

The background of the cover features a microscopic view of numerous spherical bacteria. Some are dark green, while others are bright yellow, all set against a light green, slightly hazy background. The bacteria are scattered across the entire cover, with a higher concentration in the top and bottom sections.

Janine Guespin-Michel

# Les bactéries, leur monde et nous

Vers une biologie intégrative  
et dynamique

UniverSciences

DUNOD

**LA** Recherche

# Un nouveau regard sur les bactéries

*« Les conditions qui s'avèrent nécessaires au progrès à un moment de l'histoire peuvent devenir, à un autre moment, des obstacles. Le temps est venu où les progrès à faire dans notre compréhension de la nature impliquent que nous considérions la relation entre intérieur et extérieur, entre organisme et environnement. »*

R. Lewontin, La triple hélice<sup>1</sup>

Au point de départ de cet ouvrage, une conception de la membrane cellulaire, différente de celle généralement admise dans les manuels. Le regard se déplace, et passe de la cellule (dans son milieu), à la dynamique entre la cellule et son milieu, c'est-à-dire à la dialectique entre l'intérieur et l'extérieur. Ce changement d'angle de vue va-t-il faire émerger un autre paysage, comme dans le tableau d'Escher, *Convex and Concave*, où l'on voit la femme à gauche descendre vers une vasque concave alors que si l'on suit l'homme à droite, il monte vers le même objet devenu convexe ? Le but de cet essai va être d'explorer, dans le cas particulier des bactéries, les conséquences de ce changement de point de vue, en réexaminant les connaissances acquises par la microbiologie. Contribuera-t-à faire émerger une microbiologie intégrative et dynamique ?

Comment un microbiologiste traditionnel, en panne d'avion dans le désert, aurait-il répondu à la question « S'il te plaît, des-sine-moi une bactérie ? »

Par ce rectangle, peut être (qui peut se voir aussi comme un cylindre dans l'espace) ?



Est-ce donc la cage qui contient une bactérie ? Selon la plupart des manuels de microbiologie<sup>2</sup>, il s'agit bien d'une sorte de cage : « La membrane est une barrière qui sépare l'intérieur de l'extérieur », ou encore : « Elles [les bactéries] possèdent toutes une barrière appelée membrane cytoplasmique séparant le milieu intracellulaire du milieu extracellulaire [...]. C'est à travers la membrane cytoplasmique que les nutriments et autres composés nécessaires à son fonctionnement pénètrent dans la cellule, et que les déchets et les autres produits cellulaires vont en sortir<sup>3</sup>. »

La visite que je propose de faire du monde bactérien s'appuie sur une autre définition de cette enveloppe (qui, chez les bactéries comprend non seulement la membrane cytoplasmique, mais aussi une paroi) : « l'enveloppe est une structure qui **délimite** l'intérieur de la bactérie et **réalise**, entre cette cellule vivante et l'extérieur, les échanges sélectifs et **réiproques** nécessaires à son fonctionnement et à sa **production** ».

Il existe plusieurs différences majeures entre ces deux présentations, ou plutôt représentations, qui permettent de dégager deux points de vue différents : pour moi, l'enveloppe a deux rôles d'importance égale, tout à la fois délimiter l'intérieur, et réaliser les échanges, qui se font non pas seulement à travers elle, mais **grâce à** elle, et qui se font **dans les deux sens**. De plus, ce sont précisément ces échanges qui caractérisent la cellule vivante, une

bactérie morte peut toujours être délimitée par son enveloppe, mais les échanges ont cessé. Enfin, ces échanges sont nécessaires au fonctionnement de la cellule, mais le fonctionnement de la cellule bactérienne, c'est essentiellement sa production (une bactérie fait... deux bactéries). **Les échanges avec l'extérieur permettent donc de produire l'intérieur.**

Une caractéristique importante de ces échanges est qu'ils sont réciproques. Le manuel de Brock, que j'utilise ici comme paradigme des conceptions consensuelles en microbiologie<sup>4</sup>, indique bien que la cellule produit des substances vers l'extérieur, mais l'accent est mis sur l'idée que ce sont surtout des « déchets » (sans intérêt donc, sans rôle en tout cas) pour la cellule. Or ces « déchets » conduisent à une modification de l'environnement des bactéries qui les produisent, modification qui peut avoir une extrême importance pour les autres habitants de cet environnement, et qui a souvent des conséquences en retour, directes ou indirectes, non négligeables pour la bactérie émettrice elle-même.

