

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologie
Département Génie des procédés



Polycopie de cours
Microbiologie et Biochimie de
l'Environnement

Présentée par

D^r BELKHIRI-BEDER Wassila

Cours destines aux étudiants Master I

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Génie des procèdes

Spécialité: Génie des procédés de l'environnement

Année universitaire
2024/2025

Avant-propos

L'enseignement de la Microbiologie et Biochimie Environnementale constitue un pilier fondamental dans la formation des étudiants en Génie des procédés de l'environnement. Ce cours a été élaboré dans le but de fournir une base scientifique solide, multidisciplinaire et actualisée, articulant les concepts clés de la microbiologie générale avec les fondements biochimiques du fonctionnement cellulaire.

Le présent support pédagogique a été conçu pour répondre aux exigences d'un enseignement universitaire moderne, structuré et contextualisé. Il vise non seulement à transmettre des connaissances théoriques indispensables à la compréhension des mécanismes biologiques à l'échelle microscopique, mais aussi à sensibiliser les étudiants aux applications concrètes dans les domaines de la gestion environnementale, de la dépollution, de la valorisation des déchets organiques, de la qualité de l'air et de l'eau, ainsi que dans les biotechnologies industrielles et agricoles.

Ce cours s'articule autour de deux grandes thématiques complémentaires :

La microbiologie environnementale, qui explore la diversité, la structure et la physiologie des micro-organismes, leur rôle dans les grands cycles biogéochimiques (carbone, azote, phosphore), et leur distribution dans les différents compartiments naturels : sol, eau et air. Une attention particulière est portée aux méthodes d'étude et aux implications écologiques et sanitaires des micro-organismes.

La biochimie cellulaire, qui introduit les constituants moléculaires de base (glucides, lipides, protéines, acides nucléiques), les principes de la bioénergétique, les fonctions enzymatiques et les principales voies métaboliques impliquées dans le fonctionnement des cellules vivantes, en particulier les micro-organismes.

Ce document a également pour vocation de renforcer l'autonomie des étudiants à travers une approche progressive, des tableaux récapitulatifs et des illustrations facilitant l'assimilation des contenus. Il peut être utilisé comme support principal et document de référence pour des travaux dirigés, des exposés, ou encore des recherches appliquées.

En somme, ce polycopie ambitionne de former des étudiants capables de comprendre, d'analyser et d'agir sur les problématiques environnementales en mobilisant des savoirs scientifiques rigoureux. Il constitue une contribution pédagogique pensée pour allier fondamentaux académiques et enjeux contemporains liés à l'environnement, à la santé publique et au développement durable.

Dr BELKHIRI-BEDER Wassila
Wassila.beder@univ-bejaia.dz

Table des matières

Avant-propos	
Liste des figures	Page
Liste des tableaux	
Introduction Générale	1
Première Partie : Microbiologie	
I. Introduction à la microbiologie de l'environnement	2
I.1. Historique	3
I.2. Classification des micro-organismes	4
I.2.1. Classification cellulaire	4
I.2.2. Classification fonctionnelle ou taxonomique	5
I.3. Rôle des microorganismes dans l'environnement	7
II. Morphologie et anatomie fonctionnelle des bactéries	9
II.1. Définition de bactérie	9
II.2. Morphologie bactérienne	9
II.3. Organisation cellulaire d'une bactérie	10
II.3.1. Eléments constants	10
II.3.2. Eléments inconstants	12
III. Physiologie bactérienne	15
III.1. Nutrition	15
III.1.1. Besoins élémentaires des bactéries	15
III.1.2. Besoins spécifiques	17
III.1.2.1. Facteurs de croissance	17
III.1.2.2. Besoins en oxygène	18
III.1.3. Facteurs physiques	18
III.1.3.1. Température optimale	18
III.1.3.2. pH optimal	18
III.1.3.3. Pression osmotique	18
III.2. Croissance bactérienne	19
III.2.1. Mesure de la croissance bactérienne	19
III.2.1.1. Méthodes directes	20
III.2.1.2. Méthodes indirectes	21
III.2.2 Courbe de croissance	22

IV. Rôle des micro-organismes dans le cycle des bioéléments	25
IV.1. Caractéristiques des écosystèmes microbiens	25
IV.1.1. Omniprésence et ubiquité	25
IV.1.2. Rôle central dans les cycles biogéochimiques	25
IV.1.3. Organisation en communautés	26
IV.1.4. Réactivité et résilience	26
IV.1.5. Interactions multiples	26
IV.2 Microbiologie du sol	27
IV.2.1. Composition microbienne du sol	27
IV.2.2 Rôle des micro-organismes du sol dans les cycles biogéochimiques	27
IV.3. Microbiologie des milieux aquatiques	30
IV.3.1. Composition microbienne des milieux aquatiques	30
IV.3.2. Rôles des micro-organismes aquatiques dans les cycles biogéochimiques	30
IV.4. Microbiologie de l'air	33
IV.4.1. Composition microbienne de l'atmosphériques	33
IV.4.2. Rôles micro-organismes de l'air dans les cycles biogéochimiques	33
V. Microbiologie de l'air, des eaux domestiques et des eaux usées	35
V.1. Microbiologie de l'air	35
V.1.1. Nature et caractéristiques de l'air atmosphérique	35
V.1.2. Origine des micro-organismes de l'air	35
V.1.3. Traitement de l'air contaminé	37
V.2. Microbiologie des eaux domestiques	37
V.2.1. Nature et caractéristiques des eaux domestiques	37
V.2.2. Origine des micro-organismes des eaux domestiques	37
V.2.3. Traitement des eaux domestiques	38
V.3. Microbiologie des eaux usées	38
V.3.1. Nature et caractéristiques des eaux usées	38
V.3.2. Origine des micro-organismes des eaux usées	38
V.3.3. Traitement des eaux usées	39

Deuxième Partie : Biochimie

I. Introduction à la biochimie	41
I.1. Constituants moléculaires de la cellule	41
I.1.1. Eau	41
I.1.2. Glucides (sucres)	41
I.1.3. Protéines	42
I.1.4. Lipides	43
I.1.5. Acides nucléiques	45
I.2. Notions de bioénergétique	46
I.2.1. Principes de base	46
I.2.2. Sources d'énergie des cellules	46
I.2.3. Voies métaboliques	47
II. Protéines	50
II.1. Structure et propriétés des acides aminés	50
II.1.1 Structure générale des acides aminés	50
II.1.2. Classification des acides aminés	50
II.1.3. Propriétés physico-chimiques des acides aminés	51
II.2. Structure et propriétés des protéines	54
II.2.1. Structure des Protéines	55
II.2.2. Propriétés physico-chimiques des Protéines	56
III. Enzymologie	57
III.1. Définition des enzymes	57
III.2. Caractéristiques des enzymes	57
III.3. Structure et mécanisme d'action des enzymes	57
III.3.1. Structure des enzymes	57
III.3.2. Coenzyme et cofacteur	58
III.3.3. Mécanisme d'action des enzymes	59
III.4.2. Courbe vitesse /concentration	60
III.4.3. Facteurs influençant la vitesse de réaction enzymatique	60
III.5. Introduction au genre enzymatique	61
IV. Dégradation microbienne des protéines. Cycles d'azote et du soufre	62
IV.1. Dégradation des protéines dans le cycle d'azote	62
IV.2. Dégradation des protéines dans le cycle du soufre	63
IV.3. Interactions écologiques entre les cycles	64

IV.4. Importance écologique et applications	65
V. Glucides	66
V.1. Structure et propriétés des oses	66
V.1.1. Définition	66
V.1.2. Structure	66
V.1.3. Classification	67
V.1.4. Propriétés des oses	68
V.2. Structure et propriétés des glucides	69
V.2.1. Définition générale	69
V.2.2. Classification	69
V.2.3. Propriétés des glucides	70
V.3. Dégradation microbienne des déchets cellulosiques et cycle du carbone	70
V.3.1. Mécanisme d'action des microorganismes sur les déchets cellulosiques	71
V.4. Transport d'électrons et cycle du phosphore et de l'oxygène	74
V.4.1. Transport d'électrons	74
V.4.2. Cycle du phosphore	74
V.4.3. Cycle de l'oxygène	74
VI. Lipides	76
VI.1 Structure et propriétés des acides gras	76
VI.1.1. Structure des acides gras	77
VI.1.2. Classification selon la saturation	77
VI.1.3 Propriétés des acides gras	77
VI.2. Structure et propriétés des lipides	78
VI.2.1. Structure des lipides	78
VI.2.2. Propriétés des lipides	79
VI.3. Dégradation microbienne des résidus pétroliers : cas des n-alcanes	80
Conclusion Générale	83
Références bibliographiques	

Liste des figures

N°	Titre	Page
1	Organismes microscopiques	2
2	Différence entre procaryotes et eucaryotes	5
3	Formes bactériennes	9
4	Structure pariétale de bactéries gram positive vs Gram négative	11
5	Cellule bactérienne	13
6	Numération des cellules bactériennes après culture	20
7	Représentation de la cellule de Malassez avec son quadrillage	21
8	Courbe de croissance bactérienne	23
9	Origine des microorganismes de l'air	36
10	Etapes de traitement des eaux usées	40
11	Type de glucides	42
12	Structure d'acide amine et protéine	43
13	Type de lipides	44
14	Structure d'un nucléotide, AND et ARN	45
15	Hydrolyse de l'ATP	46
16	Structures chimiques des coenzymes NAD ⁺ /NADH et FAD/FADH ₂	47
17	Structure d'un acide amine	50
18	Classes d'acide amine	51
19	Liaison peptidique	52
20	Réaction de décarboxylation	53
21	Réaction avec aldéhyde ou cétone	54
22	Organisation structurale des protéines	55
23	Structure et mécanisme d'action des enzymes	58
24	Courbe de Mechaelis Menten	60
25	Dégradation des protéines dans le cycle de l'azote	63
26	Dégradation des protéines dans le cycle du soufre	64
27	Structure des oses (Linéaire, cyclique et isomères)	67
28	Dégradation microbienne des déchets cellulosique dans le cycle de carbone	73
29	Structure des lipides	79
30	Structure chimique d'un n-alcane	80
31	Etapes de dégradation microbienne des n-alcanes (enzymes et microorganismes impliqués)	82

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
I	Différences entre procaryotes et eucaryotes	4
II	Bactéries Gram positive et Gram négative	11
III	Eléments inconstants (Rôles et exemple d'espèces bactériennes)	14
VI	Besoins élémentaires des bactéries	17
V	Facteurs physiques	19
VI	Microorganisme du sol, caractéristiques et rôles	28
VII	Microorganismes aquatiques, localisation, rôle et exemples	31
VIII	Microorganismes de l'air, origine, rôle et impact	34
IX	Sources des microorganismes de l'air	36
X	Classe d'enzymes selon mode d'action	61
XI	Classification des oses selon nombre d'atome de carbone	68
XII	Classification des oses selon fonction chimiques	68
XIII	Groupes microbien (exemple et enzymes produites)	71
XVI	Types d'acide gras	76
XV	Types de lipides	78

Introduction Générale

Introduction générale

L'environnement naturel constitue un vaste écosystème dynamique où interagissent en permanence les éléments biotiques et abiotiques. Parmi les acteurs essentiels de ces interactions figurent les micro-organismes, organismes invisibles à l'œil nu mais dotés d'un rôle fondamental dans le fonctionnement et l'équilibre des écosystèmes. Parallèlement, la biochimie environnementale permet de comprendre les réactions chimiques et métaboliques qui sous-tendent ces processus microbiens et qui participent à la transformation de la matière dans la biosphère.

