire</i>	165

AVANT-PROPOS

La biologie, qui est loin d'être une activité marginale, a pour objectif d'apporter son lot de réponses sur la nature et ses composantes. L'examen approfondi du monde encore trop peu connu des bactéries, dont l'importance dans la biosphère, les écosystèmes et la vie quotidienne de l'homme est indiscutable, fait surgir des singularités qui n'ont pas toujours attiré l'attention des chercheurs et qui sont très souvent ignorées.

L'identification des espèces bactériennes qui occupent toute la biosphère et l'estimation de leur rôle respectif sont essentielles pour comprendre l'étendue et la stabilité des cycles biogéochimiques.

Chaque jour, de l'information nouvelle et instructive concernant les bactéries et leurs virus parvient au biologiste et au naturaliste jusqu'à ce qu'ils jugent utile de la divulguer. Cet ouvrage-ci se focalise sur l'origine des bactéries, leur diversité, leur génétique et leur évolution. Il y est fort question de la participation des virus bactériens, que sont les bactériophages entre autres, dans les différents processus décrits. Les relations évolutives entre les bactéries et les autres organismes vivants, dont l'homme, aident à comprendre les phénomènes liés à la santé, à l'exploitation des ressources naturelles et à l'écologie, dont la biodiversité et la bioremédiation de l'environnement.

Parmi les questions qui se posent, une attention particulière est donnée aux phénomènes de sexualité et de génétique chez ces organismes et leurs virus. On a longtemps considéré les bactéries comme non sujettes aux mutations et incapables d'échanges génétiques et d'évolution. Encore actuellement, les auteurs considèrent que les procaryotes, dont les bactéries, sont toujours haploïdes et ne connaissent aucune sexualité consistant en la formation de zygotes diploïdes. Or il n'en est rien, car les bactéries peuvent acquérir les propriétés de syngamie et de méiose, jusqu'ici attribuées aux seuls eucaryotes.

Même si la rédaction de textes scientifiques se limite à l'interprétation objective et rigoureuse de faits tangibles, l'exploration du monde microbien amène des questions qui peuvent surprendre et s'éloigner des connaissances traditionnelles.

Outre l'impact des connaissances scientifiques sur les bactéries, et leur génétique en particulier, sur le développement de la recherche fondamentale, biomédicale ou industrielle, l'avancement des connaissances sur cet univers d'êtres vivants microscopiques nous incite à prévoir ce que le monde de demain, qui en dépend, peut nous apporter de bien et nous invite aussi à la prudence.

Le présent ouvrage n'est pas exhaustif et s'adresse à une assez large audience comprenant, en plus des microbiologistes, des étudiants et des lecteurs épris de science. Il a l'avantage d'opérer un large travelling à travers toutes les données scientifiques dans le domaine de la génétique bactérienne. En fin d'ouvrage, une liste de références aidera le lecteur à élucider tel ou tel point particulier et un glossaire fournira de l'information sur les mots-clés, dont certains, peu usités, sont définis dans le texte la première fois qu'ils sont écrits.

Je remercie le professeur Charles Gerday pour sa lecture attentive et critique du manuscrit tout entier et le professeur Michel Penninckx pour un complément d'information.

Jean-Pierre Gratia
Bruxelles, 15 octobre 2020

1

Origine de la vie

L'origine de la vie a toujours passionné et intrigué, de même que la question de l'existence possible de certaines formes de vie sur d'autres planètes. On est loin des conceptions d'Aristote, pour qui tout ce qui existe et se produit dans la nature est réalisé en vue d'une fin déterminée et pour qui il y a passage graduel et continu des objets inanimés aux êtres vivants par l'adjonction d'âmes hiérarchisées. Pourtant, dans l'Antiquité grecque encore, vers 400 av. J.-C., Démocrite, que certains considèrent comme le plus scientifique des philosophes grecs, aurait déjà mentionné l'existence de particules insécables qu'il appelait « atomes » et qui auraient pu, en s'assemblant, donner naissance aux premiers êtres vivants.