L'importance de ces productions peut être illustrée par l'exemple de la formation de dioxygène ( $O_2$ ) par les cyanobactéries. Il a quelque 2 milliards d'années apparaissent les premières cyanobactéries, des bactéries photo-synthétiques capables de réaliser la photolyse de l'eau en produisant de l' $O_2$  comme « déchet », (c'est à dire capables de photosynthèse, semblable à celle que nous connaissons aujourd'hui chez les plantes). L'oxygène produite par ces bactéries, en s'accumulant dans l'atmosphère a permis l'apparition de la respiration et de la vie telle que nous la connaissons, et contribue encore au maintien de cette vie. Mais si l' $O_2$  produit n'était pas utilisé par d'autres organismes, il s'accumulerait au point de devenir toxique pour les bactéries productrices. Ce « déchet » donc, parce qu'il permet d'autres vies et d'autres métabolismes, est sans doute indirectement garant de la survie (et du succès) des bactéries productrices

elles-mêmes. Ce n'est de loin pas le seul exemple où la libération à l'extérieur du produit final d'un métabolisme, non seulement modifie considérablement l'environnement, mais le modifie d'une façon à rétroagir sur le producteur. Nous verrons avec les cycles de la matière que cette rétroaction implique souvent toute une série de modifications par d'autres organismes qui participent ainsi à constituer l'extérieur de chaque bactérie, ce qui nous amènera à voir les bactéries comme parties prenantes de réseaux plus ou moins vastes d'interactions.

Comme pour le tableau d'Escher, je vous propose de déplacer le regard : au lieu de partir de la cellule (dans son milieu), nous partirons des interactions entre la cellule et son milieu, et j'explorerai les conséquences de ce changement de point de vue, tant sur la perception que l'on peut avoir des bactéries, que sur la microbiologie elle-même.

Mais tout ceci s'applique au monde vivant dans son ensemble. La membrane plasmique d'une cellule eucaryote partage l'essentiel de ses propriétés avec la membrane cytoplasmique des bactéries. L'extérieur d'une cellule animale, c'est le « milieu intérieur » de l'organisme. La visite que nous allons entreprendre du monde bactérien sera donc un exemple de ce que le changement de point de vue que je propose peut apporter à la biologie dans son ensemble. Elle s'appuiera sur des connaissances acquises, dont la plupart sont exposées par exemple dans le manuel dont j'ai contesté la définition de la membrane. Ce qui change, avec le point de vue exploré ici, c'est l'importance relative accordée à la **séparation** *versus* aux **interactions** entre l'intérieur et l'extérieur. Mais plus fondamentalement, cela conduit à (et provient de) une conception différente de la cellule vivante, de la vie.

Pour les manuels de microbiologie (et pour les manuels de biologie en général), ce qui caractérise la vie, c'est l'intérieur. Pour nous, ce sera **tout à la fois** la séparation d'un intérieur d'avec l'extérieur et les interactions réciproques entre l'intérieur et l'ex-

térieur. Ce point de vue n'est pas intemporel. Comme l'écrit R. Lewontin<sup>5</sup>, il est devenu possible, voire nécessaire, à l'étape actuelle de la production des connaissances. Aussi les bactéries seront étudiées ici non seulement pour elles-mêmes, mais comme un exemple d'être vivant.