L'étude conjointe de la microbiologie et de la biochimie de l'environnement vise à comprendre les mécanismes biologiques et moléculaires qui régulent les grands cycles biogéochimiques (carbone, azote, soufre, phosphore, oxygène, etc.), garants du maintien de la vie sur Terre. Ces disciplines sont également au cœur des applications environnementales modernes telles que la dépollution biologique (bioremédiation), le traitement des eaux usées, la valorisation des déchets organiques et la conservation des sols et des écosystèmes aquatiques.

La première partie du module, consacrée à la microbiologie, permettra de se familiariser avec la diversité morphologique et fonctionnelle des micro-organismes, leurs besoins nutritionnels, leur croissance et leurs interactions avec l'environnement. Elle abordera également le rôle clé de ces êtres microscopiques dans la décomposition de la matière organique et le recyclage des bioéléments, en mettant l'accent sur les milieux du sol, de l'eau et de l'air.

La seconde partie, centrée sur la biochimie environnementale, approfondira les bases moléculaires du métabolisme microbien. Elle présentera la structure et les propriétés des biomolécules (protéines, glucides, lipides), ainsi que les mécanismes enzymatiques qui régulent leur dégradation et leur transformation. Ces notions permettront de comprendre comment les micro-organismes participent à la minéralisation de la matière organique et à la circulation des éléments chimiques dans la nature.

Le présent module propose une approche intégrée et complémentaire des processus microbiens et biochimiques qui gouvernent la vie dans l'environnement. Il constitue un socle essentiel pour toute formation en génie de procédés de l'environnement, sciences de l'environnement, biotechnologies, écologie microbienne ou sciences des aliments, en offrant aux étudiants les outils conceptuels nécessaires pour analyser, gérer et préserver les milieux naturels dans un contexte de développement durable

Première Partie

I. Introduction à la microbiologie de l'environnement

La microbiologie est la science qui étudie les micro-organismes, êtres vivants invisibles à l'œil nu. Cette discipline englobe l'analyse de leur structure, leur fonctionnement, leur croissance, leur reproduction, leur génétique et leurs interactions avec d'autres organismes, y compris l'être humain. Elle est au carrefour de nombreuses disciplines scientifiques et intervient dans des domaines aussi variés que la santé, l'agriculture, l'environnement, l'alimentation et la recherche biomédicale. Cette science est divisée en plusieurs branches, en fonction du type de « microbe » étudié : la bactériologie, la virologie, la mycologie, la parasitologie et la phycologie

Les microorganismes aussi appelés « microbes », dérivé du grec: Mikros, «petit» et Organismos, «organisme», forment un ensemble d'organismes invisibles à l'œil nu. Leur taille est généralement inférieure à un millimètre (1mm) : ils doivent être observés au microscope (photonique/optique ou électronique) et comprennent soit une seule cellule (unicellulaire) ou un amas de cellules identiques (non différentiée). Ils comprennent les bactéries, les champignons, les algues, les virus, et les protozoaires (Figure 1).

Ils jouent un rôle essentiel dans les équilibres naturels et la préservation de l'environnement. Ils participent activement aux grands cycles biogéochimiques, notamment le cycle du carbone, de l'azote, du soufre et du phosphore. Tel certaines bactéries qui fixent l'azote atmosphérique, le rendant assimilable par les plantes, et d'autres qui décomposent la matière organique, favorisant ainsi le recyclage des nutriments dans les sols et les écosystèmes aquatiques. De plus, certaines espèces microbiennes sont capables de biodégrader des polluants, ce qui en fait des outils puissants pour la dépollution des sols, des eaux usées et des milieux contaminés (bioremédiation). À ce titre, les micro-organismes sont de véritables acteurs de la régulation écologique et du maintien de la vie sur Terre.

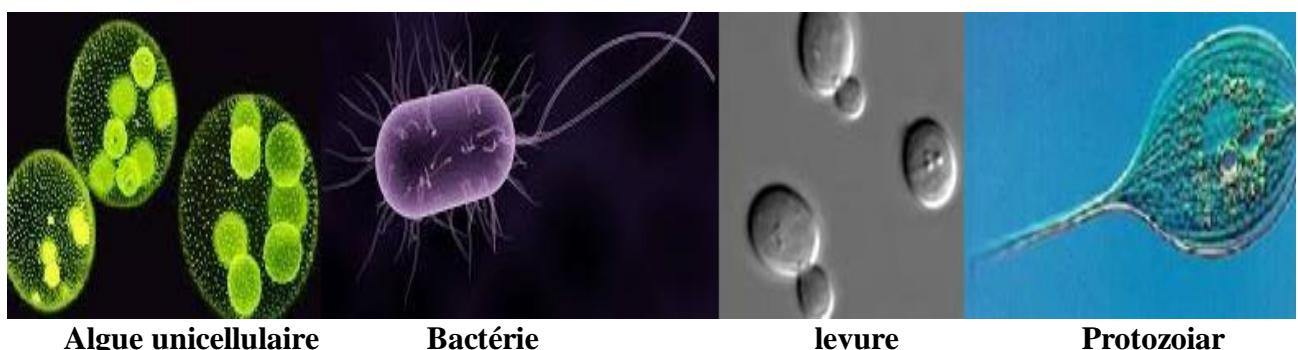


Figure 1. Organismes microscopiques.

En médecine, la microbiologie permet l'identification des agents pathogènes et la mise au point de traitements, tandis qu'en biotechnologie, elle est à la base de la production d'antibiotiques, d'enzymes, ou de produits fermentés. e

I.1. Historique

L'histoire de la microbiologie est marquée par une succession de découvertes qui ont transformé la compréhension du monde vivant et révolutionné la médecine, l'agriculture et l'environnement. Cette discipline a émergé avec l'apparition des premiers microscopes, permettant d'observer un univers invisible jusqu'alors insoupçonné. Des pionniers comme Antonie Van Leeuwenhoek, Louis Pasteur ou encore Robert Koch ont posé les bases scientifiques de cette nouvelle branche de la biologie. Du rejet de la génération spontanée à la découverte des antibiotiques, la microbiologie s'est enrichie grâce aux apports de la chimie, de la génétique et plus récemment de la biotechnologie moléculaire.

Les grandes dates qui ont jalonné l'évolution de la microbiologie sont :

- 1676 : *Antonie van Leeuwenhoek* observe pour la première fois des micro-organismes (bactéries, protozoaires) à l'aide de microscopes simples qu'il a construits. Il les appelle « animalcules ».
- 1750–1800 : La théorie de la génération spontanée (naissance de la vie à partir de matière inerte) est encore largement acceptée.
- 1857–1861 : *Louis Pasteur* réfute la génération spontanée grâce à ses expériences avec les flacons à col de cygne. Il établit les bases de la théorie microbienne des maladies.
- 1865–1870 : Pasteur développe la pasteurisation pour conserver les aliments (vin, lait) et commence ses travaux sur les maladies infectieuses.
- 1876 : *Robert Koch* identifie *Bacillus anthracis* comme agent causal du charbon, établissant un lien direct entre un microbe et une maladie.
- 1882 : Koch découvre *Mycobacterium tuberculosis*, agent de la tuberculose.
- 1883 : Il identifie également *Vibrio cholerae*, responsable du choléra.
- 1884 : Formulation des postulats de Koch, critères permettant d'attribuer une maladie à un micro-organisme donné.
- 1867–1870 : *Joseph Lister* introduit les pratiques antiseptiques en chirurgie à l'aide de phénol, réduisant les infections post-opératoires.
- 1928 : *Alexander Fleming* découvre la pénicilline, premier antibiotique, à partir d'une moisissure (*Penicillium notatum*).
- 1940–1945 : Production industrielle de la pénicilline durant la Seconde Guerre mondiale. Début de l'ère des antibiotiques.

- 1950–1970 : Développement de la virologie grâce à la microscopie électronique. Identification de nombreux virus pathogènes.
- 1977 : *Carl Woese* propose la classification en trois domaines (Bactéries, Archées, Eucaryotes) grâce à la phylogénie moléculaire basée sur l'ARN ribosomique.
- 1983 : Invention de la PCR (polymerase chain reaction) par *Kary Mullis*, révolutionnant la détection et l'étude des micro-organismes.
- 2000s : Avancées en métagénomique et étude du microbiote humain ; mise en évidence de son rôle fondamental dans la santé.

I.2. Classification des micro-organismes

I.2.1. Classification cellulaire

Les micro-organismes se répartissent en deux types cellulaires (Tableau 1) : **les procaryotes** (bactéries et archées) et **les eucaryotes** (champignons, protozoaires, algues). Cette distinction est fondamentale pour comprendre leur organisation et leur fonctionnement biologique.

Tableau I. Différences entre procaryotes et eucaryotes.

