

*Sous la direction de* Luciano Paolozzi et Jean-Claude Liébart  
Matthieu Arlat, Michel Dion, Harivony Rakotoarivonina

# Introduction à la microbiologie

Microbiologie fondamentale et appliquée

2<sup>e</sup> ÉDITION

DUNOD



### Ressources numériques. Comment y accéder ?

Pour aller plus loin et mettre toutes les chances de votre côté pour réussir l'examen, des compléments sont disponibles sur le site [www.dunod.com/EAN/9782100856060](http://www.dunod.com/EAN/9782100856060).

Connectez-vous à la page de l'ouvrage (grâce aux menus déroulants, ou en saisissant le titre, l'auteur ou l'ISBN dans le champ de recherche de la page d'accueil). Sur la page de l'ouvrage, cliquez sur le logo « Les + en ligne ».



*À la nouvelle génération : Emma, Jacopo et Elisabetta*

*À Sarah*

# Les auteurs

Ouvrage réalisé sous la direction de :

Luciano Paolozzi, professeur honoraire (université Tor Vergata, Rome), qui enseignait la génétique bactérienne et la microbiologie (Chapitres 1, 2, 4, 5, 6 et 8).

Jean-Claude Liebart, professeur honoraire (UPMC, Paris), qui enseignait la génétique bactérienne et la microbiologie (Chapitres 1, 2, 4, 5, 6 et 8).

Avec la contribution, par ordre alphabétique, de :

Matthieu Arlat, professeur (université Paul-Sabatier, Toulouse), qui enseigne la microbiologie à la faculté des Sciences et Ingénierie (Chapitre 7).

Michel Dion, professeur (université de Nantes), qui enseigne la microbiologie à la faculté des Sciences et Techniques (Chapitre 9).

Harivony Rakotoarivonina, maître de conférences (université de Reims Champagne Ardennes), qui enseigne la microbiologie à la faculté des Sciences Exactes et Naturelles (Chapitre 3).

## Relecteurs

---

Pascal Le Bourgeois, professeur, université Paul-Sabatier, Toulouse

Pascal Combemorel, professeur, ENS, Paris

Anne Decoster, professeur, université catholique de Lille

Audrey Esclatine, professeur, université Paris-Sud

Gilles Etienne, maître de conférences, IPBS, université Paul-Sabatier, Toulouse

Michel Fons, professeur, université d'Aix-Marseille

Claire Geslin, maître de conférences, université de Bretagne occidentale, Brest

Patrizia Ghelardini, responsable de recherche, IBMM-CNR, Rome

Amel Guyonvarch, professeur, université Paris-Sud

Jean-Marie Lacroix, professeur, université Lille 1

Gaétan Le Floch, professeur, IUT, université de Bretagne occidentale, Brest

Philippe Rousseau, maître de conférences, université Paul-Sabatier, Toulouse

Philippe Silar, professeur, université Paris-Diderot

Philippe Urban, chargé de recherche, LISPB-CNRS, Toulouse

# Table des matières

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Les auteurs</b>                                                   | IV  |
| <b>Avant-propos et guide d'emploi</b>                                | X   |
| <b>Remerciements</b>                                                 | XI  |
| <b>Et pour en savoir plus... Les + en ligne</b>                      | XII |
| <b>1 Micro-organismes</b>                                            | 1   |
| <b>1. Un monde à découvrir</b>                                       | 1   |
| 1.1 Les micro-organismes et la vie sur Terre                         | 1   |
| 1.2 Formes, dimensions, unicellularité, physiologie                  | 2   |
| <b>2. Taxinomie des micro-organismes</b>                             | 4   |
| 2.1 Spécificité de la classification des micro-organismes            | 5   |
| 2.2 Procédures d'identification                                      | 6   |
| 2.3 Classification                                                   | 9   |
| 2.4 Les micro-organismes dans l'arbre universel du vivant            | 11  |
| <b>3. La cellule procaryote</b>                                      | 14  |
| 3.1 L'enveloppe                                                      | 14  |
| 3.2 Structure intracellulaire                                        | 21  |
| 3.3 Quelques éléments de réflexion                                   | 22  |
| <b>4. La cellule des micro-organismes eucaryotes</b>                 | 23  |
| 4.1 Principales structures intracellulaires                          | 23  |
| 4.2 Le génome et son expression                                      | 25  |
| <b>5. Quelques protistes modèles</b>                                 | 27  |
| 5.1 Des protozoaires                                                 | 27  |
| 5.2 Des micro-algues                                                 | 33  |
| 5.3 Les champignons                                                  | 36  |
| <b>Entraînez-vous</b>                                                | 41  |
| <b>2 Physiologie microbienne : métabolisme, croissance, division</b> | 42  |
| <b>1. Les systèmes d'échanges cellule/milieu</b>                     | 42  |
| 1.1 Les familles de transporteurs                                    | 43  |
| 1.2 Les systèmes d'exportation des protéines                         | 44  |