Cette **dialectique<sup>6</sup> de l'interne et de l'externe** dans la production de la vie va donc servir de fil directeur à la visite du monde bactérien qui est proposée ici, visite qui va différer sous maints rapports de celle proposée par les manuels. Il va donc s'agir d'une sorte « d'expérience de pensée », au cours de laquelle on abordera aussi les conséquences de ce changement de point de vue sur les recherches qu'il pourrait susciter, ou les enseignements qui lui seraient nécessaires.

Cette visite va d'entrée de jeu entremêler des sous-disciplines différentes, et souvent séparées, de la microbiologie elle-même : microbiologie fondamentale, bactériologie générale, phylogénèse, écologie microbienne, microbiologie environnementale et microbiologie appliquée<sup>7</sup>.

Ces distinctions disciplinaires ont été utiles, elles le restent encore sans doute, pour permettre des recherches pointues. Elles occultent cependant l'importance des interactions réciproques entre les bactéries et leur milieu extérieur, qu'il s'agira entre autres de mieux définir.

Or ces interactions introduisent encore une autre dimension, celle de la **dynamique** des processus en jeu. Des molécules passent d'un compartiment à l'autre, sont transformées, et entraînent la transformation tout à la fois des bactéries et de leur extérieur. Ces transformations, qui se produisent à tous les niveaux, peuvent aboutir à des équilibres dynamiques, sous certaines conditions, ou au contraire se dérouler sans fin de manière chaotique, ou encore conduire à la disparition de certains éléments, voire de certaines espèces de bactéries. Ces transformations impliquent les bactéries elles-mêmes, les bactéries dans leur

milieu, et le milieu proprement dit. Là encore, les bactéries sont à la fois un cas particulier, et un exemple de ce que peut apporter à la biologie l'utilisation des concepts et des méthodes nécessaires pour prendre en compte ces aspects dynamiques. C'est pourquoi il devient nécessaire d'élargir encore l'interdisciplinarité, en allant chercher, hors de la microbiologie, ce que l'on nomme maintenant les sciences de la complexité. Ainsi la dynamique des systèmes non linéaires, étudiée en physique, ainsi que des méthodes de modélisation où mathématiques et informatique sont appelées à la rescousse, vont devoir devenir aussi des outils de routine pour la biologie.

Les techniques de biologie moléculaire ont contribué, en étant utilisées dans toutes les sous-disciplines, à une certaine homogénéisation de la microbiologie. Mais ceci s'est fait au détriment d'une nécessaire vision dynamique des interactions. Cette lacune est plus ou moins marquée dans les autres disciplines de la biologie, mais elle est réelle presque partout, et les sciences de la vie vont devoir se transformer de sciences du statique, qui analysent l'être, en sciences du dynamique qui étudient les transformations. C'est à une telle modification de la microbiologie que ce livre souhaite aussi contribuer.

Le fait que la recherche fondamentale soit de plus en plus sommée de se tourner vers des questions susceptibles de devenir économiquement rentables va-t-il favoriser ces transgressions des frontières disciplinaires et contribuer à changer la vision du monde bactérien ? L'aspect interdisciplinaire de la technoscience<sup>8</sup> pourrait le suggérer. Cependant, la perte de la dimension fondamentale qui en résulte de plus en plus, ainsi que les incitations à travailler sur des projets à court terme, risquent à l'inverse d'aggraver le morcellement des préoccupations, et d'empêcher la prise en compte de l'importance des rapports entre les bactéries et leur environnement, susceptible de créer une cohérence globale.

C'est cette cohérence au niveau fondamental que recherche le texte qui suit. Il ne s'agira pas d'une description exhaustive de la

microbiologie selon ce nouveau point de vue, qui en ferait une sorte de manuel d'une « nouvelle microbiologie ». C'est à une visite du monde bactérien, qui part des interactions entre l'interne et l'externe et leurs dynamiques, et qui s'interroge sur les conséquences de ce changement d'éclairage, que le lecteur est convié ici. Il s'agira d'un autre regard sur les connaissances actuelles, regard qui agira sur celles ci comme sur le tableau d'Escher<sup>9</sup>, pour y faire apparaître d'autres paysages.