Caractéristique	Procaryotes	Eucaryotes
Noyau	Absent	Présent
ADN	Nu, circulaire	Linéaire, contenu dans un noyau
Organites	Non membraneux	Nombreux (mitochondries, RE...)
Taille	1-10 µm	10-100 µm
Exemples	Bactéries, Archées	Protozoaires, champignons, algues

I.2.1.1. Procaryotes

Les procaryotes ne possèdent pas de noyau : leur ADN, circulaire, est libre dans le cytoplasme. Ils n'ont pas d'organites membraneux (pas de mitochondries, de réticulum endoplasmique, etc.). Leur taille est généralement plus petite, entre 1 à 10 micromètres (Figure 2). À ce groupe appartiennent les bactéries et les archées.

I. 2.1.2. Eucaryotes

Les eucaryotes possèdent un noyau bien défini contenant un ADN linéaire, ainsi que plusieurs organites cellulaires comme les mitochondries ou les chloroplastes. Ils sont plus grands (10 à 100 micromètres), plus complexes, et peuvent être unicellulaires ou pluricellulaires micromètres (Figure 2). Les champignons microscopiques, les protozoaires et les algues font partie de ce groupe.

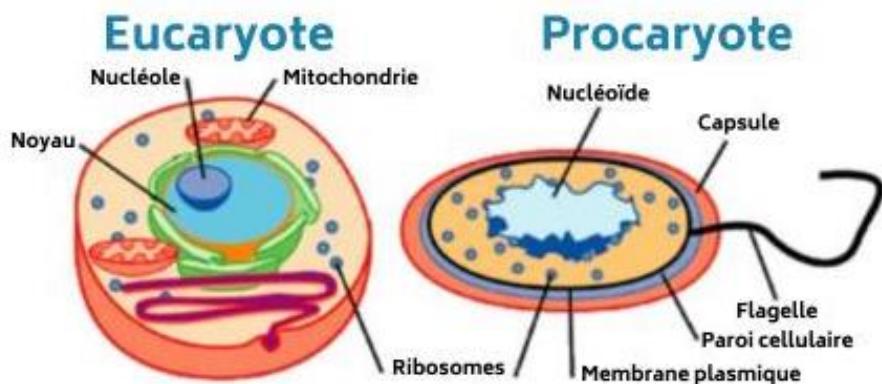


Figure 2. Différence entre procaryotes et eucaryotes.

I.2.2. Classification fonctionnelle ou taxonomique

Les micro-organismes, représentent une diversité biologique extraordinaire. Leur classification repose sur des critères morphologiques, génétiques, métaboliques et écologiques. Et sont regroupés généralement en six grandes catégories : bactéries, archées, champignons microscopiques, protozoaires, algues microscopiques et virus.

I.2.2.1. Bactéries

Les bactéries sont des organismes procaryotes unicellulaires, dépourvus de noyau véritable. Leur matériel génétique est constitué d'un ADN circulaire libre dans le cytoplasme. Elles possèdent une paroi cellulaire rigide, généralement composée de peptidoglycane, qui leur confère une certaine résistance mécanique. La reproduction se fait principalement par fission binaire, un mode de division rapide et efficace. Plusieurs types de bactéries sont distinguées selon leur forme (Cocci, bacilles, spirilles) et leur réaction à la coloration de Gram (Gram positif ou Gram négatif).

Exemples : *Escherichia coli* (Bactérie commensale de l'intestin), *Lactobacillus* (bactérie impliquée dans les fermentations lactiques).

I.2.2.2. Archées

Les archées sont également des procaryotes unicellulaires, mais elles présentent de nombreuses différences biochimiques par rapport aux bactéries : leur paroi n'est pas composée de peptidoglycane, et leurs membranes contiennent des lipides particuliers. Elles sont souvent associées à des milieux extrêmes, tels que les sources chaudes acides (archées thermophiles), les marais salants (halophiles) ou les environnements anoxiques (méthanogènes). Bien qu'elles soient abondantes dans certains écosystèmes, aucune archée pathogène n'a été identifiée à ce jour.

Exemples : *Halobacterium*, *Methanobrevibacter*.

I.2.2.3. Champignons microscopiques

Les champignons microscopiques sont des eucaryotes, qui peuvent être unicellulaires, comme les levures, ou pluricellulaires formant des structures filamenteuses appelées mycélium, comme les moisissures. Leur paroi cellulaire est composée de chitine. Ils se nourrissent par absorption, en dégradant la matière organique. Certains sont utiles dans les industries agroalimentaires (fermentations), d'autres sont responsables de maladies humaines (mycoses).

Exemples : *Saccharomyces cerevisiae* (levure de bière), *Aspergillus* (moisissures).

I.2.2.4. Protozoaires

Les protozoaires sont des eucaryotes unicellulaires, souvent mobiles grâce à des cils, flagelles ou pseudopodes. Ils vivent dans des environnements aquatiques ou comme parasites d'animaux et d'humains. Leur mode de reproduction peut être asexué (fission binaire) ou sexué. Certains protozoaires sont responsables de maladies graves chez l'homme.

Exemples : *Plasmodium falciparum* (paludisme), *Entamoeba histolytica* (dysenterie amibienne), *Trypanosoma* (maladie du sommeil).

I.2.2.5. Algues microscopiques

Les algues microscopiques sont des eucaryotes autotrophes, capables de photosynthèse grâce à la présence de chloroplastes. Elles jouent un rôle fondamental dans la production d'oxygène et constituent la base de nombreuses chaînes alimentaires aquatiques. Elles peuvent être unicellulaires (*Chlorella*) ou former des colonies. Certaines algues microscopiques sont utilisées dans l'industrie (bioénergie, compléments alimentaires).

Exemples : *Chlorella*, *Navicula*.

I.2.2.6. Virus, viroïdes et prions

Les virus ne sont pas des cellules mais des entités acellulaires. Ils sont composés d'un acide nucléique (ADN ou ARN), entouré d'une capsidé protéique, et parfois d'une enveloppe lipidique. Les virus sont des parasites intracellulaires obligatoires : ils ne peuvent se multiplier qu'en infectant une cellule hôte. Certains causent des maladies graves chez l'homme, les animaux et les plantes.

Les viroïdes sont encore plus simples : ce sont de courts ARN circulaires infectieux, sans capsidé, connus uniquement chez les plantes.

Les prions, quant à eux, sont des protéines infectieuses capables de transmettre des maladies neurodégénératives sans matériel génétique.

Exemples : VIH (SIDA), virus de la grippe, SARS-CoV-2 (COVID-19), prion de la maladie de Creutzfeldt-Jakob.

I.3. Rôle des microorganismes dans l'environnement

Les micro-organismes jouent un rôle indispensable dans l'équilibre des écosystèmes terrestres, aquatiques et aériens. Leur action est à la fois discrète et essentielle : ils sont les grands recycleurs de la nature, les intermédiaires biochimiques de nombreux cycles naturels, et les outils biologiques de dépollution. Bien que certains soient responsables de maladies, la grande majorité des micro-organismes remplissent des fonctions bénéfiques, notamment pour l'environnement. Par leurs activités métaboliques variées, ils assurent les fonctions suivantes:

a) Décomposition de la matière organique

Les bactéries, les champignons et les actinomycètes assurent la minéralisation de la matière organique morte (feuilles, racines, cadavres, excréments). Grâce à leurs enzymes extracellulaires (cellulases, protéases, lipases, etc.), ils décomposent les macromolécules complexes (protéines, glucides, lipides) en composés simples (CO_2 , NH_4^+ , H_2O , sels minéraux).

Cette décomposition libère les nutriments indispensables à la croissance des plantes et des autres organismes, assurant ainsi la boucle de la matière dans la biosphère.

b) Recyclage des nutriments

Les micro-organismes participent au recyclage permanent des éléments nutritifs essentiels, tels que le carbone, l'azote, le soufre et le phosphore. Ils transforment les formes organiques de ces éléments en formes minérales assimilables par les végétaux (nitrates, phosphates, sulfates). Ce processus de biodisponibilité des éléments minéraux est indispensable à la productivité des écosystèmes.

c) Participation aux cycles biogéochimiques

Les micro-organismes jouent un rôle central dans les cycles biogéochimiques. Grâce à leurs activités métaboliques, ils assurent la décomposition de la matière organique, la transformation des éléments en formes assimilables par les plantes et la régénération continue des ressources naturelles. Ainsi, ils garantissent l'équilibre des écosystèmes et la continuité de la vie sur Terre.

d) Fertilisation naturelle des sols

Les micro-organismes du sol, notamment les bactéries fixatrices d'azote et les champignons *mycorhiziens*, contribuent à la fertilité naturelle. Les *Rhizobium* en symbiose avec les légumineuses forment des nodosités racinaires capables de fixer l'azote atmosphérique. Les *mycorhizes*, associations entre champignons et racines de plantes, favorisent l'absorption du phosphore et d'autres nutriments, améliorant la croissance végétale et la structure du sol.

e) Épuration et dégradation des polluants

Les micro-organismes sont des agents de dépollution naturels. Dans les sols et les milieux aquatiques, des bactéries et champignons dégradent ou transforment des polluants organiques (hydrocarbures, pesticides, solvants) en composés moins toxiques ou inertes. Ce phénomène, appelé biorémédiation, est exploité dans les stations d'épuration (traitement biologique des eaux usées) et dans la dépollution des sites contaminés.

f) Maintien de la qualité de l'eau (autoépuration)

Dans les écosystèmes aquatiques, les communautés microbiennes assurent l'autoépuration naturelle des eaux. Elles dégradent la matière organique dissoute et participent à la nitrification et à la dénitrification, limitant ainsi la pollution organique et l'eutrophisation. Cette activité microbiologique garantit la stabilité biologique et chimique des milieux aquatiques.

g) Régulation du climat

Certains micro-organismes influencent la composition atmosphérique et les échanges de gaz à effet de serre. Les cyanobactéries et algues fixent le CO₂ lors de la photosynthèse, tandis que les bactéries méthanogènes et méthanolotrophes régulent le cycle du méthane (CH₄), un gaz à fort pouvoir de réchauffement. Ainsi, ils participent indirectement à la régulation du climat planétaire.

h) Vie dans les milieux extrêmes

Les extrémophiles (archées et bactéries vivant dans des conditions extrêmes : températures, salinité, acidité ou pression) démontrent la capacité d'adaptation extraordinaire de la vie microbienne. Ces organismes colonisent les sources hydrothermales, les déserts, les glaces polaires ou les milieux très salés, contribuant à la transformation géochimique de ces environnements et offrant des modèles pour la biotechnologie et l'astrobiologie.

