



CARNETS  
DE  
SCIENCES



Laurent Palka



# Le peuple microbien

éditions  
Quæ



Laurent Palka

# Le peuple microbien

Éditions Quæ

## Collection *Carnets de sciences*

### **Nos abeilles en péril**

Vincent Albouy, Yves Le Conte  
2019, 192 p.

### **Les secrets des algues**

Véronique Véo-Leclerc, Jean-Yves Floc'h  
2019, 168 p.

### **Anatomie curieuse des vagues scélérates**

Michel Ollagnon, Janette Kerr  
2019, 176 p.

### **Les mammifères marins**

Jean-Pierre Sylvestre  
2018, 168 p.

### **Pollinisation, le génie de la nature**

Vincent Albouy  
2018, 184 p.

### **Des insectes en ville**

Vincent Albouy  
2017, 184 p.

### **Les insectes sociaux**

Éric Darrouzet, Bruno Corbara  
2016, 168 p.

### **Cap sur le grand continent blanc**

Jean-Pierre Sylvestre, Sylvain Mahuzier  
2016, 184 p.

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex

[www.quae.com](http://www.quae.com)

© Éditions Quæ, 2020

ISBN (papier) : 978-2-7592-3221-5

ISBN (pdf) : 978-2-7592-3222-2

ISBN (ePub) : 978-2-7592-3223-9

ISSN : 2110-2228

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction même partielle du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6<sup>e</sup>.

## SOMMAIRE EN IMAGES



Différents paysages du peuple microbien

# SOMMAIRE

Avant-propos.....	6
Guide de lecture.....	8
<b>La fabuleuse histoire du microbiote .....</b>	<b>15</b>
Un monde difficile à classer.....	17
Un monde difficile à nommer.....	20
Une mosaïque de microbiotes.....	21
Tout au long de la vie .....	25
Des bactéries aux commandes .....	27
Le cerveau sous contrôle .....	30
Des microbiotes aux vertus insoupçonnées.....	32
Des bactéries abondantes chez les bébés.....	34
Quand des bactéries s'installent dans l'estomac.....	36
<b>Un atout pour la société .....</b>	<b>39</b>
Les antibiotiques en question.....	41
Des pathogènes et le monde.....	44
La peur des microbes.....	46
Une source d'innovations .....	48
Un potentiel à exploiter.....	51
Des bactéries du lait dans le fromage .....	56
Des paillettes de cyanobactéries.....	58
Une moisissure dans les habitations.....	60
Un virus à la mauvaise réputation .....	62
Un virus XXL .....	64
<b>Des microalgues à grande échelle.....</b>	<b>67</b>
Les efflorescences planctoniques.....	69
Des bactéries pas comme les autres.....	70
Des poupées russes microbiennes.....	73
Des efflorescences de protistes.....	74
Le rôle des virus.....	76
Le risque de la fertilisation marine.....	77
Des colonies de cyanobactéries à la surface de l'eau.....	80
Quand les cyanobactéries changent la couleur de l'eau .....	82
Des colliers de cyanobactéries.....	84
La plus petite microalgue eucaryote au monde .....	86
Une microalgue en forme de Spoutnik.....	88
Une diatomée en dentelle.....	90
Un dinoflagellé en forme de toupie .....	92