C'est un essai qui s'adresse à tous ceux qui, à partir de connaissances de base de biologie, sont intéressés par la découverte de ces nouveaux paysages. Le lecteur est donc renvoyé, pour les notions fondamentales de biologie<sup>10</sup>, aux manuels habituels. Quelques encadrés et un glossaire (NB : la première occurrence de chaque mot du glossaire sera indiquée par un astérisque) présenteront rapidement certaines notions, concernant d'une part les bactéries (à l'intention des biologistes qui ne sont pas familiers de ces organismes), d'autre part les systèmes complexes (à l'intention des biologistes qui ne sont pas familiers de ces systèmes et de leurs méthodes d'étude). Cette nouvelle cohérence résulte de l'organisation selon le point de vue que j'ai explicité plus haut, des connaissances qui le permettent, dont certaines figurent dans les manuels, mais dont d'autres, souvent très récentes font l'objet de publications en anglais dans des revues spécialisées<sup>11</sup>.

Par ailleurs, la plupart des manuels présentent l'état des connaissances de façon à minimiser les questions qui restent en suspens. Leur lecture conduit souvent à se demander ce qu'il reste à chercher (ce qui renforce d'ailleurs la tentation de se consacrer dorénavant aux applications et autres innovations). Mon parti pris est l'inverse. Je chercherai, tout au contraire, à mettre le doigt sur les questions non résolues, notamment sur celles dont je pense qu'une approche dynamique partant des relations entre l'extérieur et l'intérieur permettrait de les résoudre, ou tout au moins d'y contribuer.



Après un premier chapitre destiné à faire le point sur les conceptions de la vie que sous-tend ce nouveau point de vue, confrontées à l'histoire récente de la microbiologie pour en comprendre l'articulation, nous examinerons tour à tour les principales propriétés des bactéries dont la vision change selon ce nouveau point de vue.

La présentation des bactéries (chapitre 2) mettra l'accent sur l'hétérogénéité, tant des **cultures\*** « **pures\*** » que des environnements naturels, ce qui amènera à revisiter les notions d'intérieur et d'extérieur et à proposer une organisation en niveaux, différente de celle des métazoaires. L'adaptation évolutive des métabolismes bactériens en rapport avec les interactions réciproques et dynamiques avec leurs environnements (chapitre 3) permettra aussi d'approfondir cette notion de nouveaux niveaux d'organisation. Enfin, les structures bactériennes qui régissent les échanges, donc les interactions, et les régulations qui permettent l'adaptation rapide de nombreuses bactéries aux modifications de leur environnement, seront présentées du point de vue de leur dynamique, respectivement aux chapitres 4 et 5.

Si cet essai contribue à transmettre une nouvelle vision du monde bactérien, de sa dynamique et de l'importance des interactions entre l'intérieur et l'extérieur, il pourrait aussi contribuer à modifier la vision que nous, humains, avons de nos rapports avec notre environnement. C'est donc vers une conception de la science plus consciente de ses conséquences, de la dynamique de ses interactions avec la nature et la société, que cette visite des bactéries souhaite aussi mener en conclusion.

# Chapitre I

## Qu'est-ce qui produit « la vie » ?

Bien que rarement explicitée, c'est la conception de la vie qui sous tend les questions scientifiques que se pose la biologie. Partir de la membrane comme interface dynamique et lieu des interactions entre la cellule et son extérieur, correspond à la question « qu'est-ce qui produit la vie dans ses réalisations concrètes » plutôt qu'à la question plus courante « qu'est-ce qu'est la vie ? ». Ce changement de point de vue introduit la dynamique et, refusant de partir d'une notion abstraite de « la vie », en recherche la production dans les interactions entre l'intérieur et l'extérieur de l'organisme ou de la cellule. Explorer les conséquences de ce changement permettra donc de rechercher comment il peut contribuer à l'élaboration et à l'émergence du nouveau paradigme qu'appellent les récents développements de la microbiologie, qu'un bref historique de cette discipline mettra en perspective.

