

Chapitre 2 : Introduction à la bactériologie

I. Quelques chiffres

Les bactéries forment, avec les archées et les eucaryotes, l'un des trois **règnes** du vivant. On estime la population bactérienne sur Terre à 5×10^{30} organismes, ce qui correspondrait à au moins **la moitié de la biomasse totale de la planète**.

L'organisme vivant le plus représenté sur Terre est une bactérie vivant à la surface des océans, *Pelagibacter ubique*, qui représente un tiers de l'ensemble des cellules vivantes dans les océans terrestres. Un virus bactériophage, capable d'infecter cette bactérie, est présent dans les océans à raison d'environ 10 virus par bactérie, ce qui en fait le virus le plus représenté sur Terre.

Tous les environnements terrestres, du sol aux océans, en passant par les organismes supérieurs tels que nous, sont colonisés par des bactéries. Un organisme humain est porteur de 10 fois plus de bactéries que de cellules humaines ; cet ensemble de bactéries symbiotiques est appelé **microbiome**.

II. Forme et taille des bactéries

Les bactéries présentent des formes diverses. Deux formes sont néanmoins très majoritaires, la forme **bacille** et la forme **coque**. Un bacille a une forme de bâtonnet plus ou moins allongé, tandis qu'un coque a une forme sphérique.

Les bacilles se divisent par **scissiparité**. Ils s'allongent pendant la phase de répllication de leur ADN, puis se divisent au centre du bacille par formation d'un resserrement appelé **septum**. Les coques se divisent également par scissiparité, selon un plan de symétrie qui est en général perpendiculaire au plan de symétrie de leur division précédente.

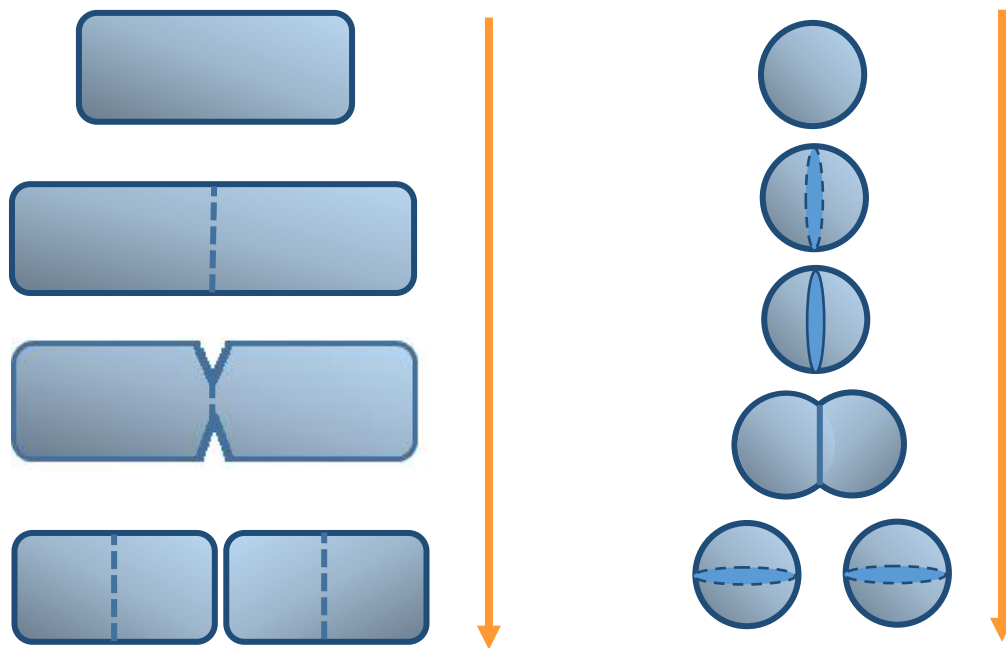


Figure 1 : Mécanisme de division des bacilles (gauche) et des coques (droite)

Certaines bactéries présentent des formes atypiques, comme par exemple en forme de croissant avec des structures asymétriques (*Caulobacter crescentus*), en forme de spirale (*Borrelia burgdorferi*) ou encore en forme d'hélice (*Helicobacter pylori*).