<b>La vie terrestre des micro-organismes</b> .....	95
Un cilié aquatique en pleine forêt .....	97
Le pouvoir de se faufiler .....	99
L'union fait la force .....	100
Un réseau souterrain très utile .....	102
Des nématodes à la rescousse .....	104
Tout se transforme .....	105
Un champignon en symbiose avec les racines .....	108
Un ver prédateur dans la forêt .....	110
Une cyanobactérie qui aime l'obscurité .....	112
Une amibe et ses chlorelles dans les tourbières .....	114
<b>Aux limites de la vie microbienne</b> .....	117
La bactérie du désert .....	119
Une archée qui ne manque pas de sel .....	120
La vie en eau chaude .....	121
La vie sous la calotte glaciaire .....	123
Dans les abysses et au-delà .....	125
La biosphère profonde .....	128
Quand les extrêmes se combinent .....	130
Du sel sans modération pour cette archée .....	132
Une bactérie aux nombreux records .....	134
Une archée des abysses .....	136
Un virus géant des extrêmes .....	138
<b>À travers le temps et l'espace</b> .....	141
Les premières traces microbiennes .....	143
Les microfossiles .....	144
Un Jurassic Park microbien .....	146
Des micro-organismes dans l'espace .....	149
Un microfossile qui rayonne .....	152
Des bactéries du temps des dinosaures .....	154
Une diatomée marine du Crétacé .....	156
Des amibes du Crétacé .....	158
L'indestructible « ourson d'eau » .....	160
Des cyanobactéries nutritives .....	162
Épilogue .....	164
Bibliographie .....	168
Remerciements .....	169
Les auteurs des fiches .....	170
Crédits iconographiques (hors fiches) .....	173

## AVANT-PROPOS

Ce livre est un voyage naturaliste extraordinaire, comme dans le roman de Jules Verne *Voyage au centre de la Terre*. À ceci près qu'il explore les entrailles non pas d'un volcan, mais du corps humain, des animaux et des plantes, de la ville, de l'océan, du sol, de la calotte glaciaire, des abysses et au-delà, de la biosphère profonde et même de la Station spatiale internationale. C'est une exploration tous azimuts et à toutes les échelles spatiales et temporelles, mais pour chercher quoi ?

Durant votre lecture, vous ne tomberez pas nez à nez avec des champignons géants fantastiques ou des « fossiles vivants » (quoique...), comme dans le roman de Jules Verne, mais sur un monde bien réel, même si sa perception dépend des instruments utilisés et si l'imaginaire n'est pas très loin : le peuple microbien, celui des virus, bactéries, archées, microalgues, protistes ciliés et amibes, nématodes et tardigrades. En six chapitres, vous découvrirez la mosaïque de microbiotes du corps humain et les liens inattendus qu'ils entretiennent avec les organes. La manière dont notre société utilise les micro-organismes et s'il faut en avoir peur, en particulier dans les transports en commun. Ce que révèlent les efflorescences dans les océans et les cours d'eau. Comment les micro-organismes s'adaptent, s'associent et tissent leur « toile » dans les sols. Quelles sont leurs limites dans les milieux chauds, froids, sous haute pression ou hypersalés. Et enfin, quelles traces ont-ils laissées dans le passé et sont-ils présents dans l'espace. Un monde d'une extrême diversité et complexité que la science n'en finit pas de dévoiler.

Chaque chapitre offre un foisonnement d'explications, tantôt élémentaires, tantôt approfondies, et d'anecdotes souvent insolites, assemblées comme les pièces d'un gigantesque puzzle. Ne soyez pas surpris si l'échelle du gène est omniprésente. C'est à ce niveau que l'on identifie aujourd'hui les espèces et les communautés, quel que soit leur milieu (salive, selles, sol, océan, etc.), que l'on repère les micro-organismes et les virus inconnus, que l'on dénombre les populations et que l'on comprend comment elles interagissent. On ne peut pas s'en passer. Mais travailler à l'échelle du gène ne permet pas de décrire le phénotype, c'est-à-dire les caractères apparents d'une espèce. Or pour exister pleinement, il est nécessaire d'être vu et décrit. Dès lors, un deuxième outil scientifique plus ancien et non moins essentiel est indispensable, le microscope.



C'est pourquoi chaque chapitre est complété par des photographies prises à différents grossissements. Beaucoup sont sous forme de fiches didactiques qui décrivent des spécimens, l'endroit où ils ont été trouvés, quels caractères permettent de les identifier, leur écologie, leur relation avec l'homme. Ces photographies et les explications qui les accompagnent sont le résultat du travail de scientifiques qui partagent des connaissances produites au Muséum national d'histoire naturelle, à l'université, au Centre national de la recherche scientifique (CNRS), à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), au Genoscope, à l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer), à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) ou à l'Institut Pasteur. C'est une chance d'y avoir accès.