Après que Darwin ait eu conscience que les organismes évoluaient à partir d'organismes plus simples, lesquels pouvaient avoir pris naissance à partir d'une première cellule ancêtre, Ernst Haeckel entreprend de jeter des ponts entre la nature inorganique et la matière vivante, s'inspirant de la croissance des cristaux pour imaginer la condensation de la « monère » primitive, sorte de substance colloïde.

L'origine de la vie est le résultat de transformations de la matière inanimée via une série de réactions chimiques selon un processus tellement long qu'il a peu de chance d'être reproductible. Plusieurs théories ont été émises depuis un siècle, mais la préférence semble privilégier l'hypothèse de l'apparition d'un métabolisme primitif. Une des premières versions de cette hypothèse fut présentée en 1924 par l'académicien russe Alexandre Oparin avec son idée de vésicules primitives capables de se répliquer (coacervats).

Le premier problème des conditions dans lesquelles les processus conduisant à la vie ont pu se faire concerne l'origine du carbone, l'atome de base chez un être vivant. Le carbone est l'élément-clé de toutes les architectures moléculaires. Les volcans ont dégagé lors de leurs éruptions des torrents de gaz carbonique issus de la dissolution des pierres dans les hautes températures des strates profondes de notre planète. Sans la chaleur du noyau central, cette production de gaz carbonique se serait épuisée rapidement aux dépens de la photosynthèse, chez les plantes entre autres.

Sur la Terre, des nappes liquides aquatiques purent se déposer et héberger l'éclosion de la vie, qui n'aurait jamais commencé sans l'eau. En effet, les êtres vivants sont constitués d'un agencement ordonné de molécules complexes. Or, pour créer de tels édifices, il a fallu que des molécules organiques simples réagissent chimiquement ensemble de façon à se polymériser et/ou se transformer. Ceci implique un milieu permettant à ces réactions de se faire et seul un liquide peut remplir ce rôle puisque les atomes à l'intérieur d'un solide ne peuvent se déplacer et se rencontrer. La chimie liée aux réactions est possible dans un gaz, mais elle est beaucoup moins efficace que dans un liquide et, parmi les liquides, l'eau est la plus fluide (du moins parmi les liquides biotiques, l'essence et le kérozène étant encore plus fluides) et permet aux réactions chimiques nécessaires à la vie de se produire très efficacement.

Les expériences que Stanley Miller a réalisées en 1953 avec Harold Urey constituent une étape importante. Ils ont en effet réussi à

produire des acides aminés, qui sont les constituants de base des protéines, à partir de molécules simples comme l'ammoniaque¹. Actuellement, les hypothèses qui ont obtenu l'appui de l'expérimentation sont en faveur de la succession de plusieurs processus distincts étalés sur plusieurs millions d'années. Ces processus ont convergé vers la synthèse de composés présumés capables de réplication et d'évolution ; puis ces constituants principaux se seraient assemblés sur des supports colloïdaux comme l'argile pour former une trame où peuvent fonctionner les acides nucléiques, les moteurs de la synthèse des protéines assurant la structure et les fonctions de la cellule vivante.

Pendant près de 2,5 milliards d'années, l'oxygène a existé à l'état combiné à d'autres atomes, mais pas à l'état de molécule d'oxygène libre (O₂). Puis l'oxygène se serait produit dans l'eau et, après avoir saturé l'eau des mers, se serait échappé dans l'atmosphère, tuant les organismes vivants incapables d'utiliser l'oxygène et de le supporter. Il faut supposer que de rares organismes auraient déjà développé des précurseurs d'enzymes nécessaires à leur survie en atmosphère oxygénée. La respiration aérobie aurait alors pu commencer et servir au développement de la vie que nous connaissons².

Les êtres vivants sont toujours des réseaux autocatalytiques. Toutes leurs molécules (acides aminés, protéines, sucres, nucléotides et acides nucléiques, etc.) réagissent avec les molécules ingérées pour produire des molécules semblables à elles-mêmes. Jack Szostak réalisa une protocellule contenant un acide nucléique rudimentaire capable de se répliquer³.