La taille des bactéries varie de $0.1 \mu\text{m}$ (espèces du genre *Mycoplasma*) à $200\mu\text{m}$ pour les plus grandes (*Thiomargarita namibiensis*). La longueur moyenne d'un bacille est d'environ **2 à 3 μm de long**.

III. Croissance bactérienne et compétition

Lorsque l'abondance de nutriments et les conditions environnementales sont optimales, la vitesse à laquelle se divisent les organismes bactériens est souvent très élevée, on parle de **croissance exponentielle**. Par exemple, la bactérie *Escherichia coli*, qui est l'espèce la plus représentée au sein du microbiome humain, est capable de se diviser toutes les 20 minutes en conditions optimales de croissance. Ainsi, si une seule et unique bactérie *E. coli* était placée dans un milieu de croissance où une infinité de nutriments étaient

disponibles, elle serait capable d'engendrer en un jour une descendance dont le poids total excéderait celui de la Terre. **Cette vitesse de division est un facteur clé de la réussite de la colonisation** de tous les environnements terrestres par les bactéries.

Les facteurs pouvant limiter la croissance bactérienne peuvent être environnementaux (nutriments restreints, oxygénation inadaptée, faible humidité, composés toxiques comme les antibiotiques ou les métaux lourds) ou propres à la bactérie. En particulier, le temps nécessaire à la **réplication de l'ADN** est un facteur majeur de la vitesse de croissance bactérienne, puisque la division cellulaire ne peut avoir lieu qu'après la fin de cette réplication.

La stratégie de la plupart des espèces bactériennes pour remporter la compétition pour l'accès aux nutriments consiste la plupart du temps à se diviser le plus rapidement possible pour coloniser le milieu avant les autres microorganismes de leur environnement. L'évolution des génomes bactériens se fait donc souvent dans le sens d'une **optimisation du génome pour accélérer sa réplication**, et donc la vitesse de division. Cela explique par exemple l'absence d'introns et la très petite taille des zones intergéniques dans l'ADN bactérien, ainsi que l'utilisation des deux brins d'ADN pour coder des gènes, ou encore la présence de certains gènes chevauchants.

Il est à noter que certaines espèces bactériennes se divisent beaucoup plus lentement. Cela témoigne souvent d'une spécialisation vers une stratégie d'invasion différente, qui peut être par exemple l'infection d'un hôte (*L. pneumophila*, un parasite d'amibe capable d'infecter l'homme, se divise une fois toutes les deux heures ; *M. tuberculosis*, l'agent de la tuberculose, se divise une fois par jour seulement).

IV. Culture des bactéries

La majorité des espèces bactériennes ne sont connues que *via* la détection et l'identification de leur ADN dans des échantillons environnementaux. Leur isolation depuis

des échantillons environnementaux nécessite de tester et de découvrir les conditions optimales permettant leur croissance, en terme d'oxygénation, de source de nutriments, d'acidité,... Les espèces pour lesquelles ces conditions ont été identifiées sont appelées **espèces cultivables**.

Parmi les espèces cultivables, certaines sont capables de se multiplier dans de nombreux milieux de cultures différents, d'autres ne peuvent croître que dans certaines conditions très précises (on parle alors d'**espèces fastidieuses**). Les bactéries peuvent être cultivées en tube à essai dans des **milieux liquides**, ou sur des **milieux solides** à base d'agar gélifié coulé dans des boîtes de Pétri.

Les bactéries peuvent être **aérobies** (nécessitent de l'oxygène, métabolisme basé sur la respiration cellulaire aérobie), **anaérobies** (nécessitent une absence d'oxygène, métabolisme basé sur la fermentation ou la respiration anaérobie), **aéro-anaérobies** (peuvent vivre indifféremment dans les deux cas), ou **microaérobies** (nécessitent une concentration en oxygène plus faible que celle de l'atmosphère). Le pH du milieu est lui aussi souvent important, les bactéries pouvant être **acidophiles**, **neutrophiles** ou **basophiles**. La température joue également un rôle, les bactéries pouvant être **thermophiles** (>40°C), **mésophiles** (20 à 40°C) ou **psychrotrophes** (0 à 20°C).