Bien que « biologie » signifie littéralement « étude de la vie », et en dépit de l'utilisation officielle récente du terme « sciences de la vie », la question de « la vie » est très rarement posée, au point que, comme l'écrit John Stewart<sup>12</sup>, « un biologiste aussi fin que François Jacob le dit clairement “on n'interroge plus la vie dans nos laboratoires”. [...] cela veut dire que la biologie étudie un objet, l'objet de sa science qui n'est pas la vie. ».

Quelques auteurs ont cependant abordé cette question. Rosen d'un côté, Maturana et Varela de l'autre, ont cherché « le trait invariant » qui caractérise la vie, en quelque sorte « l'essence » de la vie. Ces définitions tentent de répondre à la célèbre question de Schrödinger « Qu'est-ce qu'**est** la vie ? » (What **is** life ?). Comme l'indique le verbe être, il s'agit de rechercher l'invariant, l'état pur, indépendamment de ses conditions d'existence qui seraient contingentes.

Mais, à travers la définition de la membrane bactérienne, comme à travers la grande majorité des travaux qui ne s'occupent pas de définir « la vie », on peut lire en fait une conception implicite de la vie : « on n'a pas besoin de définir “ la vie ” parce qu'elle se résume aux propriétés des organismes vivants, séparés par leur membrane de ce qui leur est extérieur. » Dans tous les cas, c'est l'intérieur des êtres vivants qui définit la vie, et cette définition implicite détermine les directions de recherches mais aussi en résulte.

*A contrario*, je pose la question « Qu'est-ce qui **produit** la vie ? ». Non pas quelle est l'origine de la vie, mais qu'est-ce qui entraîne la production constante de matière vivante, des êtres vivants. Production implique, mais ne s'y réduit pas, la reproduction, parce que cette production se fait à partir et selon le modèle de ce qui existe déjà, et le maintien parce que la conservation d'une cellule vivante consiste en la disparition et l'apparition constantes de molécules et de structures. Le terme « produit » entraîne l'idée que « la vie » pourrait être caractérisée, dans l'ensemble de ses réalisations concrètes, par l'ensemble des **interactions** qui permettent la formation de matière vivante. Il s'agit d'un tout autre point de vue, pour deux raisons. D'une part, *être* est statique, et « l'essence de la vie » peut glisser vers la conception, métaphysique, qu'il (pré)existe une « idée », un « modèle », une « notion » de vie, qui « se réalise » à travers les êtres vivants. *Produire* contient l'idée d'un processus dynamique (ce qui intro-

duit le temps) et concret, ce qui met l'accent sur le fait que la vie n'a pas de signification en dehors de ses réalisations, des êtres vivants tels qu'ils sont. D'autre part, *être* sépare radicalement ce qui est de ce qui l'entoure et ne l'est pas, alors que *produire* inclut ce qui est produit et ce à partir de quoi c'est produit. Cette conception conduit à mettre en avant les interactions dynamiques, non seulement celles qui se réalisent à l'intérieur des cellules ou organismes vivants, comme pourrait l'impliquer encore le verbe être, mais aussi celles qui se nouent entre l'interne de l'organisme et l'externe, à *partir* de quoi et *contre* quoi cet organisme se construit et se maintient. Les conséquences scientifiques des conceptions liées à la question de l'être, la plus classique, la plus ancienne, et qui est encore très consensuelle, ont été largement explorées, et constituent la base des connaissances actuelles en sciences de la vie.

Le texte qui suit consiste à explorer, dans le cas concret particulier des bactéries, les conséquences scientifiques du point de vue sur la vie qu'induit la deuxième question (qu'est-ce qui produit la vie ?). On voit que la manière de considérer les enveloppes bactériennes que j'ai prise comme point de départ dans l'introduction, s'inscrit bien dans ce cadre, qui est cependant plus général.