La présence constante des différents types de molécules découle de leur origine commune. Ils composent la biosphère qui est le système écologique global, auto-entretenu, qui intègre tous les êtres vivants et les relations qu'ils tissent entre eux et avec l'environnement, dans un métabolisme qui transforme sans cesse la surface de la Terre en recyclant ou en stockant les éléments et en créant de la complexité. Le concept de biosphère dans ses aspects biogéologique et écologique a été énoncé par Vladimir Vernadsky en 1920, avant qu'Arthur George

Tansley ne développe la notion d'écosystème en 1935⁴. L'évolution biologique a amplifié un patrimoine moléculaire fondamental. C'est le flux ininterrompu d'énergie arrivant à la surface de la Terre qui a fait naître puis a modelé et diversifié la biosphère.

Les premières cellules vivantes (protocellules) seraient apparues il y a 3,5 milliards d'années. Le Protérozoïque démarre un milliard d'années plus tard et voit apparaître les premières algues et les premiers invertébrés.

La vie aurait pris naissance dans les océans, protégés des rayons ultraviolets par la couche nuageuse, il y a près de 4 milliards d'années. L'atmosphère primitive de la Terre, qui était sans oxygène et sans ozone, laissait passer les UV du soleil. Le chimiste Günter Wächtershäuser pense que la vie est apparue dans un milieu chaud sulfuro-ferreux en absence d'oxygène⁵. Or ce milieu est proche de celui des cheminées hydrothermales où vivent de nombreux microorganismes hyperthermophiles. Ces faits relatifs à l'existence d'une forme de vie au niveau de sites hydrothermaux fossilisés illustrent les capacités étonnantes d'adaptation de la vie. En rapport avec cette hypothèse, la réaction hydrothermale d'hydratation et d'oxydation des roches basiques et ultrabasiques océaniques apporte des réponses fortes aux contraintes du vivant : une source d'énergie, des molécules organiques par synthèse abiotique, les briques des principales bio-macromolécules ainsi qu'un espace confiné pouvant faire office de réacteur chimique du vivant⁶. L'eau de mer du fond océanique constitue le fluide de réaction.

La découverte de microorganismes dans les anfractuosités de la roche ou enfouis à des centaines de mètres dans le sous-sol⁷ ne signifie pas que leur origine est terrestre. Leurs ancêtres auraient pu être apportés par les courants marins responsables du renouvellement des roches. Les climats, aux variations desquels est soumis tout ce qui vit sur la Terre, dépendent des mouvements océaniques bien plus que de la distribution et du relief des continents. Ensuite, il n'est pas certain que les microorganismes, dont les bactéries, aient été les premiers êtres vivants.

Il n'est pas impossible que le milieu interstellaire ait pu apporter sur Terre des éléments prébiotiques essentiels à l'apparition de la vie. Mais le fait que des composés élémentaires de la vie sur Terre aient été trouvés sur des météorites ne permet pas encore de donner une base scientifique de l'origine de la vie dans l'espace, puisque la vie implique la synthèse de biopolymères de structure (polysaccharides, lipides et protéines) et des molécules à fonction enzymatique (protéines) ou codante (acides nucléiques).

L'acide désoxyribonucléique (ADN) recèle toute l'information génétique permettant aux êtres vivants de vivre, de croître et de se reproduire. Il est formé de deux chaînes qui sont des polymères de nucléotides, qui sont des bases puriques (A, adénine et G, guanine) ou pyrimidiques (C, cytosine et T, thymine), liés à un sucre, le désoxyribose, et dont l'ordre de succession constitue l'information génétique. On ignore cependant si, au cours des milliards d'années de l'histoire de la vie, l'ADN a toujours joué ce rôle. Une théorie propose que ce serait un autre acide nucléique, l'acide ribonucléique (ARN) formé d'une seule chaîne constituée de bases nucléotidiques (où la thymine est remplacée par l'uracile) liées au ribose au lieu du désoxyribose, qui ait été le support de l'information génétique des premières formes de vie apparues sur notre planète⁸. L'ARN aurait joué le rôle central dans une première forme de métabolisme cellulaire dans la mesure où il est susceptible de véhiculer de l'information génétique et de catalyser des réactions chimiques en formant des complexes d'acide ribonucléique et d'enzymes, appelés ribozymes, dont les propriétés catalytiques sont liées à la capacité de l'ARN de se replier pour former une structure compacte bien définie⁹.