Avant de laisser place à la lecture, je voudrais dire combien Micropia, le premier musée consacré avec bonheur aux micro-organismes et aux virus, que j'ai visité peu après son ouverture en septembre 2014 à Amsterdam, m'a convaincu d'en parler de façon positive, et de montrer qu'ils sont plus bénéfiques et fascinants que dangereux. Patatras ! La rédaction du livre s'achève en pleine pandémie cauchemardesque du *Coronavirus*. Je reste malgré tout confiant que toutes les explications, anecdotes et illustrations susciteront la curiosité et l'émerveillement plutôt que la peur, et vous donneront l'envie d'en savoir plus sur ce peuple microbien, si loin de nous et si présent à la fois.

Que le voyage extraordinaire commence.

*Ce livre est dédié à Alain Couté, un copain d'abord,  
scientifique et explorateur, notamment des fonds marins.  
Jamais, au grand jamais, son trou dans l'eau ne se refermera.*

## GUIDE DE LECTURE

Généralement, pour voyager, il est nécessaire de préparer un minimum d'affaires à emporter. Ici, ce sont des définitions réunies dans ce guide de lecture qui serviront de bagages. Vous en trouverez aussi en chemin, c'est-à-dire dans le texte à la suite des termes pour lesquels une explication est nécessaire.

La **cellule** est l'unité morphologique et fonctionnelle de base chez tous les êtres vivants, *a fortiori* les bactéries, les archées et les protistes, pour lesquels elle constitue la totalité du soma, autrement dit du corps. Avec une simple cellule, ces micro-organismes, dits « unicellulaires », doivent assurer toutes les fonctions vitales : la nutrition, la croissance, la reproduction, etc.

Les **bactéries** sont des procaryotes, c'est-à-dire des cellules sans noyau et sans organite, à l'exception des thylakoïdes des cyanobactéries dont il sera question dans le chapitre sur les efflorescences. Les bactéries ne possèdent pas de noyau, mais une masse immergée dans le cytoplasme, le nucléoïde, contenant de l'ADN circulaire lié à des protéines.

La morphologie des bactéries est simple, soit sphérique (coccus), soit en bâtonnets droits (bacilles), courbés, spiralés ou hélicoïdaux. La plupart mesurent en moyenne un micromètre ( $\mu\text{m}$ ) de long, ce qui correspond à un millième de millimètre. Les plus petites ont été trouvées en 2015 dans une nappe aquifère aux États-Unis et font un peu plus de 0,1  $\mu\text{m}$ . D'autres sont géantes. Une cellule de *Thiomargarita namibiensis* est un coccus de 500  $\mu\text{m}$  de diamètre (0,5 mm). L'espèce a été isolée en 1999 dans les sédiments océaniques riches en soufre le long des côtes de Namibie, à environ 100 mètres de profondeur.

L'originalité des bactéries n'est pas là, mais dans leur capacité à fabriquer une couche périphérique : le peptidoglycane. Cette couche est fine chez certaines espèces et épaisse chez d'autres. La distinction provient d'une méthode de coloration, inventée par un médecin danois du nom de Gram à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, qui permet de classer les bactéries en deux grands groupes. Les Gram négatives, où la couche est fine, et les Gram positives, où elle est épaisse. Les bactéries qui n'en possèdent pas sont des exceptions, comme les mycoplasmes, des pathogènes pour l'homme. La plupart des micro-organismes autres que les bactéries ne le fabriquent pas, sauf un groupe d'archées, les méthanomicrobiales, qui synthétisent un peptidoglycane un peu différent et réagissent à la coloration de Gram. Selon Patrick Forterre, de l'Institut Pasteur, il est possible que ces archées aient récupéré certains gènes venant des bactéries pour se « bricoler » leur propre peptidoglycane.