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>2. Métabolisme énergétique</b>                                            | 45 |
| 2.1 La chimio-organotrophie                                                  | 47 |
| 2.2 La chimio-lithotrophie                                                   | 48 |
| 2.3 La phototrophie                                                          | 48 |
| <b>3. Croissance d'une population microbienne – Le modèle <i>E. coli</i></b> | 48 |
| 3.1 La croissance, reflet de l'état physiologique                            | 50 |
| 3.2 Effets des facteurs externes                                             | 52 |
| <b>4. La reproduction, ou division, ou cytokinèse</b>                        | 53 |
| 4.1 Division binaire symétrique : <i>Escherichia coli</i>                    | 54 |
| 4.2 Division asymétrique et différenciation                                  | 57 |
| 4.3 Divisions multiples                                                      | 60 |
| 4.4 Les systèmes de division des Archées                                     | 61 |
| 4.5 Division sans FtsZ                                                       | 61 |
| Entraînez-vous                                                               | 64 |
| <b>3 Microbiologie environnementale</b>                                      | 65 |
| <b>1. Les écosystèmes naturels</b>                                           | 65 |
| 1.1 Périodes de carence, stress et survie                                    | 66 |
| 1.2 Stratégies trophiques : oligotrophie vs copiotrophie                     | 67 |
| 1.3 Organisation des fonctions trophiques en réseaux                         | 67 |
| <b>2. Fluctuations des communautés microbiennes</b>                          | 70 |
| 2.1 Les facteurs abiotiques                                                  | 70 |
| 2.2 Les interactions biotiques                                               | 73 |
| 2.3 Résistance et résilience                                                 | 75 |
| 2.4 Formation de biofilms                                                    | 76 |
| <b>3. Comprendre la diversité microbienne</b>                                | 77 |
| <b>4. Quelques écosystèmes – Applications</b>                                | 80 |
| 4.1 Symbioses nutritionnelles dans les tubes digestifs                       | 80 |
| 4.2 Écosystèmes du sol – Cycles biogéochimiques                              | 82 |
| 4.3 Communautés microbiennes et dépollution                                  | 85 |
| 4.4 Antibiotiques et résistances                                             | 87 |
| Entraînez-vous                                                               | 91 |
| <b>4 Génomes : structure et réplication chez les procaryotes</b>             | 92 |
| <b>1. Le nucléoïde : structure physique et topologie</b>                     | 92 |
| 1.1 Propriétés mécaniques de l'ADN                                           | 93 |
| 1.2 Structure et malléabilité spatio-temporelle du chromosome                | 94 |

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 1.3 Les protéines SMC et NAP, des « architectes » | 95  |
| 1.4 Organisation des génomes                      | 96  |
| <b>2. L'ADN accessoire : son rôle adaptatif</b>   | 99  |
| 2.1 Les plasmides                                 | 99  |
| 2.2 Les éléments génétiques mobiles (EGM)         | 101 |
| 2.3 Autres ADN accessoires                        | 103 |
| <b>3. Réplication</b>                             | 104 |
| 3.1 Les étapes de la réplication                  | 105 |
| 3.2 Modèles particuliers de réplication           | 110 |
| <b>Entraînez-vous</b>                             | 114 |

## **5 Variabilité génétique : potentialités et limites** 115

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| <b>1. Mutations et mutants</b>                           | 115 |
| 1.1 Les mutations spontanées                             | 116 |
| 1.2 Les mutations induites                               | 121 |
| 1.3 Apparition/détection des mutations                   | 122 |
| <b>2. TGH chez les procaryotes</b>                       | 123 |
| 2.1 La transformation naturelle                          | 123 |
| 2.2 La transduction                                      | 125 |
| 2.3 La conjugaison                                       | 125 |
| 2.4 Autres systèmes de transfert de gènes                | 127 |
| <b>3. Réparation de l'ADN</b>                            | 127 |
| 3.1 Les principaux systèmes de réparation                | 128 |
| 3.2 Blocage des fourches de réplication et recombinaison | 130 |
| <b>4. Variabilité/anti-variabilité</b>                   | 131 |
| 4.1 Les systèmes anti-variabilité                        | 131 |
| 4.2 Les stratégies anti-barrières                        | 133 |
| <b>Entraînez-vous</b>                                    | 135 |