## **I. Dialectique et dynamique de l'interne et de l'externe**

La vie est donc vue ici comme l'ensemble des propriétés particulières de la matière qui se manifestent à travers la production d'une multitude d'êtres vivants en étroite dépendance les uns des autres et avec le monde inorganique, en réalisant les transferts d'énergie et de matière, et leur transformation en matière vivante structurée, en « *soi* ». Propriétés de la matière dans son ensemble, signifie que la vie n'est pas une propriété unique et hautement

improbable, mais un des états possibles de la matière, dans certaines conditions<sup>13</sup>. Et cet état, nous le reconnaissons d'abord, de façon empirique.

À quoi reconnaissons-nous un être vivant ? La plupart du temps, cette reconnaissance est immédiate, intuitive, et ne se base pas sur la connaissance de propriétés fondamentales. C'est le mouvement autonome d'une entité délimitée qui désigne un animal vivant. Les plantes se reconnaissent comme vivantes à leurs transformations : elles poussent, fleurissent, meurent. Pour les bactéries, c'est un peu plus compliqué, puisqu'on ne peut pas les observer directement, mais nous verrons plus loin que les mêmes critères sont pris en compte, la principale transformation étant la **croissance**\* (ou multiplication, ou division) observée au niveau d'une **population**\*. Pourquoi pouvons-nous dire qu'un marron d'inde, une spore bactérienne sont vivants ? Parce que nous savons qu'ils pourront germer et se transformer en plante ou en bactérie ; et pourquoi un tourbillon n'est il pas vivant ? Parce qu'il n'est pas délimité, et que c'est donc l'ensemble du courant d'eau qui se transforme et non pas le tourbillon ; quant au caillou qui roule, son mouvement n'est pas autonome. Une autre propriété constitutive des êtres vivants est la mort. Nous verrons dans le chapitre 2 que la mort des bactéries n'est pas toujours facile à mettre en évidence, mais elle peut se définir comme la disparition irréversible des relations entre l'extérieur et l'intérieur.

Nous reconnaissons donc comme vivante, une entité délimitée capable de mouvements et/ou de transformations autonomes, (parfois différées comme pour les spores des bactéries), d'interactions avec son extérieur, et d'interruption totale et irréversible de ces propriétés. Nous avons ainsi l'intuition d'une unité des êtres vivants, qu'exprime précisément le concept de « vie ».

Ce n'est que très tard que les scientifiques ont corroboré cette intuition en découvrant l'unité de composition de la matière

vivante, puis l'unicité du code génétique, et ont fait de l'existence du matériel génétique un critère fondamental des êtres vivants. Il est souvent plus facile, à l'heure actuelle de déceler la présence de bactéries par leur matériel génétique, que par leur capacité de transformations (croissance). Ces méthodes, qui ne permettent cependant pas de distinguer les cellules vivantes des mortes, contribuent à renforcer une conception du vivant centrée sur le matériel génétique (interne et stable).

Une entité délimitée définit un intérieur et un extérieur. Tous les biologistes admettent l'importance du milieu externe, mais mettent, comme on l'a vu, l'accent sur la séparation, voire sur l'autonomie des êtres vivants. Le milieu externe est alors un « contexte », dont le biologiste doit tenir compte, mais qui fait le plus souvent partie de ce que l'on cherche à immobiliser dans le cadre de la phrase fétiche « *toutes choses égales par ailleurs* ». Par exemple, les biochimistes qui étudient les échanges entre une cellule ou un organisme et le milieu extérieur se mettent dans des conditions où ce milieu n'est pas modifié par ces échanges. De plus, comme on l'a vu plus haut, ce qui sort de la cellule tend à être (dé)considéré comme un déchet.