Sous cette couche se trouve la membrane cytoplasmique, qui délimite le cytoplasme, c'est-à-dire le contenu de la cellule, et au-dessus une membrane externe, mais uniquement chez les Gram négatives. L'ensemble constitue la paroi. D'autres bactéries sont recouvertes par une ou plusieurs enveloppes protectrices supplémentaires, par exemple une capsule ou une couche S que l'on retrouvera chez les archées. Beaucoup de Gram négatives possèdent à leur surface de petits filaments appelés « pili ». Les uns sont impliqués dans l'adhésion aux surfaces et les autres dans les échanges de gènes entre cellules. Les bactéries peuvent aussi posséder un ou plusieurs longs flagelles qui leur permettent de se déplacer.

Le cytoplasme contient des petits bouts d'ADN circulaires, ou plasmides, échangés *via* les pili, ainsi que des vacuoles renfermant des réserves, comme du soufre, du gaz ou des pigments. Combien y a-t-il d'espèces ? Difficile à dire, probablement des millions, bien qu'on en ait décrit seulement 11 000. On sait qu'il y en a énormément au regard des centaines de millions de séquences génétiques, pour la plupart inconnues, déposées jusqu'à aujourd'hui dans les bases de données.

Les **archées** ressemblent beaucoup aux bactéries, à tel point qu'il est impossible de les différencier au microscope. Elles ont plus ou moins la même dimension. Ce sont également des procaryotes et l'ADN se trouve aussi dans un nucléoïde. La cellule a généralement une morphologie de coccus ou de bacille, exceptionnellement une forme carrée ou rectangulaire. Elle peut être recouverte de pili et posséder un ou plusieurs flagelles. La membrane est souvent recouverte par une couche S composée de protéines ou de glycoprotéines dont la structure ressemble à un cristal.

En fait, la principale différence se trouve dans la composition de la membrane et les processus moléculaires touchant l'ADN. La membrane des archées ne possède pas de bicouche lipidique comme les bactéries (et les eucaryotes), mais de longues chaînes d'isoprènes ramifiées. Un isoprène est une petite molécule carbonée. Cette composition de la membrane expliquerait la capacité des archées à résister à des conditions extrêmes. La machinerie de réplication (copie d'ADN en ADN), de transcription (copie d'ADN en ARN) et de traduction (synthèse des protéines) est éloignée de celle des bactéries, mais proche des eucaryotes. Par ailleurs, deux caractères extracellulaires ne se retrouvent pas chez les bactéries. Certaines espèces d'archées thermophiles possèdent des canules, c'est-à-dire des tubes creux. D'autres ont des appendices appelés « hami » terminés par des grappins qui pourraient servir pour s'attacher aux surfaces. Enfin, le nombre d'espèces d'archées décrites est de l'ordre de 500, mais, comme pour les bactéries, il en reste probablement beaucoup à découvrir.

Les **protistes** ont une membrane cytoplasmique identique à celle des bactéries. Néanmoins, ce sont des eucaryotes. L'ADN ne se trouve pas dans un nucléoïde mais dans un organite spécial, le noyau. De l'ADN est présent également en dehors du noyau, dans d'autres organites, les mitochondries ou les plastes dont il sera question. Les organites sont des compartiments délimités par une membrane interne qui ont une fonction spécifique. Le mot a été choisi par analogie avec les organes. La cellule des protistes est plus complexe que celle des bactéries et des archées. La diversité morphologique est également plus grande, par la présence ou non de structures extracellulaires comme les cils, les flagelles, un exosquelette siliceux ou calcaire, une loge ou une thèque, des structures buccales chez les ciliés. Selon les espèces, la dimension varie de quelques  $\mu\text{m}$  chez les pico-eucaryotes à des centaines chez les plus grands ciliés ou les amibes. Le nombre d'espèces décrites est d'environ 41 000, mais il est lui aussi largement sous-estimé et devrait se situer entre 1 et 10 millions.