II. Morphologie et anatomie fonctionnelle des bactéries

La connaissance de la morphologie et de l'anatomie fonctionnelle bactérienne est essentielle pour comprendre leur classification, leur mode de vie, leur pathogénicité et leurs interactions avec l'environnement ou l'hôte. Bien que très petites (en général entre 0,2 et 10 µm), les bactéries présentent une structure cellulaire bien organisée qui, bien qu'elle soit dépourvue de noyau (procaryote), leur permet de remplir des fonctions complexes.

II.1. Définition de bactérie

Une bactérie est un être unicellulaire (procaryote) de petite taille, de morphologie variable qui présente des caractéristiques propres.

La taille d'une bactérie varie entre 1 à 10 µm. Le poids d'une bactérie est d'environ 10^{-12} g. Elle contient 70% d'eau. Rapporté au poids sec, une bactérie est constituée de protéines (55%), de lipides (10%) de lipopolysaccharides (3%), de peptidoglycane (3%), de ribosomes (40%), d'ARN (20%) et d'ADN (3%).

II.2. Morphologie bactérienne

Les bactéries présentent plusieurs formes morphologiques distinctes (Figure 3).

- ✓ **Cocci**, est une forme sphérique. Exemples : *Staphylococcus aureus* (en amas), *Streptococcus pyogenes* (en chaînes).
- ✓ **Bacilles**, sont des bâtonnets allongés. *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*.
- ✓ **Spirilles**, sont hélicoïdaux rigides. *Spirillum volutans*.
- ✓ **Spirochètes**, sont hélicoïdaux flexibles. *Treponema pallidum* (syphilis), *Borrelia burgdorferi* (maladie de Lyme).
- ✓ **Vibrions**, forme incurvée en virgule. *Vibrio cholerae* (agent du choléra).

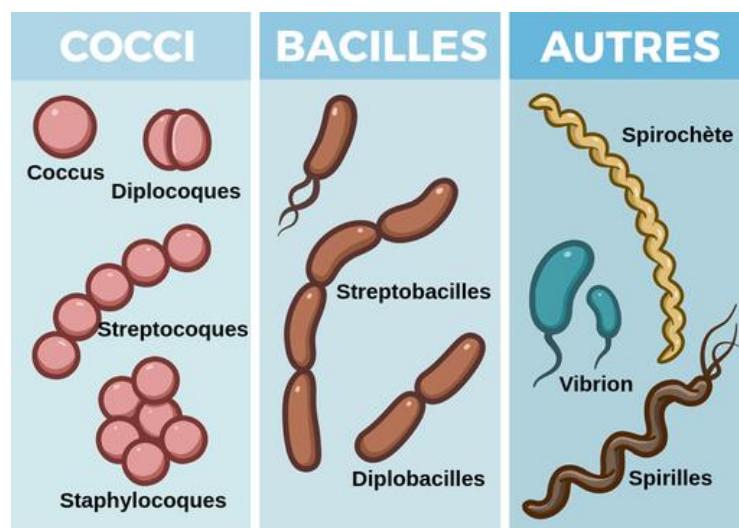


Figure 3. Formes bactériennes.

II.3. Organisation cellulaire d'une bactérie

L'organisation cellulaire des bactéries se distingue par des éléments constants (présents chez la majorité des bactéries) et des éléments inconstants ou facultatifs (présents uniquement chez certaines espèces ou dans des conditions spécifiques).

II.3.1. Eléments constants

La bactérie est constituée d'éléments constants qu'on retrouve chez toutes les bactéries.

II.3.1.1. Paroi bactérienne

La paroi bactérienne est une structure rigide entourant la membrane plasmique de la plupart des bactéries (à l'exception des mycoplasmes). Elle est principalement composée de peptidoglycane, un polymère formé de chaînes de N-acétylglucosamine (NAG) et d'acide N-acétylmuramique (NAM) reliées par des ponts peptidiques. Ses fonctions principales sont :

- Déterminer la forme de la bactérie.
- Conférer une résistance à la pression osmotique, évitant ainsi la lyse cellulaire.
- Jouer un rôle dans la division cellulaire.
- Contribuer à la pathogénicité via des composants antigéniques spécifiques

La composition de la paroi varie selon le type de bactérie, et permet de distinguer deux groupes bactériens bactéries à Gram positif et bactéries à Gram négatif

a. Bactérie à Gram positif

Les bactéries à Gram positif possèdent une paroi très épaisse constituée essentiellement de peptidoglycane, pouvant atteindre 15 à 80 nm d'épaisseur. Cette couche représente environ 90 % de la paroi cellulaire. Elle est enrichie en acides teichoïques et lipoteichoïques, qui jouent un rôle dans la stabilité de la paroi, l'adhésion aux surfaces et la réponse immunitaire (Figure 4, Tableau II).

L'absence de membrane externe caractérise ces bactéries, et leur paroi retient fortement le complexe cristal violet-iodine lors de la coloration de Gram, ce qui leur confère une couleur violette au microscope.

Parmi les exemples typiques de bactéries à Gram positif, on trouve *Staphylococcus aureus* et *Bacillus subtilis*.

b. Bactérie à Gram négatif

Les bactéries à Gram négatif, en revanche, présentent une paroi plus complexe mais plus fine. Leur peptidoglycane est peu abondant (2 à 5 nm d'épaisseur) et situé dans l'espace périplasmique, entre la membrane cytoplasmique et une membrane externe supplémentaire. Cette membrane externe contient des lipopolysaccharides (LPS), dont le lipide A possède une activité toxique (endotoxine), et des porines qui régulent l'entrée de molécules (Figure 4, Tableau II).

Les bactéries à Gram négatif perdent le cristal violet lors du rinçage à l'alcool et prennent la contre-coloration rose à la safranine (*Escherichia coli* et *Pseudomonas aeruginosa*).

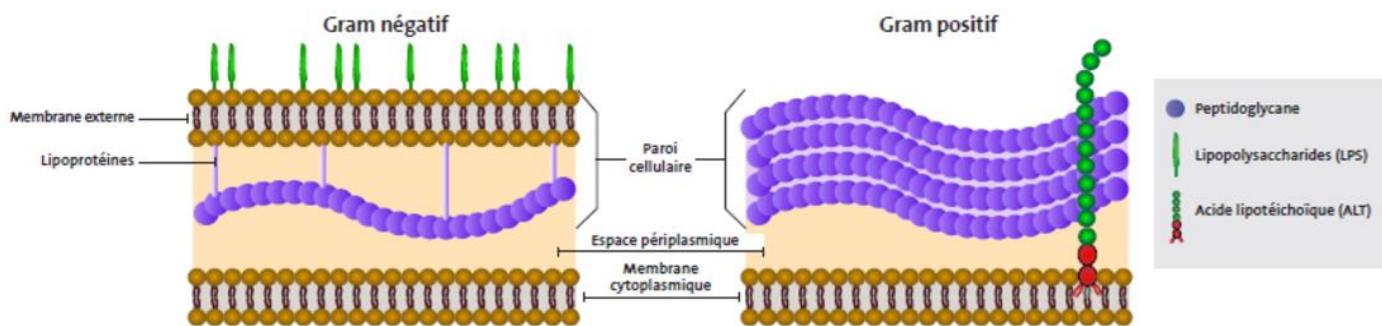


Figure 4. Structure pariétale de bactéries Gram positive et Gram négative.

Tableau II. Bactéries Gram positive et Gram négative.

Caractéristique	Gram +	Gram -
Peptidoglycane	Très épais	Fin
Membrane externe	Absente	Présente
Acides teichoïques	Présents	Absents
Lipopolsaccharides (LPS)	Absents	Présents (toxiques)
Coloration de Gram	Violet	Rose
Exemples	<i>Staphylococcus aureus</i> <i>Bacillus subtilis</i>	<i>Escherichia coli</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i>

II.3.1.2. Membrane plasmique

La membrane plasmique est une bicoche lipidique semi-perméable associé à des protéines qui entoure le cytoplasme. Contrairement aux cellules eucaryotes, elle remplace plusieurs fonctions des organites membranaires absents chez les procaryotes. Ne contient pas de stérols (sauf exception comme chez *Mycoplasma*). La membrane joue un rôle essentiel dans:

- ✓ Le fonctionnement de la cellule : fonctionne comme une barrière semi-perméable et contrôle les échanges entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule.
- ✓ La respiration cellulaire (chez les bactéries aérobies, car absence de mitochondries),
- ✓ Le transport actif (grâce à des protéines de transport spécifiques),
- ✓ La synthèse des parois, lipides, et d'autres macromolécules,
- ✓ La signalisation cellulaire et la détection de l'environnement,

II.3.1.3. Cytoplasme

Le cytoplasme est un milieu intracellulaire gélatineux constitué majoritairement d'eau, contenant des ribosomes de type 70S, des enzymes, des nutriments, des inclusions de réserve (comme le glycogène ou les polyphosphates) et des éléments structuraux. Il est le site de la synthèse des protéines, des voies métaboliques et des réactions enzymatiques. Ne contient pas d'organites membranaires comme chez les eucaryotes.

II.3.1.4. Appareil nucléaire

Chez les procaryotes, le matériel génétique appelé aussi nucléotide, est généralement constitué d'un unique chromosome circulaire double brin, compacté sans membrane nucléaire qui baigne librement dans le cytoplasme et peut être accompagné de plasmides, qui sont des molécules d'ADN circulaires extra-chromosomiques portant des gènes accessoires comme ceux de la résistance aux antibiotiques (Figure 5).

II.3.2. Eléments inconstants

Les éléments inconstants (ou structures facultatives) chez une bactérie sont des structures non présentes chez toutes les espèces et non essentielles à la survie immédiate, mais qui confèrent des avantages spécifiques dans certaines conditions (Tableau III).

II.3.2.1. Capsule

La capsule est une couche externe entourant la paroi de certaines bactéries (Figure 5). Elle est généralement constituée de polysaccharides, bien que certaines capsules soient de nature protéique, comme celle de *Bacillus anthracis*. Comme fonctions principales la capsule :

- ✓ Protège la bactérie contre la phagocytose par le système immunitaire.
- ✓ Facilite l'adhésion aux surfaces et aux cellules hôtes.
- ✓ Contribue à la virulence en aidant la bactérie à échapper aux défenses de l'hôte.