L'hypothèse que je cherche à explorer n'est pas l'inverse, je ne prétends pas que les êtres vivants sont indistinguables du milieu environnant, qu'ils n'ont pas de propriétés propres, que leur autonomie, même si elle est toujours relative, n'est pas une propriété de première importance. Bien au contraire, je pense qu'on améliore la compréhension de ce qu'est l'autonomie des êtres vivants en considérant que les relations qui les produisent incluent les relations réciproques avec leur extérieur, que celui-ci soit vivant ou non. Ces relations ne sont pas simplement des entrées de nutriments et des sorties de déchets, mais une profonde transformation réciproque, l'extérieur se transformant en intérieur tout en se modifiant en même temps que l'intérieur ainsi formé transforme l'extérieur. Le changement de point de

vue, ou mieux encore, d'angle de vue, se précise : on partira de ces relations dynamiques dans les deux sens des êtres vivants avec ce qui leur est extérieur, pour en cerner le rôle. L'extérieur comme moteur et régulateur de la production des êtres vivants, qui en retour modifie ce milieu, donc ces interactions. **Non pas le *soi* contre le *non-soi*, mais le *soi* contre, avec, et par, le *non-soi*, et tout à la fois le *non-soi* avec et par le *soi*.**

C'est pourquoi, de même qu'il faut se mettre d'accord sur ce que l'on nomme le vivant, il faut définir ce que l'on va considérer comme l'extérieur. J'emprunterai la définition de l'environnement donnée par R. Lewontin dans son ouvrage *La triple hélice*<sup>14</sup> :

« L'environnement d'un organisme est la pénombre produite par cet organisme dans le milieu extérieur avec lequel il interagit. »

Deux idées importantes en découlent. D'une part, cet environnement est en constante modification (que ce soit sous l'influence de la bactérie elle-même ou des autres constituants de l'extérieur), ce qui nécessite d'introduire les notions de dynamique au cœur de l'étude de la biologie.

D'autre part, si l'extérieur d'un organisme est potentiellement infini tant par sa composition que par son étendue, son environnement lui est propre, et deux organismes voisins peuvent définir, à partir du même extérieur, deux environnements très différents, s'ils interagissent avec des constituants différents de cet extérieur. Pour les bactéries, l'étendue de cet environnement peut être variable. Comme elles sont de très petite taille (de l'ordre de quelques microns), on aura tendance à penser l'environnement comme l'entourage immédiat de chaque cellule (on parle souvent de micro-environnement). C'est vrai dans les cultures pures que les scientifiques étudient dans les laboratoires, où les bactéries se développent sous forme de cellules isolées, du fait de l'homogénéisation du milieu par agitation. C'est aussi

partiellement vrai dans la nature, où les bactéries se trouvent souvent immobilisées dans des formations (les biofilms), comprenant des espèces différentes, formant des **communautés\*** dans des milieux hétérogènes, où  $1 \text{ mm}^3$  peut contenir plusieurs environnements différents pour la même **espèce\*** bactérienne. Mais au sein des biofilms, des interactions peuvent se propager (sous forme de molécules qui diffusent) sur des distances très variables selon les conditions, et dans certains cas ces interactions vont se propager *via* l'atmosphère ou l'eau et comprendre jusqu'à la totalité de la biosphère. Dans la mesure où la notion d'environnement se veut spécifique à une bactérie, ou à une population donnée, il peut s'avérer utile de considérer des sous-environnements correspondant à des propriétés particulières que l'on étudie.

L'exemple de la production de dioxygène grâce à l'apparition de la photosynthèse oxygénique bactérienne, il y a 2,32 milliards d'années (que j'ai présentée dans le chapitre précédent), illustre le rôle des êtres vivants dans une modification de leur environnement qui a atteint l'échelle de toute la planète, et qui a profondément modifié ces êtres vivants eux mêmes, en permettant la respiration aérobie et toute la vie ultérieure.