Les **virus** ont une place particulière parce qu'ils se situent à la frontière du vivant, de par leur dimension, généralement de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres ( $1 \text{ nm} = 0,001 \mu\text{m}$ ), du fait qu'ils sont dépourvus d'organites et de ribosomes et qu'ils n'ont pas de métabolisme. Par exemple, les virus ne respirent pas et ne digèrent pas. Tous contiennent soit de l'ADN, soit de l'ARN, contenu non pas dans un nucléoïde ou un noyau, mais dans une coque protéique appelée « capsid ». Celle-ci peut être elle-même enveloppée par une membrane lipidique. La capsid a une forme symétrique, en icosaèdre (20 faces triangulaires), hélicoïdale, enveloppée ou non symétrique. Sont-ils des micro-organismes ou pas ? Selon la définition, un organisme est une entité fonctionnelle délimitée et organisée. Les virus le sont. Mais cette entité doit être autonome. Or les virus sont des parasites obligatoires. Leur cycle passe nécessairement par deux stades. Intracellulaire lorsqu'ils se multiplient à l'intérieur d'un procaryote ou d'un eucaryote. On parle de « virocell ». Extracellulaire lorsqu'ils se disséminent dans le milieu. C'est le stade virion. Le terme de virus correspond aux deux stades. Mais cette absence d'autonomie n'est-elle pas le propre de tous les parasites ? La question de savoir si les virus sont des micro-organismes reste donc posée. C'est pourquoi ils seront considérés à part tout au long du livre.

Les virus sont des parasites spécifiques, soit des bactéries, soit des archées, soit des eucaryotes. En 2014, on dénombrait 1 251 espèces chez les bactéries, 63 chez les archées et 2 321 chez les eucaryotes. Mais, là encore, ce compte est largement sous-estimé. Du fait de cette spécificité, on comprend que le *Coronavirus* à l'origine de la pandémie, qui est un virus d'eucaryotes (que nous

sommes), ne peut pas parasiter la bactérie *Prevotella* du microbiote du tube digestif et s'en servir de cheval de Troie, comme il a été avancé dans les médias et sur internet. Il existe aussi des virus de virus appelés « virophages » qui parasitent les virus géants, ou girus. Parmi ces derniers, *Pandoravirus* mesure 1 µm et possède un génome également géant avec 2 500 gènes. Le plus grand, *Pithovirus*, mesure 1,5 µm et peut être observé au microscope photonique.

L'adjectif « photonique » vient des photons qui composent la lumière du jour et se propagent par oscillations sous forme d'ondes. Un **microscope photonique** utilise donc la lumière blanche. Lorsque celle-ci éclaire des cellules, elle les traverse. Elle passe ensuite dans la lentille grossissante d'un objectif qui va créer une image agrandie. Cette image arrive ensuite dans un oculaire, qui l'augmente encore, derrière lequel se trouve l'œil de l'observateur, un appareil photographique ou une caméra. Le microscope permet donc un agrandissement. Mais agrandir ne suffit pas, il faut aussi voir net. On appelle cette capacité « le pouvoir de résolution ». La limite de résolution du microscope photonique est de 0,2 µm. Pour améliorer l'observation, on peut colorer les cellules, par exemple avec de l'argent, de façon à mettre en évidence certaines structures. On utilise aussi des marqueurs fluorescents, qui se fixent généralement à l'ADN et sont visibles non plus en lumière blanche, mais sous les rayons ultraviolets. On utilise alors un microscope à fluorescence.

L'étude plus fine des micro-organismes et surtout des virus nécessite de descendre en dessous de 0,2 µm de résolution. Pour cela, on utilise un faisceau d'électrons à la place de la lumière blanche. Le microscope n'est plus photonique, mais électronique. Le faisceau d'électrons se propage par des oscillations, comme la lumière, mais avec une longueur d'onde plus courte que celle des photons, ce qui augmente la capacité de résolution. La limite passe de 0,2 à 0,0005 µm, ou 0,5 nm. Une fois émis par un canon à électrons, le faisceau passe à travers la cellule en étant transmis. On parle alors de **microscopie électronique à transmission**. Pour augmenter la visibilité des structures, on ajoute un métal qui se lie à celles-ci et sera opaque aux électrons tout en augmentant le contraste. La microscopie électronique à transmission permet d'observer l'intérieur d'une cellule ou d'une capsid. Certaines images présentées dans le livre ont été réalisées en **microscopie électronique à transmission par coloration négative**. Dans ce cas, les micro-organismes ont été recouverts avec de l'acétate d'uranyle pour faire ressortir uniquement les contours. Il ne s'agit plus de transmission. On peut aussi obtenir une image en trois dimensions à partir d'un faisceau d'électrons qui balayent la surface. L'objet est alors métallisé avec une fine pellicule d'or, de palladium ou de platine, puis bombardé par le faisceau d'électrons du microscope. Les atomes de surface du métal émettent

alors des électrons secondaires qui sont détectés, canalisés puis dirigés vers un écran cathodique pour donner une image en relief. Les aspérités apparaissent claires et les dépressions foncées. C'est la **microscopie électronique à balayage**.