Afin d'étudier une espèce bactérienne, il est nécessaire de l'isoler et de la cultiver sans autre contaminant biologique. Une culture ne comportant qu'une seule espèce de bactéries est appelée **culture pure** ou **culture axénique**.

Espèce	pH	Oxygène	Milieu environnemental	Milieu de culture
<i>Escherichia coli</i>	Neutre	Aéro-anaérobie	Gros intestin des mammifères (symbiotique)	Milieu riche (ex : Lysogeny Broth)
<i>Propionibacterium acnes</i>	Neutre	Anaérobie	Peau (responsable de l'acné juvénile)	Milieu à base de soja et caséine, pas d'oxygène
<i>Helicobacter</i>	Acide (5.9)	Microaérobie	Estomac (responsable	Milieu riche

<i>pylori</i>	ou neutre		des ulcères)	+ sérum + 5% d'oxygène
<i>Lactobacillus casei</i>	Acide (6.3)	Aérobie	Produits laitiers	Milieu MRS à base de viande et de glucose + 5% CO ₂
<i>Streptococcus pneumoniae</i>	Neutre	Aéro- anaérobie	Poumons (responsable de pneumonies)	Infusion de cœurs et de cerveaux de porc
<i>Legionella pneumophila</i>	Exactement 6.9	Aérobie	Milieus aquatiques d'eau douce	Milieu à base de levures + charbon actif

Tableau 1 : Diversité des milieux de culture bactériens

Lorsque les bactéries sont placées en culture pure dans un milieu adapté, après un temps nécessaire à l'adaptation à ce nouveau milieu, elles se multiplient à leur vitesse maximale jusqu'à épuisement des ressources. Comme chaque bactérie est capable de se diviser en deux cellules-filles, qui elles-mêmes peuvent donner quatre cellules-filles, le nombre de bactéries croît de façon importante, c'est la **phase exponentielle de croissance**. Lorsque les ressources sont épuisées, on atteint une **phase stationnaire** pendant laquelle le nombre total de bactéries reste inchangé, par équilibre entre le nombre de nouvelles cellules-filles qui émergent par division, et le nombre de bactéries qui meurent par manque de nutriments. La culture entre ensuite dans une **phase de déclin**, lorsque la mort cellulaire devient plus importante dans le milieu que la division cellulaire.