## **6 Expression génique et adaptation chez les procaryotes** 136

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| <b>1. Expression génique</b>                     | 136 |
| 1.1 La transcription chez les Bactéries          | 136 |
| 1.2 La traduction chez les Bactéries             | 140 |
| 1.3 Transcription et traduction chez les Archées | 142 |
| <b>2. Régulation de l'expression génique</b>     | 143 |
| 2.1 Régulation du démarrage de la transcription  | 144 |

|           |                                                                        |     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2       | Autres niveaux de régulation                                           | 148 |
| 2.3       | Le contrôle épigénétique                                               | 150 |
| <b>3.</b> | <b>Régulation via des transmetteurs de signal</b>                      | 151 |
| 3.1       | Détection et transmission du signal                                    | 151 |
| 3.2       | Le chimiotactisme chez <i>E. coli</i> et <i>Salmonella typhimurium</i> | 153 |
| 3.3       | La sporulation chez <i>Bacillus subtilis</i>                           | 155 |
| <b>4.</b> | <b>Communications intercellulaires</b>                                 | 156 |
| 4.1       | Quorum sensing                                                         | 156 |
| 4.2       | Les biofilms : conditions de mise en place                             | 160 |
|           | Entraînez-vous                                                         | 162 |
| <b>7</b>  | <b>Interactions Bactéries/hôtes</b>                                    | 163 |
| <b>1.</b> | <b>Le mutualisme</b>                                                   | 163 |
| 1.1       | Mutualisme et nutrition                                                | 163 |
| 1.2       | Mutualismes non trophiques                                             | 169 |
| <b>2.</b> | <b>Le commensalisme</b>                                                | 171 |
| 2.1       | Le microbiote humain                                                   | 172 |
| 2.2       | Le microbiote végétal                                                  | 175 |
| 2.3       | Algues rouges, makis et évolution du microbiote humain                 | 176 |
| <b>3.</b> | <b>Le parasitisme</b>                                                  | 177 |
| 3.1       | Les épidémies – Conséquences sociétales et étiologie                   | 177 |
| 3.2       | Réservoirs, transmission et cycles infectieux                          | 179 |
| 3.3       | Adhérence/entrée dans les cellules hôtes                               | 184 |
| 3.4       | Contournement des défenses                                             | 185 |
| 3.5       | Évolution du pouvoir pathogène                                         | 191 |
|           | Entraînez-vous                                                         | 194 |
| <b>8</b>  | <b>Notions de virologie</b>                                            | 195 |
| <b>1.</b> | <b>Présentation et classification</b>                                  | 195 |
| <b>2.</b> | <b>Structure</b>                                                       | 197 |
| 2.1       | Les capsides                                                           | 197 |
| 2.2       | Génomes                                                                | 201 |
| <b>3.</b> | <b>Phases du développement</b>                                         | 203 |
| 3.1       | Adsorption                                                             | 203 |
| 3.2       | Phase endocellulaire (dite d'éclipse)                                  | 204 |
| <b>4.</b> | <b>Quelques virus typiques</b>                                         | 206 |



|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| 4.1 Groupe I                                   | 206 |
| 4.2 Groupe II - Les phages $\Phi$ X174 et M13  | 212 |
| 4.3 Groupe III - Le phage $\Phi$ 6             | 213 |
| 4.4 Groupe IV - Les phages MS2 et Q $\beta$    | 214 |
| 4.5 Les phytovirus                             | 214 |
| Encart : Covid-19 et les leçons d'une pandémie | 217 |
| Entraînez-vous                                 | 223 |

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>9 Biotechnologies microbiennes</b>                                          | 224 |
| 1. Des procédés classiques à l'ingénierie                                      | 224 |
| 1.1 Ingénierie génétique : production d'acides aminés                          | 225 |
| 1.2 Ingénierie métabolique : crise énergétique et biocarburants                | 228 |
| 2. Santé humaine et ingénierie métabolique                                     | 234 |
| 2.1 Vers de nouveaux antibiotiques : iChip et métagénomique                    | 235 |
| 2.2 Oligosaccharides, un challenge d'ingénierie                                | 237 |
| 2.3 Le mévalonate/DMAPP, un précurseur à large spectre                         | 239 |
| 2.4 De l'hydrocortisone grâce à la levure                                      | 243 |
| 2.5 Production d'opiacés : collaboration <i>E. coli</i> - <i>S. cerevisiae</i> | 245 |
| 3. Des approches innovantes                                                    | 248 |
| Entraînez-vous                                                                 | 253 |