Le problème avec la microscopie, photonique ou électronique, est qu'elle nécessite au préalable d'avoir isolé les micro-organismes et de savoir les cultiver. Or seule une infime minorité peut l'être, ce qui a longtemps constitué un frein en microbiologie. On passe aujourd'hui par un moyen indépendant de l'observation directe, un marqueur génétique. Un marqueur est un élément qui permet d'identifier ou de suivre celui qui le contient. Ici on va choisir une séquence d'un gène qui possède des régions variant relativement peu dans l'histoire du vivant et d'autres beaucoup, notamment au niveau de l'espèce ou du genre. Ce gène est celui de **l'ARN 16S** chez les procaryotes, ou **18S** chez les eucaryotes, c'est-à-dire l'ARN qui compose la petite sous-unité des ribosomes. Les ribosomes sont le siège de la synthèse des protéines. Ils sont formés de deux parties, une petite et une grosse sous-unité. Tous les micro-organismes en possèdent, sauf les virus. Dans leur cas, on choisit un gène qui code pour une protéine de la capsid. Comment accède-t-on à ce gène ?

La technique consiste à extraire l'ADN d'un milieu et à amplifier une séquence de ce gène. On le fait grâce à la **PCR**, ou *polymerase chain reaction*, qui signifie « réaction de polymérisation en chaîne ». C'est une technique de biologie moléculaire qui permet d'obtenir des millions de copies d'une séquence génétique après l'avoir multipliée par une suite de cycles d'amplifications. Le produit obtenu, ou amplicon, est alors séquencé. La machine, appelée « séquenceur », établit l'ordre et la succession des nucléotides qui composent la séquence. Les résultats sont ensuite comparés, grâce à la bio-informatique, et rassemblés en fonction de leur similarité. On obtient des *clusters* de séquences appelés OTU, ou *operational taxonomic unit* (unité taxonomique opérationnelle). Les séquences sont identifiées en les comparant aux séquences connues et enregistrées dans les bases de données. Beaucoup d'OTU n'ont pas de références et sont non identifiées. On parle de « matière noire microbienne ». On peut aussi comparer les séquences et les positionner dans l'arbre du vivant. Plus il y aura de différences, plus les espèces et les genres seront éloignés. L'analyse permet également de rechercher des ancêtres communs et d'établir des classifications phylogénétiques.

Il n'est pas toujours nécessaire d'utiliser un marqueur génétique. On peut identifier ou repérer tous les micro-organismes et les virus présents dans un milieu donné par la **métagénomique**, ou génomique environnementale. Cette technique consiste à extraire l'ADN en vrac d'un milieu complexe comme un prélèvement de salive, de selles, de sol ou d'océan. Une fois extrait et

purifié, l'ADN est découpé en fragments puis séquencé. Les séquences sont alors assemblées par bio-informatique pour reconstituer des génomes. Cette technique s'est développée surtout depuis 2010, lorsque le coût du séquençage est devenu bon marché, que le nombre de séquences a pu être obtenu en un temps relativement court et après la cartographie de beaucoup de génomes. On parle de séquenceurs de nouvelle génération.