La capsule peut être mise en évidence au microscope à l'aide de techniques spécifiques, comme la coloration à l'encre de Chine.

II.3.2.2. Spore (Endospore)

Certaines bactéries, notamment les genres *Bacillus* et *Clostridium*, peuvent former des spores (ou endospores) lorsqu'ils se retrouvent dans des conditions environnementales défavorables (épuisement de nutriments). La spore est une forme dormante, hautement résistante, permettant à la bactérie de survivre pendant de longues périodes.

La spore présente les caractéristiques suivantes :

- ✓ **Résistance à des conditions extrêmes** : chaleur, dessiccation, radiations, produits chimiques.

- ✓ **Structure complexe** comprenant une paroi sporale, un cortex riche en peptidoglycane, et une tunique protéique externe.
- ✓ **Viabilité**: la spore peut rester viable pendant des années, voire des siècles, et germer lorsque les conditions redeviennent favorables.

II.3.2.3. Flagelle

Le flagelle est une structure filamentueuse longue et fine, composée principalement de protéine flagelline (Figure 5). Il est ancré dans la membrane cytoplasmique et la paroi cellulaire via un complexe basal. Le flagelle fonctionne comme un moteur rotatif, alimenté par un flux de protons, qui permet à la bactérie de se déplacer activement dans son environnement, souvent par chimiotactisme (réaction à des gradients chimiques). Le flagelle a pour rôle d'assurer :

- ✓ Mobilité (locomotion dans les milieux liquides)
- ✓ Colonisation des surfaces
- ✓ Échappement aux défenses immunitaires dans certains cas.

II.3.2.4. Pili (ou fimbriae)

Les pili, appelés aussi fimbriae, sont de courts appendices protéiques rigides et nombreux à la surface de certaines bactéries (Figure 5). Contrairement aux flagelles, ils ne participent pas à la mobilité (sauf les pili de type IV) mais assurent principalement l'adhésion à des surfaces, à d'autres cellules bactériennes ou à des cellules hôtes. Deux types de pili peuvent être distingués :

- ✓ **Pili d'adhésion (pili commun)** : facilitent la fixation aux tissus de l'hôte ou à des surfaces inertes (biofilms).
- ✓ **Pili sexuels (pili F)** : présents chez les bactéries possédant un plasmide F. Ils permettent le transfert d'ADN d'une cellule donneuse vers une cellule réceptrice par conjugaison bactérienne.

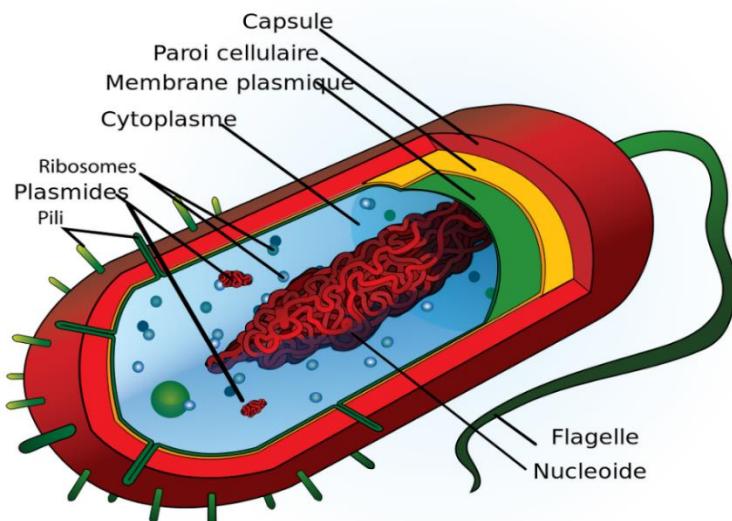


Figure 5. Cellule bactérienne.

Tableau III. Eléments inconstants de la structure bactérienne.

Structure	Fonction principale	Exemple(s) d'espèce bactérienne
Capsule	<ul style="list-style-type: none"> • Protection contre la phagocytose • Adhésion aux surfaces 	<i>Streptococcus pneumoniae</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Neisseria meningitidis</i>
Spore	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance aux conditions extrêmes (chaleur, dessiccation, désinfectants) • Survie prolongée 	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Clostridium tetani</i> , <i>Clostridium botulinum</i>
Pili	<ul style="list-style-type: none"> • Adhésion aux cellules ou surfaces • Transfert d'ADN (conjugaison) 	<i>Escherichia coli</i> (pili F), <i>Neisseria gonorrhoeae</i> , <i>Salmonella spp.</i>
Flagelle	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilité active (chimiotactisme) • Colonisation des tissus 	<i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella enterica</i> , <i>Helicobacter pylori</i> , <i>Vibrio cholerae</i>

III. Physiologie bactérienne

La physiologie bactérienne est une branche clé de la microbiologie qui s'intéresse aux fonctions vitales des bactéries. Elle permet de comprendre comment ces organismes microscopiques croissent, se reproduisent, utilisent les nutriments, produisent de l'énergie et s'adaptent à leur environnement. L'étude de leur physiologie est fondamentale non seulement pour la compréhension des bases du vivant, mais aussi pour l'exploitation environnementale et industrielle des bactéries, la lutte contre les infections, et le développement d'antibiotiques.

III.1. Nutrition

Pour assurer sa survie et sa multiplication, la bactérie doit capter dans son environnement une variété de nutriments essentiels : des sources d'énergie, des éléments structuraux et parfois des facteurs spécifiques de croissance.

III.1.1. Besoins élémentaires des bactéries

La nutrition bactérienne repose sur des besoins fondamentaux en éléments chimiques (C, N, S, P, etc.) et en énergie, ainsi que sur la capacité d'adaptation aux conditions physiques (température, pH, salinité). Comprendre ces besoins est essentiel pour cultiver les bactéries en laboratoire, contrôler leur croissance ou encore pour les exploiter (Tableau VI).

Selon leurs sources de carbone, d'énergie et d'électrons, les bactéries présentent des modes trophiques variés leur permettant d'occuper pratiquement tous les milieux naturels. Ainsi, différentes sources sont distinguées :

III.1.1.1 Sources d'énergie

Les bactéries ont des sources d'énergie variées, ce qui leur permet de s'adapter à une grande diversité d'environnements. Elles se classent en fonction de la nature de la source d'énergie qu'elles utilisent pour produire de l'ATP (l'énergie cellulaire)

- a) **Phototrophes** : utilisent la lumière comme source d'énergie (photosynthèse bactérienne).
 - ✓ **Photo-lithotrophes**, utilisent des donneurs d'électrons minéraux (soufre, hydrogène...)
 - ✓ **Photo-organotrophes** exploitent des molécules organiques comme source d'énergie
- b) **Chimiotrophes** : utilisent l'énergie issue de réactions d'oxydation chimique
 - ✓ **Chimio-organotrophes** : oxydent des composés organiques (glucides, lipides, etc.)
 - ✓ **Chimio-lithotrophes** : utilisent des composés minéraux (NH_3 , NO_2^- , H_2S).

III.1.1.2. Sources de carbone

Le carbone est un constituant majeur des biomolécules cellulaires. Selon la source de carbone utilisée, on distingue :

- ✓ **Autotrophes** : utilisent le dioxyde de carbone (CO_2) comme unique source de carbone.
- ✓ **Hétérotrophes** : utilisent des composés organiques préformés (glucose, acides organiques, etc.).

La majorité des bactéries pathogènes ou commensales sont chimio-organo-hétérotrophes.

III.1.1.3. Sources d'électrons

Les électrons jouent un rôle fondamental dans le métabolisme bactérien : ils interviennent dans les réactions d'oxydoréduction qui permettent la production d'énergie (ATP) et la synthèse de biomolécules. Les bactéries se distinguent selon la nature du donneur d'électrons qu'elles utilisent pour leurs processus métaboliques. Deux grands groupes sont distingués

a) Lithotrophes

Les bactéries lithotrophes utilisent des composés minéraux réduits comme source d'électrons. Ces électrons proviennent de substances inorganiques telles que : Hydrogène (H_2), Sulfure d'hydrogène (H_2S), Fer ferreux (Fe^{2+}), Ammoniac (NH_3) et Nitrite (NO_2^-). Ces bactéries peuvent être :

- **Photo-lithotrophes**, lorsqu'elles utilisent la lumière comme source d'énergie
- **Chimio-lithotrophes**, lorsqu'elles tirent leur énergie de réactions chimiques d'oxydation

b) Organotrophes

Les bactéries organotrophes utilisent des composés organiques (glucides, acides organiques, alcools, acides aminés) comme donneurs d'électrons. Les électrons libérés lors de l'oxydation de ces substrats sont transférés à des chaînes respiratoires (aérobiose ou anaérobiose) pour produire de l'ATP. Ces bactéries regroupent la majorité des espèces pathogènes, saprophytes et commensales, qui tirent leur énergie et leurs électrons de la matière organique disponible dans leur environnement.

III.1.1.4. Sources d'azote

L'azote est indispensable à la synthèse des acides aminés, acides nucléiques et autres cofacteurs. La majorité des bactéries utilisent l'azote organique extrait des acides aminés.

Certaines bactéries (*Rhizobium*, *Azotobacter*, *Clostridium*) fixent l'azote atmosphérique (N_2) en ammoniac. D'autres utilisent l'azote minéral : ammoniac (NH_4^+), nitrates (NO_3^-) ou nitrites (NO_2^-), comme *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*.

III.1.1.5. Sources de soufre et de phosphore

Le soufre est nécessaire pour la synthèse des acides aminés soufrés (cystéine, méthionine) et de certaines coenzymes. Il peut être fourni sous forme minérale (S, SO_4^{2-} , thiosulfates) ou organique.

Le phosphore est un constituant essentiel de l'ADN, de l'ARN, des phospholipides membranaires et de l'ATP. Il est souvent absorbé sous forme de phosphate (PO_4^{3-}).

Tableau VI. Besoins élémentaires des bactéries.