POSITION DES VIRUS À L'ORIGINE

La cristallisation du virus de la mosaïque du tabac due à Wendell Stanley révèle une propriété propre aux substances inanimées¹⁰. Ce qui est en accord avec la conception actuelle des virus selon laquelle ils ne seraient pas assimilables à des êtres vivants puisqu'ils ne répondent

pas aux trois critères de la vie : production d'énergie, biosynthèse pour la croissance, reproduction. Le virus donne simplement le signal à la cellule infectée de la réponse de celle-ci à l'infection et son code génétique.

Depuis la découverte de virus géants d'amibes, longs d'un micromètre (μm) et larges de $0,5 \mu\text{m}$ (*Escherichia coli* mesure $5-10 \mu\text{m}$ sur $1 \mu\text{m}$), avec un génome composé de 1,9 million de bases nucléotidiques¹¹, on se demande si les virus sont antérieurs ou postérieurs aux premières cellules vivantes.

Pour certains auteurs, des nucléoprotéines primitives auraient pu persister à la faveur d'un système de répllication et deviendraient des systèmes indépendants capables d'évoluer. Mais comme la formation du virus est le résultat de la cellule infectée, d'autres auteurs interprètent la genèse des virus comme résultant d'une altération cellulaire générant des particules virales passant par une phase extracellulaire. En fait, pour certains, des virus auraient co-évolué avec des ancêtres cellulaires et auraient choisi la voie de la réduction évolutive¹².

Des considérations théoriques suggèrent que les virus à ARN peuvent provenir du monde des nucléoprotéines par échappement ou réduction des cellules à ARN, alors que les virus à ADN (au moins certains d'entre eux) pourraient avoir évolué directement à partir de virus à ARN. L'ancienneté des virus peut expliquer pourquoi la plupart des protéines virales n'ont pas d'homologues cellulaires ou seulement des homologues éloignés. Le remplacement des protéines cellulaires par des protéines virales se serait également produit au début de l'évolution de l'appareil de répllication de l'ADN ; certaines protéines de répllication de l'ADN proviendraient directement des virus pour être transférées plus tard aux organismes cellulaires. Les virus auraient ainsi joué un rôle critique dans les transitions évolutives majeures, telles que l'invention des mécanismes de répllication de l'ARN et de l'ADN¹³.

2

Les bactéries, leur caractérisation et leur position dans l'évolution

Les bactéries sont des procaryotes qui, à la différence des organismes eucaryotes que sont les animaux, les végétaux, les champignons et les protistes, n'ont pas de noyau et se reproduisent par simple division. Il existerait plus de 10 000 espèces de bactéries qui font partie intégrante de la biosphère et dont la diversité réelle est encore loin d'être déterminée. Plusieurs d'entre elles ont des propriétés surprenantes. C'est ainsi qu'à côté des bactéries dites mésophiles qui vivent dans un environnement où la température est modérée, la pression proche de la pression atmosphérique, la salinité faible et le pH proche de la neutralité, des bactéries extrémophiles vivent dans des lieux où les conditions de vie sont très éloignées de celles dans lesquelles évoluent les autres organismes vivants.