Enfin, la PCR ne sert pas uniquement à amplifier des séquences. Elle permet aussi de dénombrer les micro-organismes et les virus grâce à une molécule fluorescente que l'on ajoute à la PCR. On peut alors mesurer la fluorescence au cours de chaque cycle d'amplification et estimer la quantité d'amplicons produits au fur et à mesure. C'est la technique de la **PCR quantitative** (qPCR), ou PCR en temps réel (RT-PCR). Il est possible d'en déduire la quantité initiale de gènes amplifiés. Chaque génome possédant une quantité précise de gènes, on peut ainsi déterminer le nombre de génomes et donc de micro-organismes et de virus. C'est cette technique qui est utilisée aujourd'hui dans le corps humain ou l'environnement.





A close-up photograph of a horse's coat, showing the texture of the hair and the skin. The background is a dark, warm brown color. A bright yellow rectangular box is overlaid on the right side of the image, containing white text.

**La fabuleuse  
histoire  
du microbiote**



## La fabuleuse histoire du microbiote

Le réel existe en dehors de nous. On en prélève continuellement des parties, que l'on transforme en représentations à partir de nos observations, nos mesures, avec nos instruments matériels et conceptuels. C'est à ce moment-là que le réel devient réalité, et celle-ci évolue. Ce processus nous concerne tous.

En science, tout dépend de l'instrument utilisé. C'est exactement ce qu'il se passe pour le monde microbien. Depuis l'avènement et la démocratisation de la PCR, du séquençage, de la métagénomique et de la bio-informatique, on assiste à un véritable renouvellement de notre vision et de notre compréhension des micro-organismes et des virus, dont le microbiote est sans doute le point d'orgue. À tel point que la société toute entière s'y intéresse. Ce fut aussi le cas à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle avec l'invention du microscope photonique et, dans une certaine mesure, au début du XX<sup>e</sup> avec celle du microscope électronique. Que nous réserve l'avenir ? Que saura-t-on de ce monde dans cinquante ans et au-delà ? Pour l'heure, essayons de voir comment les connaissances se sont mises en place et quelle vision nous offrent les instruments d'aujourd'hui. Pour cela, il faut commencer par remonter le temps.



### ■ Page précédente

Si l'on fait un prélèvement sur la peau d'un bras sain et que l'on en extrait l'ADN, on découvrira alors que l'information génétique qui en résulte ne provient pas seulement du génome humain, mais reflète aussi un microbiote spécifique.