Besoins élémentaires	Type / Catégorie	Exemples d'espèces bactériennes
Source d'énergie	Phototrophes (énergie lumineuse)	<i>Cyanobacteria, Rhodospirillum</i>
	Chimiotrophes (énergie chimique)	<i>Nitrosomonas, Pseudomonas aeruginosa</i>
Source d'électrons	Lithotrophes (donneurs inorganiques)	<i>Nitrobacter, Thiobacillus ferrooxidans</i>
	Organotrophes (donneurs organiques)	<i>Escherichia coli, Bacillus subtilis</i>
Source de carbone	Autotrophes (CO_2)	<i>Nitrobacter, Cyanobacteria</i>
	Hétérotrophes (molécules organiques)	<i>E. coli, Salmonella enterica</i>
Source d'azote	Fixateurs d'azote atmosphérique	<i>Rhizobium, Azotobacter, Clostridium pasteurianum</i>
	Azote minéral (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-)	<i>Nitrosomonas, Enterobacter</i>
	Azote organique (acides aminés)	<i>Bacillus subtilis, Staphylococcus aureus</i>
Soufre	Minéral (S, SO_4^{2-} , thiosulfates)	<i>Thiobacillus, Desulfovibrio</i>
	Organique	<i>Lactobacillus spp., Staphylococcus aureus</i>
Phosphore	Phosphate inorganique (PO_4^{3-})	Presque toutes les espèces, ex. <i>E. coli</i>

III.1.2. Besoins spécifiques

III.1.2.1. Facteurs de croissance

Certaines bactéries, dites **auxotrophes**, ne peuvent pas synthétiser tous les métabolites essentiels à leur croissance. Elles doivent les trouver dans leur environnement : des vitamines (biotine, acide folique, thiamine), des acides aminés essentiels (tryptophane, histidine), des bases puriques et pyrimidiques pour la synthèse des acides nucléiques. Les bactéries capables de synthétiser tous ces éléments sont dites **prototrophes**.

III.1.2.2. Besoins en oxygène

Les bactéries sont classées selon leur tolérance et leurs exigences à de l'oxygène :

- ✓ **Aérobies stricts** : nécessitent de l'O₂ pour la respiration (*Neisseria, Staphylococcus aureus*).
- ✓ **Anaérobies stricts** : l'oxygène est toxique pour elles ; elles utilisent la fermentation ou la respiration anaérobie (*Clostridium botulinum*).
- ✓ **Anaérobies facultatifs** : croissent avec ou sans O₂ ; elles utilisent la respiration ou la fermentation (*E. coli*).
- ✓ **Microaérophiles** : préfèrent de faibles concentrations en O₂.
- ✓ **Aérotolérantes** : tolèrent l'O₂ sans l'utiliser ; leur métabolisme est strictement fermentatif.

III.1.3. Facteurs physiques

III.1.3.1. Température optimale

La température influence fortement le métabolisme bactérien (Tableau V):

- ✓ **Psychrophiles** : croissent entre 0 et 20°C (*Pseudomonas, Aeromonas*).
- ✓ **Mésophiles** : 20 à 45°C ; comprennent la majorité des bactéries pathogènes humaines (optimum ≈ 37°C).
- ✓ **Thermophiles** : 45 à 65°C ; vivent dans les sources chaudes (*Bacillus, Clostridium*).
- ✓ **Cryophiles** : < 0°C ; présentes dans les océans polaires, glaciers.

III.1.3.2. pH optimal

Les bactéries ont des préférences de croissance en fonction du pH (Tableau V)

- ✓ **Acidophiles** : optimum en pH acide.
- ✓ **Neutrophiles** : pH proche de 7 (la majorité des bactéries).
- ✓ **Basophiles** (ou alcalophiles) : préfèrent un pH basique.

III.1.3.3. Pression osmotique

Les bactéries s'adaptent à la concentration en solutés de leur environnement (Tableau V)

- ✓ **Halophiles** : nécessitent une forte concentration en sel (1–30% NaCl selon les espèces, tel *Halobacterium*).
- ✓ **Halotolérantes** : supportent des concentrations modérées en sel (*Staphylococcus aureus*).
- ✓ **Osmophiles** : croissent dans des milieux très sucrés.
- ✓ **Osmotolérantes** : tolèrent mais n'exigent pas un milieu osmotique élevé.

Tableau V. Facteurs physiques.

Facteurs physiques	Type / Seuil	Exemples d'espèces bactériennes
Température optimale	Psychrophiles (< 20°C)	<i>Listeria monocytogenes, Pseudomonas fluorescens</i>
	Mésophiles (20–45°C)	<i>E. coli, Staphylococcus aureus, Salmonella</i>
	Thermophiles (> 45°C)	<i>Bacillus stearothermophilus, Thermus aquaticus</i>
	Cryophiles (< 0°C)	Bactéries des environnements polaires
pH optimal	Acidophiles	<i>Lactobacillus acidophilus, Sulfolobus</i>
	Neutrophiles	<i>E. coli, Salmonella enterica</i>
	Alcaliphiles	<i>Bacillus alcalophilus</i>
Pression osmotique	Halophiles (1–30% NaCl)	<i>Halobacterium salinarum, Vibrio fischeri</i>
	Halotolérantes	<i>Staphylococcus aureus</i>
	Osmophiles (milieu sucré)	<i>Zygosaccharomyces rouxii</i> (levure osmotique)
	Osmotolérantes	<i>Lactobacillus plantarum, Saccharomyces cerevisiae</i>

III.2. Croissance bactérienne

La croissance bactérienne correspond à l'augmentation du nombre de cellules et non à leur taille. Elle se fait principalement par scissiparité (division binaire), mais aussi par bourgeonnement ou fragmentation chez certaines espèces (cyanobactéries, bactéries filamenteuses). Chaque division donne deux cellules filles génétiquement identiques.

III.2.1. Mesure de la croissance bactérienne

La mesure de la croissance bactérienne est essentielle pour comprendre le comportement d'une population microbienne, estimer la viabilité cellulaire, déterminer le rendement d'une culture ou encore évaluer l'efficacité d'un antibiotique. On distingue deux grandes catégories de méthodes :

- **Les méthodes directes** : permettent de compter directement les cellules.
- **Les méthodes indirectes** : évaluent la croissance à partir de paramètres liés (turbidité, biomasse...).

III.2.1.1. Méthodes directes

a. Numération après culture (ou méthode des boîtes de Petri)

Cette méthode consiste à effectuer des dilutions en série d'un échantillon bactérien, puis à ensemencer ces dilutions sur un milieu solide. Après incubation :

- On compte les colonies visibles, chaque colonie représentant une unité formant colonie (UFC), soit une bactérie initiale viable (Figure 6).
- Le résultat s'exprime en UFC/mL.

La méthode est fiable pour compter les bactéries vivantes, mais ne tient pas compte des cellules mortes ni les bactéries viables non cultivables (VBNC).

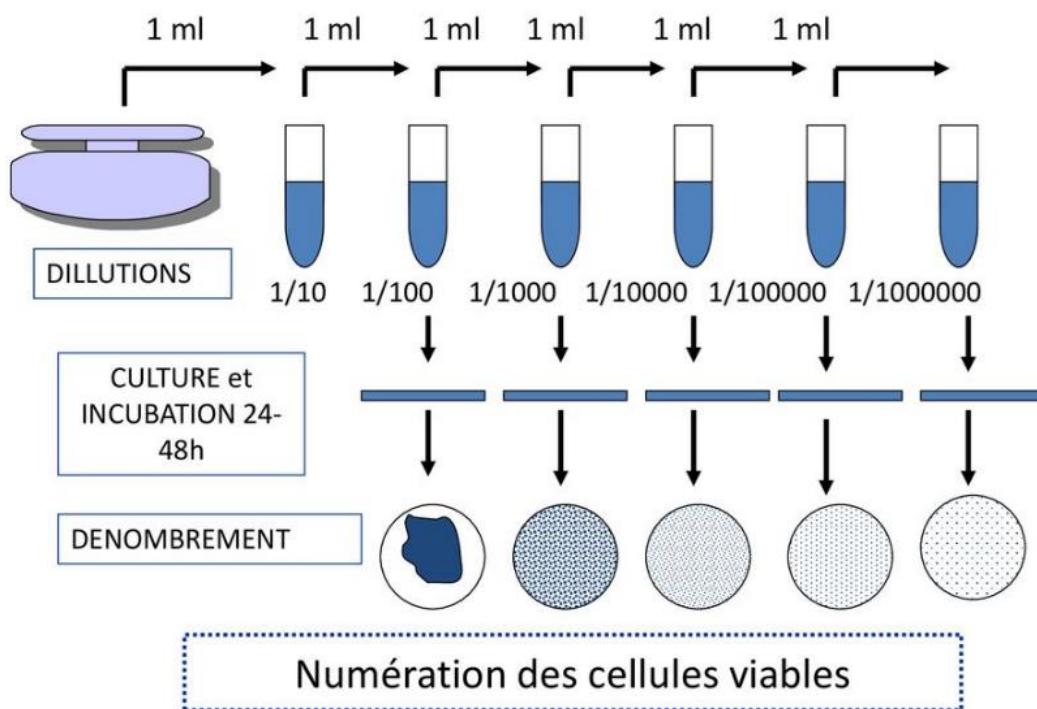


Figure 6. Numération des cellules bactériennes après culture.

b. Comptage microscopique (chambre de Malassez)

Le comptage est effectué sur une lame spéciale quadrillée appelée cellule de Malassez (Figure 7) ou hémocytomètre :

- On place un volume connu de la suspension bactérienne dans la chambre.
- Les cellules sont comptées au microscope dans des carrés définis.
- La concentration est ensuite extrapolée à l'ensemble du volume.