Ainsi, encore à l'heure actuelle, des bactéries sont responsables de ce que l'on nomme les cycles de la matière, et elles participent aux transformations du carbone, de l'azote, du soufre, du phosphore... L'ensemble de ces transformations est fortement équilibré puisque, par exemple, la composition de l'air est constante (évidemment, pendant l'accumulation de l' $\text{O}_2$ , elle n'a pas dû l'être, et depuis l'ère industrielle, elle cesse en partie de l'être). Non seulement l'environnement doit comprendre, de proche en proche, l'ensemble de la biosphère, mais cet environnement est le lieu de transformations constantes, une apparente stabilité résultant de l'équilibre dynamique entre les transformations.

On arrive donc à l'idée qu'étudier les êtres vivants à partir de ce qui les produit, c'est-à-dire à partir des interactions entre l'in-



térieur et l'extérieur, doit entraîner une profonde modification de la conception de la microbiologie et de son découpage en sous-disciplines tels qu'ils résultent de l'histoire de cette discipline.

Une première modification consiste, comme nous l'avons vu dans l'introduction, à supprimer les barrières entre champs disciplinaires,

On voit aussi, toujours à partir de l'exemple de la production d'O<sub>2</sub>, à quel point les échelles de temps des transformations peuvent être diverses, pouvant aller depuis les transformations suivant immédiatement celles de l'environnement (qui peuvent se produire en quelques minutes et que l'on traite généralement sous le nom d'adaptation au milieu – *cf.* chapitre 5), à des transformations sur des temps géologiques, ce qui nécessite aussi d'introduire l'évolution des bactéries qui n'est pas indépendante de celle des autres être vivants (y compris l'Homme), depuis que ces autres êtres vivants existent précisément à partir des bactéries et grâce à elles.

La prise en compte de ces transformations nécessite donc le recours aux études dynamiques. A la différence des études cinétiques qui décrivent une succession de transformations au cours du temps, la dynamique, doit prendre en compte les causes de ces changements, liées aux interactions entre les divers acteurs, qu'elles soient internes ou externes. Mais **l'étude des dynamiques nécessite d'utiliser des techniques qui ne font pas partie de l'arsenal actuel de la biologie, des techniques mathématiques ou informatiques**, issues notamment de la physique des systèmes dynamiques non linéaires. Ces techniques sont développées actuellement essentiellement par deux communautés scientifiques, les bio-informaticiens et les bio-mathématiciens, qui interagissent entre elles, mais beaucoup moins (beaucoup trop peu) avec la majorité des biologistes (ou des microbiologistes). On arrive là à une autre des questions clefs qui vont différencier notre approche de celle de la plupart des manuels, même récents.

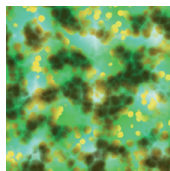
Janine Guespin-Michel

# LES BACTÉRIES, LEUR MONDE ET NOUS

## Vers une biologie intégrative et dynamique

Et si on cherchait à décrire les bactéries à partir de ce qui les produit : leurs interactions avec leur environnement ? C'est cette question, porteuse d'un nouveau paradigme en microbiologie et plus largement en sciences de la vie, qu'explore cet essai.

À partir des connaissances acquises et des découvertes les plus récentes sur les bactéries, l'auteur propose de porter notre regard sur les interactions réciproques et dynamiques entre les bactéries et leur milieu, et sur la façon dont ce processus contribue à façonner notre monde.



JANINE  
GUESPIN-MICHEL

Professeure émérite de microbiologie à l'université de Rouen, elle a travaillé en collaboration avec des physiciens et des bio-informaticiens, au sein de l'atelier d'épigénomique du génopole d'Evry.

MATHÉMATIQUES

PHYSIQUE

CHIMIE

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

INFORMATIQUE

SCIENCES DE LA VIE

SCIENCES DE LA TERRE



9 782100 557998

6928725

ISBN 978-2-10-055799-8

**LA Recherche**



DUNOD

www.dunod.com