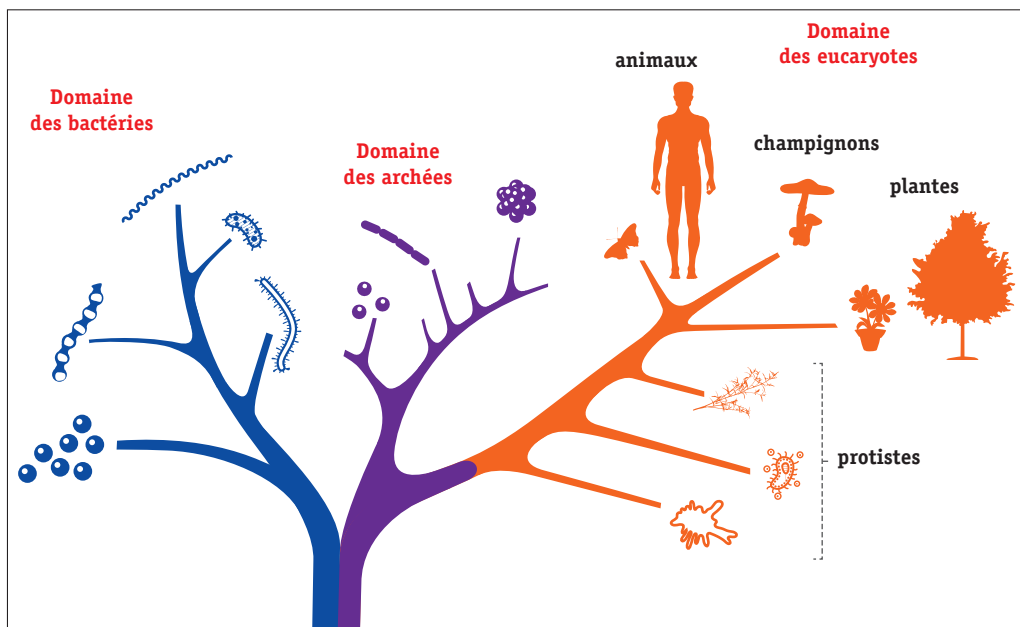
## ■ Un monde difficile à classer

Tout commence en 1838, alors que le microscope photonique n'en est qu'à ses balbutiements. L'Allemand Christian Gottfried Ehrenberg range les bâtonnets découverts quelques décennies plus tôt par le Hollandais Antoni van Leewenhoek, qu'il nomme *bacterium*, dans le règne animal, leur trouvant une ressemblance avec les vers. Quelques années plus tard, en 1857, le botaniste suisse Karl Wilhelm von Nägeli les change de place en les classant parmi les plantes, aux côtés des cyanobactéries. Avant que l'Allemand Ernst Haeckel ne remette tout en question en 1866. E. Haeckel propose une nouvelle branche dans l'arbre du vivant, à côté des *Animalia* (animaux) et des *Plantae* (plantes), qu'il nomme *Protista* (protistes). *Pro* voulant dire « avant », il désigne ainsi les premiers êtres vivants apparus sur la Terre, où il rassemble les bactéries et autres animalcules. Mais son compatriote botaniste et microbiologiste Ferdinand Julius Cohn change encore une fois les bactéries de place et les remet en 1872 dans le règne végétal, en tant que plantes primitives. Une valse-hésitation qui va durer.

Au début du xx<sup>e</sup> siècle, l'arbre du vivant auquel tout le monde se réfère est celui proposé par E. Haeckel. Mais en 1925, le protistologue français Édouard Chatton estime cette classification insuffisante. Il constate que les micro-organismes se répartissent en deux catégories selon que les chromosomes, support de l'information génétique, se trouvent ou non dans un compartiment spécial de la cellule appelé « noyau » ou « caryon ». Il propose de nommer « eucaryotes » les protistes qui possèdent un noyau, et « procaryotes » les bactéries qui n'en possèdent pas. Procaryote signifie « avant l'apparition du noyau » dans l'évolution. Les bactéries sont alors considérées comme des formes encore plus primitives que les protistes. Cette distinction entre eucaryotes et procaryotes fera consensus pour séparer en deux branches tous les organismes vivants, d'un côté les protistes, les animaux, les champignons et les végétaux, et de l'autre les bactéries. Jusqu'à ce qu'un biologiste moléculaire, l'Américain Carl Woese, remette en question cette dichotomie.



Dans les années 1960, C. Woese comparait des séquences de gènes. Pas n'importe quels gènes, ceux qui codent pour l'ARN ribosomique, la molécule qui compose les ribosomes. Comme le raconte en 2013 Harry Noller de l'université de Santa Cruz, en Californie, qui côtoya C. Woese, celui-ci se mit à rechercher les séquences d'ARN ribosomique chez toutes les espèces de bactéries qui lui tombaient sous la main. Mais un jour, en étudiant une espèce productrice de méthane, il se rendit compte que les séquences étaient différentes de celles des bactéries. On était en 1977, et C. Woese venait de découvrir ce qu'il appellera en premier lieu les archéobactéries puis les archées tout court. Tout d'abord accueillie avec scepticisme et même hostilité, cette découverte finit par être acceptée et bouleversa l'arbre du vivant. De deux branches on passa à trois, c'est-à-dire les bactéries, les archées et les eucaryotes.



Notre conception de l'arbre du vivant est en perpétuel mouvement et ses racines suscitent aujourd'hui des débats quelquefois passionnés. Deux versions s'affrontent. Celle illustrée ici de manière très simplifiée soutient que les eucaryotes, dont nous sommes, et les archées dériveraient d'un ancêtre commun. Un autre scénario suppose que les eucaryotes seraient le fruit d'une fusion entre une bactérie et une archée. Quelle que soit la version, l'arbre du vivant se compose au bout du compte de trois domaines : les bactéries, les archées et les eucaryotes. C'est une représentation phylogénétique réalisée à partir de l'ARN ribosomique. On notera que les virus, qui ne contiennent pas de ribosomes, n'en font pas partie.