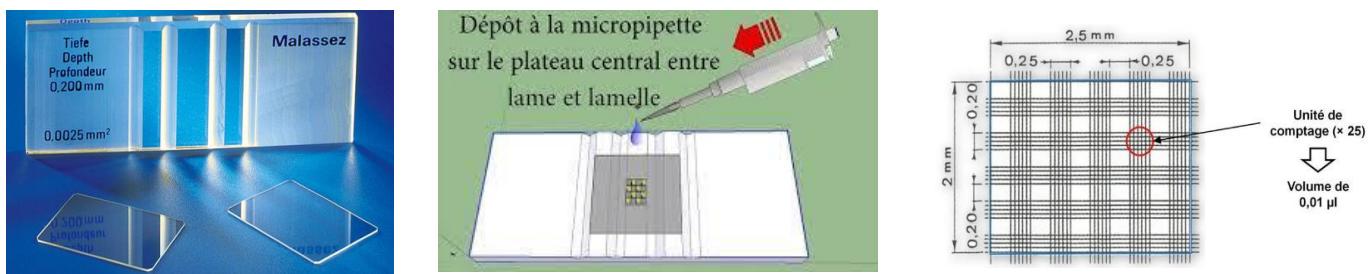


Figure 7. Représentation de la cellule de Malassez avec son quadrillage.

c. Filtration sur membrane

C'est une méthode utilisée pour les échantillons très dilués (eau potable, boissons...), cette méthode consiste à :

- Filtrer un grand volume de liquide à travers une membrane poreuse (0,22 µm).
- Déposer la membrane sur un milieu gélosé.
- Compter les colonies après incubation.

d. Épifluorescence

Technique de microscopie utilisant des colorants fluorescents comme l'orange acridine, qui se fixe à l'ADN :

- Sous lumière UV : les cellules vivantes apparaissent **vertes**, les mortes **rouges**.
- Permet de différencier les cellules viables des non viables.

III.2.1.2. Méthodes indirectes

a. Turbidimétrie (ou densité optique)

La croissance d'une culture liquide provoque un trouble (turbidité) mesurable au spectrophotomètre :

- On mesure l'absorbance à 600 nm (ou 620 nm).
- L'absorbance est proportionnelle à la concentration cellulaire.
- Cette méthode est rapide et non destructive.

b. Mesure de la biomasse

Elle consiste à estimer la masse totale des cellules bactériennes :

- **Poids sec** : récolte, centrifugation, dessiccation, et pesée des cellules. Méthode précise mais longue.
- **Constituants cellulaires** : mesure de la teneur en protéines (méthode de Lowry), acides nucléiques, etc.
- **Consommation de substrat** : diminution d'un nutriment (Glucose).
- **Produits excréts** : acides, dioxyde de carbone, ammoniac...etc, mesurés comme indicateurs de métabolisme.

- **Changements physico-chimiques** : variation de pH, potentiel redox, conductivité.

c. Mesure de l'activité métabolique

Cette méthode repose sur l'évaluation de l'activité biochimique des cellules, en particulier des réactions liées à la viabilité : consommation de substrats, production de métabolites, ou encore activité enzymatique. Ces paramètres sont proportionnels à la densité ou à la vitalité des cellules, et permettent une estimation indirecte de la croissance. Exemple : Mesure de la consommation de substrats nutritifs

Les bactéries consomment des nutriments comme le glucose, les acides aminés ou l'oxygène. La diminution de ces composés dans le milieu, peut être suivi par des méthodes :

- ✓ Enzymatiques (Glucose-oxydase pour le Glucose)
- ✓ Chimiques (colorimétrie, titration)
- ✓ La vitesse de consommation est proportionnelle à la croissance cellulaire. Tel que la baisse de la concentration en glucose mesurée dans un fermenteur au cours d'une culture de *Bacillus subtilis*.

III.2.2 Courbe de croissance

La courbe de croissance bactérienne représente l'évolution du nombre de bactéries dans un milieu de culture fermé en fonction du temps. Elle permet d'illustrer les différentes phases du cycle de croissance d'une population bactérienne, et d'en analyser les paramètres physiologiques. Elle se construit à partir de mesures du nombre de cellules viables ou de la turbidité à intervalles réguliers, et comporte généralement quatre phases caractéristiques (Figure 8).

La courbe de croissance est généralement tracée en échelle semi-logarithmique : le logarithme du nombre de bactéries (ou l'absorbance à 600 nm) en fonction du temps (Figure 8). La courbe de croissance permet de

- ✓ Calculer le temps de génération (durée d'un cycle de division).
- ✓ Optimiser les milieux de culture et les conditions de production (antibiotiques, enzymes, etc.).
- ✓ Être utilisée pour évaluer l'efficacité des agents antimicrobiens.
- ✓ Donner une base pour modéliser la croissance dans les milieux naturels ou industriels.

III.2.2.1. Phase de latence

Durant cette phase, les bactéries ne se divisent pas encore activement. Elles s'adaptent aux nouvelles conditions du milieu (température, pH, composition chimique) et amorcent la synthèse des enzymes nécessaires à leur croissance. La durée de cette phase dépend :

- ✓ L'état physiologique initial des cellules (vieilles ou jeunes),
- ✓ La composition du nouveau milieu,
- ✓ Le passage d'un milieu riche à un milieu pauvre ou inversement.

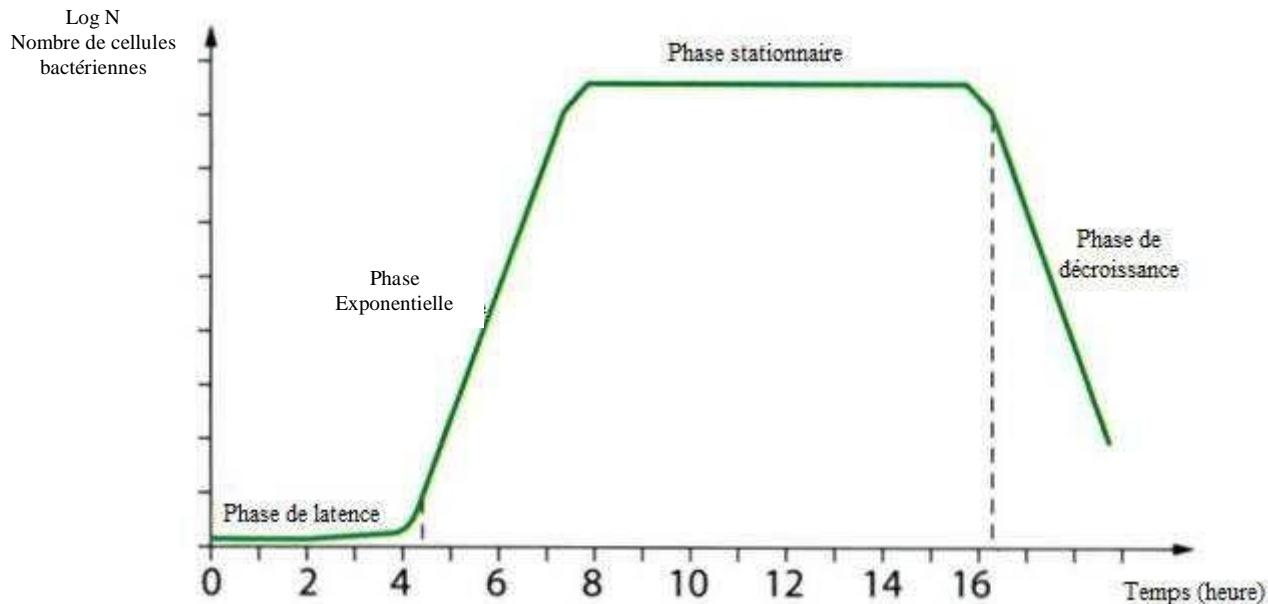


Figure 8. Courbe de croissance bactérienne.

III.2.2.2. Phase exponentielle

Il s'agit de la phase de croissance active où les bactéries se divisent à un rythme constant et maximal. Le nombre de cellules double à chaque génération, selon une progression exponentielle. La formule mathématique de la croissance est :

$$N_t = N_0 \times 2^n$$

où :

N_t est le nombre de cellules au temps t ,

N_0 est le nombre de cellules initial,

n est le nombre de générations.

Le temps de génération n (ou temps de doublement) est la durée nécessaire à une cellule bactérienne pour se diviser et former deux cellules filles. Il dépend de l'espèce bactérienne ainsi que des conditions de culture

- *Escherichia coli* en milieu optimal (37 °C, en bouillon nutritif riche) : temps de génération ≈ 20 minutes

➤ Certaines bactéries environnementales ou pathogènes (*Mycobacterium tuberculosis*):
temps de génération \approx plusieurs heures

Cette phase est idéale pour les études de physiologie, de métabolisme, ainsi que pour la production industrielle de biomasse ou de métabolites toutefois les conditions doivent être optimales pour éviter tout facteur limitant.

III.2.2.3. Phase stationnaire

La croissance ralentit puis s'arrête : le taux de division est compensé par le taux de mortalité. Cette stagnation résulte de :

- ✓ L'épuisement des nutriments,
- ✓ L'accumulation de déchets toxiques,
- ✓ La baisse du pH,
- ✓ Le manque d'oxygène (dans les cultures non agitées).

Pendant cette phase, certaines bactéries activent des mécanismes de survie comme la sporulation, la production de pigments ou de toxines.

III.2.2.4. Phase de déclin (ou phase de mort)

Le nombre de cellules viables diminue car la mort cellulaire dépasse la division. Cette phase peut être plus ou moins longue selon les conditions de culture. La lyse cellulaire et la dégradation de l'ADN peuvent être observées.

IV. Rôle des micro-organismes dans le cycle des bioéléments

Les micro-organismes jouent un rôle central dans le fonctionnement des écosystèmes. Ils sont les principaux agents de la décomposition, de la minéralisation et du recyclage des éléments nutritifs essentiels tels que le carbone, l'azote, le soufre, le phosphore, etc. Par leur activité métabolique, ils assurent la continuité des cycles biogéochimiques, contribuant ainsi à la fertilité des sols, à l'épuration des eaux et à l'équilibre atmosphérique.

IV.1. Caractéristiques des écosystèmes microbiens

Les écosystèmes microbiens se distinguent par leur complexité, leur diversité métabolique, et leur rôle dans la stabilité des milieux naturels. Ce sont des systèmes dynamiques complexes, composés de communautés microbiennes en interaction avec leur environnement abiotique.

Un écosystème microbien est un ensemble d'organismes microbiens interagissant entre eux et avec leur environnement abiotique (température, pH, humidité, sels minéraux, oxygène, etc.) dans un espace donné (couche superficielle du sol, intestin humain, lac salé, source hydrothermale, biofilm sur une surface humide).