De grandes différences apparaissent entre ces procaryotes, notamment au niveau des enveloppes qui comprennent une paroi et des membranes externe et interne. Le cytoplasme bactérien est constitué d'environ 80 % d'eau et se définit comme une émulsion colloïdale

à l'aspect granuleux constituée de cytosol, solution aqueuse de sels minéraux et de divers composés organiques. Avec le cytosquelette, il englobe la totalité du matériel cellulaire limité par la membrane interne (ou cytoplasmique). Il ne contient pas d'organites mais des ribosomes, le siège de la synthèse des protéines, des substances de réserves et un génome constitué d'ADN, le support de l'information génétique.

La forme est caractéristique et diffère assez considérablement d'une espèce à l'autre : bacilles en forme de bâtonnets, formes ondulées, etc. Non seulement la forme des bactéries mais aussi leur taille est très variable, entre 2 dixièmes de micromètre ($0,2 \mu\text{m}$) et 5 dixièmes de millimètre ($0,5 \text{ mm}$). Elles sont pourvues, le long du corps ou sur un pôle, de flagelles qui assurent leur mobilité et de petits cils, pili et fimbriae, dont les fonctions sont l'agrégation bactérienne, la formation de biofilms, où les bactéries adhèrent entre elles et sur n'importe quelle surface, et, éventuellement, l'intervention dans les échanges génétiques et les infections¹⁴.

La croissance d'une population bactérienne dans un milieu de culture liquide non renouvelé présente quatre phases : une phase de latence qui correspond à une période d'adaptation de la bactérie au milieu ; une phase de croissance exponentielle, au cours de laquelle les bactéries se développent avec un taux de croissance maximal et constant ; une phase stationnaire qui correspond au début de l'épuisement des nutriments ; la phase de mortalité ou de déclin quand le milieu de culture ne permet plus aux bactéries de se diviser et de survivre. Les conditions environnementales influencent la croissance des bactéries, comme la température, la présence d'oxygène (O_2) et de dioxyde de carbone (CO_2), la disponibilité de l'eau, l'acidité ou l'alcalinité du milieu. Le pH optimal de croissance de beaucoup de bactéries est proche de la neutralité (pH7). Le temps de génération entre deux divisions successives varie d'une espèce à l'autre.

Pour réaliser leur métabolisme, les bactéries utilisent l'adénosine-triphosphate (ATP), la source d'énergie commune à toutes les formes

de vie. Leur métabolisme diffère en fonction des sources de carbone et d'énergie utilisées pour la croissance, les donneurs d'électrons et les accepteurs d'électrons. Les *hétérotrophes* utilisent des substrats organiques comme source de carbone. Chez les *autotrophes*, la source de carbone est le CO_2 et l'énergie cellulaire est soit d'origine chimique dans le cas des *chimio-autotrophes*, soit d'origine lumineuse chez les *photo-autotrophes*. Parmi les bactéries chimio-autotrophes, les *lithotrophes* réduisent des composés minéraux et les *organotrophes* utilisent des substances organiques. Les bactéries *prototrophes* sont capables de croître en présence d'eau, d'une source de carbone, le glucose par exemple, d'une source d'azote et d'éléments minéraux. Elles sont dites *auxotrophes* dès qu'elles nécessitent, en plus, un ou plusieurs facteurs de croissance présents dans l'environnement : bases puriques ou pyrimidiques, acides gras, acides aminés, vitamines ou divers composés comme l'hème et ses dérivés. C'est le cas des mutants auxotrophes d'*Escherichia coli*, dont la souche sauvage est prototrophe, qui ont perdu par mutation le pouvoir de biosynthèse d'une substance.

Quand elles procèdent à la respiration, les bactéries *aérobies* utilisent l'oxygène et les bactéries *anaérobies* utilisent une molécule oxydée, le nitrate (NO_3^-), le sulfate (SO_4^-) ou le dioxyde de carbone (CO_2), comme accepteur final d'électrons. Au cours de la fermentation, le substrat (glucides, acides aminés, nucléotides) est le donneur d'électrons tandis qu'un autre composé organique est l'accepteur d'électrons. La fermentation alcoolique conduit à la formation d'éthanol et de CO_2 . Les bactéries anaérobies sont dites strictes quand elles ne sont pas du tout capables de se multiplier en présence d'oxygène et facultatives quand elles sont capables de modifier leur métabolisme selon les conditions du milieu où elles se trouvent.