|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>10 Microbiologiste comme métier : présent et futur</b>                                                         | 254 |
| 1. La Microbiologie des maladies infectieuses                                                                     | 255 |
| 2. Vie de notre biosphère : le monde microbien dans la biodiversité                                               | 255 |
| 3. Vie de notre biosphère : Microbiologie des environnements extrêmes                                             | 256 |
| 4. Microbiologie moléculaire : les sciences « omiques »                                                           | 257 |
| 5. Microbiologie systémique                                                                                       | 258 |
| 6. Microbiologie de cellules virtuelles                                                                           | 259 |
| 7. Non seulement des boîtes de Petri, mais aussi l'écran d'un ordinateur et une pluridisciplinarité enrichissante | 259 |

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Bibliographie (ouvrages didactiques et articles à caractère non spécialisé)</b> | 261 |
| <b>Index</b>                                                                       | 263 |

# Avant-propos et guide d'emploi

Cet ouvrage constitue une introduction à la microbiologie, l'étude des espèces généralement unicellulaires et microscopiques. L'univers microbien est un ensemble extrêmement hétérogène, encore plus diversifié que le monde qui nous est familier. Occupant toutes les niches écologiques de notre planète, les micro-organismes sont des agents indispensables à l'équilibre de l'ensemble des écosystèmes. Ils comprennent deux grandes catégories : les protistes (eucaryotes ayant une structure cellulaire semblable à celle des organismes pluricellulaires) et les procaryotes (structure cellulaire plus simple). Leurs modes de vie sont très diversifiés, libres ou en association avec d'autres organismes, parfois néfastes s'il s'agit d'espèces pathogènes, et capables d'entretenir des « dialogues moléculaires » inter-organismes. Ce monde microbien est doublé du monde des virus, entités de tailles encore plus réduites et probablement au moins aussi nombreux, intermédiaires entre monde « vivant » et monde « chimique ». Parasites obligatoires d'organismes de toutes catégories, ils constituent un maillon important de la diversification et de l'évolution des organismes qu'ils infectent. C'est à l'étude des micro-organismes, qui n'a réellement commencé qu'il y a deux à trois siècles, que nous devons une grande partie des connaissances actuelles au niveau moléculaire en physiologie, génétique, etc. du monde vivant. Cela a permis, entre autres, la mise au point de méthodes de lutte contre des maladies infectieuses ou l'utilisation de micro-organismes dans des productions industrielles.

Nous vous conseillons, avant de vous plonger dans ce manuel, de commencer par la lecture de la fiche Introduction « Le monde inattendu des micro-organismes » (disponible sur le site web de l'ouvrage, voir plus loin), qui donne quelques clefs de l'histoire et du développement de la microbiologie.

En accord avec la nomenclature actuelle, les noms de genres sont écrits en italique avec une majuscule initiale, et les noms d'espèces en italique et tout en minuscules ; les noms des trois domaines actuellement reconnus, incluant chacun des micro-organismes, sont écrits avec une majuscule initiale : Bactéries, Archées et Eucaryotes. En revanche les termes « protiste » et « procaryote », qui désignent des regroupements pratiques mais non phylogénétiques, sont écrits tout en minuscules.

Le signe \$ en exposant indique une incitation à consulter l'Annexe méthodologique (sur le site web de l'ouvrage).

Bonne lecture !

# Remerciements

Cet ouvrage de microbiologie fondamentale et appliquée est le fruit d'une harmonieuse collaboration avec plusieurs partenaires et collègues, à qui nous tenons à exprimer toute notre gratitude :

- M<sup>me</sup> Laetitia Jammet (Dunod), pour la confiance qu'elle nous a accordée en nous proposant de réaliser ce nouvel ouvrage et pour ses nombreux conseils, qui ont permis d'assurer l'adéquation des textes aux exigences des étudiants auxquels il s'adresse ;
- M<sup>me</sup> Vanessa Beunèche, pour son agréable et efficace collaboration éditoriale ;
- nos collègues co-auteurs, bien sûr ;
- nos collègues relecteurs, qui ont contribué à la clarté et à la rigueur scientifiques des textes ;
- M<sup>me</sup> Françoise Joset, professeur honoraire, université d'Aix-Marseille, à qui nous adressons un remerciement particulier pour avoir mis à notre disposition son expérience de scientifique et d'enseignante de microbiologie et génétique, qui s'est traduite en riches suggestions, analyses critiques et remaniements des textes, suivis de méticuleuses révisions.