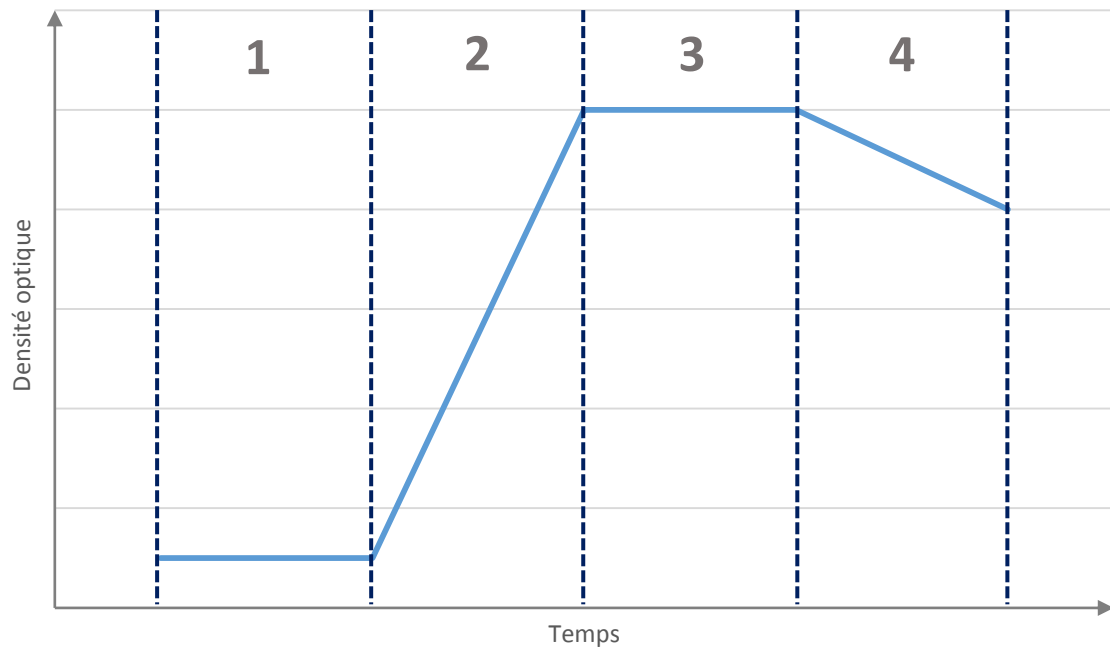


Figure 2 : Courbe de croissance d'une culture axénique de bactéries en milieu riche. Le nombre de bactéries est suivi par mesure du trouble de la culture (absorbance ou densité optique)
 1 : phase de latence, 2 : phase exponentielle, 3 : phase stationnaire, 4 : phase de déclin

V. Pathogénie des bactéries

Les espèces bactériennes capables de causer des infections sont appelées espèces **pathogènes**. Les pathogènes sont les plus étudiées des espèces bactériennes, mais elles sont loin d'être majoritaires. Ainsi, une centaine d'espèces pathogènes seulement sont connues sur un total de 9300 espèces bactériennes décrites, et sur les 10^7 espèces bactériennes inconnues. Les bactéries pathogènes peuvent causer des infections bénignes (diarrhées, fièvres...) ou au contraire très graves (choléra, peste, tuberculose, pneumonie...).

L'apparition de la pathogénicité s'accompagne souvent d'une réduction de la taille du génome de la bactérie, et témoigne d'une spécialisation de celle-ci vers une stratégie d'infection, afin de faire de son hôte un environnement viable. Des gènes spécialisés dans la pathogénie sont présents dans le génome des bactéries pathogènes et sont appelés **gènes**

de virulence. Ils sont destinés à la capture de nutriments (fer, sucres...), à l'échappement au système immunitaire ou encore à la sécrétion de toxines.

Le traitement des infections bactériennes passe par l'utilisation d'**antibiotiques**. Ces composés ciblent des composants essentiels de la machinerie cellulaire de la bactérie, sans avoir d'effets sur son hôte. Ces composants peuvent être par exemple le ribosome, la paroi cellulaire ou le mécanisme de réplication de l'ADN. Comme les bactéries et les mammifères sont très éloignés sur l'arbre de l'évolution, ces mécanismes sont très différents dans les cellules bactériennes par rapport à nos cellules. C'est pourquoi les antibiotiques visent spécifiquement les bactéries sans avoir d'effet majeur sur les cellules du patient.

VI. Utilité des bactéries

Les bactéries revêtent une importance majeure dans plusieurs domaines **industriels** et **agroalimentaires**. Elles sont indispensables à la production de certains aliments comme les produits laitiers, le vin, les fromages. Elles permettent également la production de carburants (bioéthanol) à partir de céréales. Enfin, certaines bactéries vivent en symbiose avec les plantes et sont nécessaires pour assouvir leurs besoins en azote. Ces bactéries sont utilisées comme bioengrais.

Leur vitesse de croissance élevée et leur capacité à produire rapidement de grandes quantités de macromolécules en font d'excellentes **usines microscopiques** pour la production de certaines protéines (comme l'insuline pour les diabétiques, ou les enzymes nécessaires aux techniques de biologie moléculaire pour les chercheurs). Elles peuvent également modifier une molécule présente dans leur milieu en une autre, plus intéressante et plus difficile à obtenir par réaction chimique (acides organiques, vitamines, éthanol, acétone, composés chiraux...).