Comme les archaeas, qui sont d'autres procaryotes, on trouve des espèces bactériennes *extrémophiles* qui vivent dans des conditions abiotiques pour les eucaryotes, telles que celles rencontrées dans les sources chaudes sulfureuses ou les cheminées hydrothermales sous-marines. La bactérie polyextrémophile *Deinococcus radiodurans* cumule plusieurs

résistances et cette capacité de survie est due à sa structure cellulaire particulière et à son système très perfectionné de réparation de l'ADN. Il résiste aux UV et radiations ionisantes, aux acides et peroxyde d'hydrogène, aux températures extrêmes, au vide, au froid, etc.¹⁵

Les extrémophiles sont rares dans les conditions ordinaires. En effet, lorsqu'ils sont capables de résister à ces conditions extrêmes parce que leur métabolisme spécial nécessite ces conditions, ils supportent mal la concurrence d'organismes banals. On distingue les extrémophiles vrais, qui vivent exclusivement en conditions extrêmes, et les extrême-tolérants capables de prendre provisoirement une forme résistante aux conditions défavorables en suspendant leurs fonctions vitales ou en se protégeant par la formation d'une spore¹⁶. Cette dernière peut aussi exister chez certaines bactéries non extrémophiles, dont *Bacillus* ou *Clostridium*, pour résister à des conditions physiques et chimiques extrêmes telles que l'exposition au vide, le rayonnement dans l'espace, les détergents ou désinfectants, une forte chaleur ou pression, et même la dessiccation¹⁷.

Il y a adaptation à la sécheresse chez les bactéries productrices d'agents surfactants, qui ont une haute affinité avec les molécules d'eau présentes dans l'atmosphère et forment avec elles des chaînes et donc des gels où la bactérie peut se développer jusqu'à un certain point. Elles sont alors capables de survivre sur des pièces métalliques, comme des appareils utilisés en médecine. Parmi ces bactéries, *Serratia marcescens* peut produire à la fois un pigment rouge et un gel formé par un aminolipide extrêmement hydrophile capable d'engendrer des chaînes comprenant de nombreuses molécules d'eau provenant de l'air¹⁸. C'est la production de ce gel qui explique le phénomène de *swarming* qui se caractérise par le développement d'une colonie envahissant toute une boîte de Pétri à partir du point d'inoculation. Cela a aussi été la cause des hosties sanglantes trouvées au XIV^e siècle et considérées comme un miracle puisqu'elles suintaient un liquide rouge légèrement gélifié qui faisait croire au sang du Christ.

CLASSIFICATION SOMMAIRE DES BACTÉRIES

Parmi les bactéries examinées au microscope, on en distingue qui sont à Gram positif (Gram⁺) ou à Gram négatif (Gram⁻) selon qu'elles sont résistantes ou non à la décoloration du violet de gentiane par l'alcool. Mentionnées ici :

– les *Protéobactéries* sont Gram⁻ et comprennent les *Enterobacteriaceae* (*E. coli*, *Salmonella*, *Vibrio*), *Ideonella*, les *Rickettsia*, les *Pseudomonadales* et *Sphingomonadales*, les *Rhizobiales*, *Caulobacter* ;

– les *Firmicutes* sont pour la plupart Gram⁺ et peuvent se trouver dans les flores internes des hôtes animaux ou humains (*Bacillus*, *Lactobacillus*, *Clostridium*, *Enterococcus*, *Streptococcus*) ;

– les *Acidobactéries* sont acidophiles, physiologiquement diversifiées et peuvent être trouvées dans le sol, les sources chaudes, les océans, les grottes ;

– les *Actinobactéries* sont soit Gram⁺, filamenteuses et peuvent vivre dans l'eau ou le sol, comme *Arthrobacter*, soit symbiotiques de plantes à l'intérieur desquelles elles fixent l'azote de l'air et produisent des antibiotiques naturels (*Actinomycètes*), soit saprophytiques, dont les *Mycobactéries* qui sont alcalo-acido-résistantes et donc ni Gram⁺ ni Gram⁻ ;

– les *Aquificacées* sont autotrophes, Gram⁻ et comprennent deux espèces d'*Aquifex* hyperthermophiles.