# Et pour en savoir plus...

## Les + en ligne

Sur la page associée à l'ouvrage sur le site [dunod.com](http://dunod.com), sont disponibles des fiches et vidéos formant des compléments à certains chapitres, essentiellement les chapitres à caractère général ; l'approfondissement des domaines plus spécifiques sera traité en master.

### Fiches d'intérêt général

**Fiche Introduction :** Le monde inattendu des micro-organismes

**Fiche A :** Annexe méthodologique

**Fiche B1 :** Liste des organismes et virus cités dans les chapitres et les fiches

**Fiche B2 :** Principales Bactéries responsables de maladies infectieuses chez l'Homme et chez certaines plantes.

### Fiches spécifiques

#### Chapitre 1

**Fiche 1.1 :** Distribution des procaryotes dans la nature

**Fiche 1.2 :** La classification des organismes vivants – Historique – Ses limites pour les procaryotes

**Fiche 1.3 :** La coloration de Gram

**Fiche 1.4 :** L'identification de Bactéries pathogènes humaines : à chacun sa méthode

**Fiche 1.5 :** Clé dichotomique d'identification – Cas d'une Bactérie coque à Gram<sup>+</sup>

**Fiche 1.6 :** Le manuel Bergey, référence de la systématique des procaryotes

**Fiche 1.7 :** Structures péri- et trans-enveloppes des procaryotes – Leurs fonctions

**Fiche 1.8 :** Organites de procaryotes

**Fiche 1.9 :** L'avantage d'être petit – Rapport dimension/structure d'une cellule

**Fiche 1.10 :** Chromatine et transcription chez les cellules eucaryotes

#### Chapitre 2

**Fiche 2.1 :** Colonies microbiennes

**Fiche 2.2 :** La protéine FtsZ

**Fiche 2.3 :** Les Bactéries non cultivables

**Fiche 2.4 :** BALO, un monde à exploiter

**Fiche 2.5 :** Les Streptomycètes, une mine d'applications

**Fiche 2.6 :** À la recherche d'un mécanisme primitif de prolifération cellulaire

## Chapitre 3

**Fiche 3.1 :** Les micro-organismes rares

**Fiche 3.2 :** Expressions mathématiques de la diversité microbienne

**Fiche 3.3 :** Fractionnement des parois végétales et bioraffinerie

## Chapitre 5

**Fiche 5.1 :** Transferts génétiques horizontaux en conditions naturelles

**Fiche 5.2 :** Découverte de la conjugaison

**Fiche 5.3 :** Fonctions et devenir du plasmide F d'*E. coli*

**Fiche 5.4 :** Identification des protéines Uvr chez *E. coli*

**Fiche 5.5 :** Hémiméthylation et correction par MMR

**Fiche 5.6 :** CRISPR, immunité bactérienne acquise ; instrument de génomique ; ses applications

## Chapitre 6

**Fiche 6.1 :** Nucléotides non canoniques des ARNt – Leurs rôles

**Fiche 6.2 :** Variation de phase chez la souche pathogène *E. coli* UPEC

**Fiche 6.3 :** Variabilité des fréquences d'initiation de transcription

**Fiche 6.4 :** Fonctionnement du mouvement flagellaire

## Chapitre 7

**Fiche 7.1 :** Les systèmes de sécrétion de types IV et VI

**Fiche 7.2 :** Les adhésines des *Yersinia* pathogènes pour l'Homme

**Fiche 7.3 :** Quelques épidémies et pandémies en Europe depuis le Moyen Âge

**Fiche 7.4 :** Les toxines bactériennes

## Chapitre 8

**Fiche 8.1 :** Décision lyse/lysogénie chez le bactériophage  $\lambda$

**Fiche 8.2 :** Encapsidation de l'ADN du bactériophage T4

Et pour en savoir plus... Les + en ligne

**Fiche 8.3 :** Injection et transcription séquentielles du génome chez le bactériophage T7

**Fiche 8.4 :** Le virus de l'hépatite B (VHB)

**Fiche 8.5 :** Les virus de la grippe

## Vidéos

### Chapitre 1

**Vi 1.1 :** L'antibiogramme

### Chapitre 2

**Vi 2.1 :** Isolement de cultures pures

**Vi 2.2 :** Détermination de la concentration cellulaire

**Vi 2.3 :** La technique des répliques

### Chapitre 8

**V 8.1 :** Le nombre d'unités virales formant plages de lyse