Certaines bactéries sont étudiées pour leur capacité à dépolluer les sols contaminés par des métaux lourds ou de la radioactivité. Le processus d'utilisation de ces bactéries à des fins de dépollution s'appelle la **bioremédiation**.

Espèce	Utilisation
<i>Oenococcus oeni</i>	Fermentation malolactique (vin)
<i>Lactobacillus casei</i>	Caillage du lait (yaourt, fromage frais)
<i>Propionibacterium freudenreichii</i>	Fermentation (emmental)
<i>Clostridium thermocellum</i>	Production de bioéthanol
<i>Rhizobium sp.</i>	Bioengrais
<i>Escherichia coli</i>	Synthèse d'insuline et d'enzymes
<i>Rhodococcus sp.</i>	Bioremédiation, production de produits chimiques (dont un précurseur d'un antiviral utilisé dans le traitement du sida)
<i>Pseudomonas putida</i>	Bioremédiation (marées noires)
<i>Deinococcus radiodurans</i>	Bioremédiation (radioactivité/métaux lourds)

Tableau 2 : Exemples d'espèces bactériennes d'utilité industrielle

Les bactéries symbiotiques présentes dans notre organisme sont également très utiles. Les espèces constituant le microbiome intestinal permettent la digestion des longues chaînes de sucres lents de l'alimentation (amidon, glycogène), ainsi que la production de certaines vitamines. Les bactéries présentes sur les muqueuses ou la peau participent à la défense immunitaire de leur hôte en faisant concurrence aux bactéries pathogènes pour l'accès aux nutriments, ce qui réduit leur capacité à pénétrer dans l'organisme.

QCM

1. Les bactéries représentent :
 - A. 99% de la biomasse terrestre
 - B. 95% de la biomasse terrestre
 - C. La moitié de la biomasse terrestre
 - D. Une part négligeable de la biomasse terrestre

2. L'ensemble des bactéries vivant en symbiose avec l'homme est appelé :
 - A. Le microbiome
 - B. Le micro-onde
 - C. Le microbionde
 - D. Le micromètre

3. Les formes les plus fréquentes des espèces bactériennes sont :
 - A. Le bacille et le filament
 - B. Le coque et l'hélice
 - C. Le bacille et le coque
 - D. Le bacille et l'hélice

4. Une bactérie nécessitant un milieu contenant peu d'oxygène est appelée :
 - A. Aérobie
 - B. Microaérobie
 - C. Aéro-anaérobie
 - D. Anaérobie

5. Une culture axénique est :
 - A. Une culture de bactéries appartenant toutes à la même espèce
 - B. Une culture de bactéries à partir d'un échantillon environnemental
 - C. Une culture de bactéries vivant à pH acide
 - D. Une culture de bactéries en milieu riche + oxygène

6. Dans des conditions optimales, la croissance des bactéries est :
- A. Logarithmique
 - B. Arithmétique
 - C. Linéaire
 - D. Exponentielle
7. Les bactéries pathogènes :
- A. Forment l'essentiel du monde bactérien
 - B. Possèdent des gènes qui codent pour des protéines en forme de pâtes
 - C. Sont des bactéries capables de causer des infections
 - D. Sont toutes aérobies
8. Le génome des bactéries pathogènes :
- A. Est plus grand en moyenne que celui des bactéries non-pathogènes
 - B. Contient des gènes de virulence nécessaires à l'infection
 - C. Est fait d'ARN et non d'ADN
 - D. Contient des gènes spécialisés dans la sécrétion du fer
9. Les bactéries sont utiles pour dépolluer les sols, un mécanisme que l'on appelle :
- A. La bioremédiation
 - B. La biorésonance
 - C. Le bionettoyage
 - D. Le biopurifiage
10. Les bactéries symbiotiques présentes dans l'organisme humain participent au processus :
- A. De filtration du sang
 - B. De stockage des graisses
 - C. De division cellulaire
 - D. De digestion

Réponses : 1.C 2.A 3.C 4.B 5.A 6.D 7.C 8.B 9.A 10.D