PROBIOSE

Les microbes sont présents en nous et plus ou moins intimement chez divers animaux. On aurait identifié jusqu'à dix mille espèces différentes de bactéries (dans l'ensemble des humains, non dans un même individu). Cette flore contient aussi en moindre quantité des archaeas et diffère selon les individus et les organes de l'hôte. On appelle *microbiotes* les flores qui prédominent ou sont durablement adaptées à la surface et à l'intérieur d'un organisme vivant.

Le côlon contient une flore bactérienne abondante qui constitue le microbiote intestinal dont la composition est influencée par des

facteurs génétiques et environnementaux. En effet, la flore intestinale est spécifique de chaque individu, comme le montre la comparaison entre les faux jumeaux, dizygotiques, où elle diffère, et les jumeaux vrais, monozygotiques, où elle est identique¹⁹. Elle diffère selon les âges et peut être modifiée suite au stress, au vieillissement, aux mauvaises habitudes alimentaires et à l'usage d'antibiotiques. Les microbiotes intestinaux jouent un rôle à différents niveaux : digestion, production de vitamines, participation à la résistance contre la colonisation de l'intestin par des microbes pathogènes, détoxification et stimulation de la motilité intestinale²⁰.

Parmi les microbes intestinaux chez les ruminants, il y a des archaeas méthanogènes qui, producteurs de méthane, jouent un rôle écologique majeur dans des environnements anaérobies où ils suppriment les excès d'hydrogène et de produits issus de fermentation par d'autres formes de respiration anaérobie²¹.

Plusieurs espèces de bactéries se sont révélées influencer de façon diverse le poids chez l'homme et chez l'animal. Chez des vers nématodes, on a observé une influence sur la mobilité, la période de fertilité et la durée de vie par une surproduction d'indol par des mutants d'*E. coli* bloqués dans la synthèse du tryptophane²².

Il existe un axe côlon-cerveau, où certains neurotransmetteurs produits par les microbiotes contribuent à restaurer la santé chez des personnes souffrantes. En effet, les bactéries dans l'intestin produisent des hormones et des neurotransmetteurs qui agissent sur notre comportement²³. Elles interagissent d'abord directement avec le mucus qui recouvre les parois internes de l'intestin. Elles communiquent ensuite avec les cellules épithéliales à l'intérieur de celles-ci. Quand la paroi intestinale fuit ou est modifiée, les bactéries peuvent pénétrer dans les tissus et activer le système nerveux entérique, lesquelles alors envoient des signaux au système nerveux central, donc au cerveau. Inversement, le stress a un effet sur le microbiote intestinal, comme on l'a montré chez la souris²⁴. Le nerf vague qui relie le cerveau à l'intestin est la voie par laquelle le microbiote et le cerveau échangent des

Chapitre 10

Encyclopedia Universalis (2002) *Organismes génétiquement modifiés*. 16, 695-699.

Gros F (1990) *L'ingénierie du vivant*. Odile Jacob, Paris.

Watson JD (1978) *Biologie moléculaire du gène*. InterÉditions, Paris.

Chapitre 11

Sansonetti P (2009) *Des microbes et des hommes. Guerre et paix aux surfaces muqueuses*. Fayard, Paris.

Smith H *et al.* (eds) (2001) *The activities of bacterial pathogens in vivo*. River Edge, New Jersey.

Wilson BA *et al.* (2010) *Bacterial Pathogenesis: A Molecular Approach* (3rd ed.). American Society for Microbiology, Washington DC.