IV.1.1. Omniprésence et ubiquité

Les micro-organismes sont omniprésents et ubiquistes, c'est-à-dire, ils colonisent pratiquement tous les milieux de la planète, qu'ils soient favorables ou extrêmes. Cette large distribution est rendue possible grâce à leur :

- ✓ **Taille microscopique** qui facilite leur dispersion par l'air, l'eau, les animaux, et même par les courants océaniques ou atmosphériques.
- ✓ **Diversité métabolique** qui permet l'utilisation d'une grande variété de sources d'énergie et de nutriments (matière organique, minéraux, lumière, composés chimiques).
- ✓ **Capacité d'adaptation génétique** par mutations, transferts horizontaux de gènes, formation de spores ou de kystes qui résistent aux conditions défavorables.

IV.1.2. Rôle central dans les cycles biogéochimiques

Les micro-organismes sont les principaux moteurs des cycles du carbone, d'azote, du soufre et du phosphore, etc. Ils participent activement à la transformation de la matière organique et à la régénération des nutriments.

Les bactéries nitrifiantes comme *Nitrosomonas* transforment l'ammonium en nitrites, jouant un rôle fondamental dans le cycle de l'azote dans les sols agricoles.

IV.I.3. Organisation en communautés

Les micro-organismes forment des communautés structurées et interconnectées. Ces communautés peuvent être libres, sessiles (biofilms) ou associées à des hôtes (plantes, animaux, autres microbes). Dans les rhizosphères (zone autour des racines), les bactéries forment des biofilms coopératifs qui facilitent l'absorption des nutriments par les plantes (*Pseudomonas fluorescens*).

IV.I.4. Réactivité et résilience

Les communautés microbiennes réagissent rapidement aux variations environnementales (température, pH, humidité, nutriments) et possèdent une grande résilience écologique, favorisant la stabilité des écosystèmes.

Après une pollution pétrolière, certaines bactéries hydrocarbonées (*Alcanivorax borkumensis*) se multiplient rapidement pour biodégrader les hydrocarbures, contribuant à la dépollution naturelle.

IV.I.5. Interactions multiples

Les microbiotes, ensembles de micro-organismes coexistant dans un même environnement (sol, intestin, plante, eau, etc.) interagissent de manière complexe, influençant la santé et la stabilité de leur écosystème. Ces interactions peuvent être synergiques, neutres ou antagonistes, et elles déterminent la composition, la fonction et l'évolution des communautés microbiennes. Les relations dans les écosystèmes microbiens incluent la compétition, la coopération, la symbiose, le parasitisme ou la prédation microbienne.

a) Compétition

Les micro-organismes se disputent les mêmes ressources (nutriments, espace, oxygène). Cette compétition conduit à une sélection naturelle des espèces les plus adaptées. Par exemple, dans le sol, *Pseudomonas* et *Bacillus* rivalisent pour les sources de carbone disponibles.

b) Coopération (mutualisme et commensalisme)

Certains micro-organismes coopèrent pour améliorer leur survie.

- Dans le **mutualisme**, les deux partenaires tirent bénéfice de l'association. Par exemple, les bactéries fixatrices d'azote du genre *Rhizobium* vivent en symbiose avec les légumineuses : elles fournissent de l'azote assimilable à la plante et reçoivent des sucres en retour.
- Dans le **commensalisme**, un microbe profite de l'autre sans lui nuire, comme certaines bactéries intestinales qui se nourrissent des métabolites produits par d'autres espèces.

c) Amensalisme et antibiose

Un micro-organisme inhibe ou détruit un autre sans en tirer de bénéfice direct. C'est le cas de la production d'antibiotiques naturels par *Penicillium* ou *Streptomyces*, qui limitent la croissance de bactéries concurrentes.

d) Parasitisme et prédation microbienne

Certains microbes exploitent ou détruisent activement d'autres micro-organismes. Par exemple, *Bdellovibrio bacteriovorus* pénètre dans les bactéries Gram négatives pour s'y multiplier, tandis que certains virus bactériophages parasitent les bactéries pour se répliquer.

e) Synergie et structuration du microbiote

Les interactions positives favorisent la formation de biofilms stables où plusieurs espèces coexistent et se complètent. Ces structures permettent une meilleure résistance aux stress environnementaux et renforcent la fonctionnalité globale du microbiote.

IV.2. Microbiologie du sol

Le sol est un réservoir biologique majeur hébergeant jusqu'à 10^{10} cellules/g de sol sec. C'est un écosystème complexe et dynamique, habité par une diversité de micro-organismes essentiels au fonctionnement des cycles biogéochimiques, à la fertilité du sol et à la décomposition de la matière organique.

IV.2.1. Composition microbienne du sol

Le sol est un habitat extrêmement riche et diversifié, abritant plusieurs milliards de micro-organismes par gramme. Ces êtres microscopiques constituent la biomasse vivante la plus abondante du sol. On distingue plusieurs grands groupes microbiens, chacun avec des caractéristiques morphologiques, métaboliques et écologiques particulières (Tableau VI).

IV.2.2. Rôle des micro-organismes du sol dans les cycles biogéochimiques

Les micro-organismes du sol jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Ils forment un véritable moteur biologique de l'écosystème terrestre. Ils interviennent dans la transformation de la matière, le recyclage des nutriments, la fertilité du sol, la santé des plantes, et bien plus encore. Ils participent activement aux grands cycles biogéochimiques, notamment ceux d'azote, du carbone, du soufre et du phosphore (Tableau VI).

Tableau VI. Microorganisme du sol, caractéristiques et rôles.

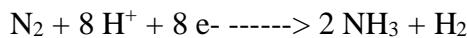
Groupe microbien	Caractéristiques principales	Rôles dans le sol	Exemples
Bactéries	-Prokaryotes - Taille: 0,5 à 5 µm Métabolisme varié (aérobiose/anaérobiose)	Dégradation de la matière organique Cycles N, C, S Production de métabolites secondaires	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Rhizobium leguminosarum</i>
Actinobactéries	Bactéries filamenteuses Gram + Spores résistantes	Dégradation de composés complexes Production d'antibiotiques	<i>Streptomyces spp.</i>
Champignons	Eucaryotes filamenteux ou levuri-formes Paroi en chitine	Décomposition de la lignine et cellulose Mycorhizes (symbiose avec racines) Pathogènes	<i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Glomus</i> , <i>Fusarium</i>
Algues / Cyanobactéries	Photosynthétiques – Eucaryotes (algues) / Prokaryotes (cyanobactéries)	Fixation de l'azote (cyanobactéries) Production d'oxygène Formation de croûtes biologiques	<i>Nostoc</i> , <i>Anabaena</i> , <i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i>
Protozoaires	Eucaryotes unicellulaires Mobiles (flagelles, cils, pseudopodes)	Régulation des bactéries (prédateurs) Libération de nutriments assimilables	<i>Amoeba</i> , <i>Paramecium</i> , <i>Rhynchomonas</i>
Nématodes	Vers ronds microscopiques Vivent dans les pores du sol	Consommation de bactéries et champignons Recyclage des nutriments	<i>Caenorhabditis elegans</i> , <i>Meloidogyne spp.</i>
Virus (bactériophages et autres)	Acellulaires, très petits (20–200 nm) Infectent bactéries, champignons ou protozoaires	Régulent les populations microbiennes (lyse) Transfert horizontal de gènes (via transduction)	<i>Bactériophages</i> , <i>Mycovirus</i> , <i>Giant viruses</i>

IV.2.2.1. Cycle de l'azote

Le cycle de l'azote décrit la transformation continue de l'azote entre ses formes gazeuses, minérales et organiques. Les micro-organismes jouent un rôle essentiel dans toutes les étapes de ce cycle.

a) Fixation de l'azote atmosphérique

L'azote moléculaire (N_2) de l'atmosphère est biologiquement inerte. Certaines bactéries (*Rhizobium*, *Azotobacter*) capables de le réduire en ammonium (NH_4^+) rendent cet élément assimilable par les plantes.

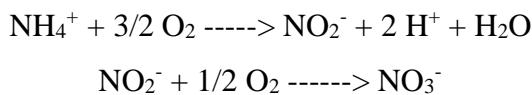


b) Ammonification (ou minéralisation)

Les bactéries décomposeuses et les champignons transforment l'azote organique (acides aminés, protéines) en ammoniac (NH_3) ou ammonium (NH_4^+). C'est une étape clé du recyclage de la matière organique dans le sol.

c) Nitrification

Les bactéries nitrifiantes (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*) oxydent l'ammonium présent dans le sol en nitrate.



Les nitrates ainsi produits constituent la forme la plus assimilable par les plantes. Les plantes absorbent le nitrate (NO_3^-) ou l'ammonium (NH_4^+) pour synthétiser leurs acides aminés et protéines.

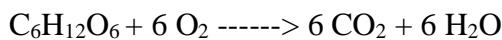
e) Dénitritification

Les bactéries dénitritifiantes (*Pseudomonas*, *Paracoccus*) transforment les nitrates en diazote (N_2) ou protoxyde d'azote (N_2O) en conditions anaérobies.

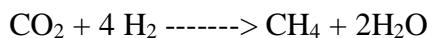


VI.2.2.2. Cycle du carbone (C)

Dans le sol, les bactéries hétérotrophes (*Bacillus*, *Pseudomonas*) et les champignons décomposent la matière organique, libérant du CO_2 par respiration.

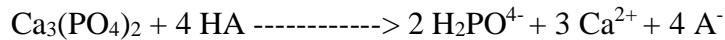


En zones anaérobies du sol (sols saturés, couches profondes), des archées méthanogènes (*Methanobacterium*, *Methanosarcina*) produisent du CH_4 .

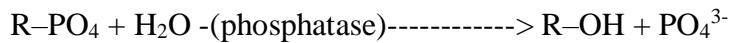


IV.2.2.3. Cycle du phosphore (P)

Le phosphore minéral insoluble ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, FePO_4 , AlPO_4) est solubilisé par des bactéries (*Bacillus megaterium*, *Pseudomonas fluorescens*) produisant des acides organiques.

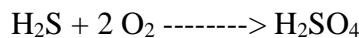


Les bactéries productrices de phosphatases et les champignons mycorhiziens libèrent le phosphate des composés organiques.

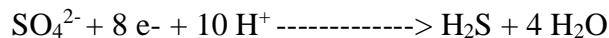


IV.2.2.4. Cycle du soufre (S)

En sol oxygéné, les bactéries sulfuro-oxydantes (*Thiobacillus*, *Acidithiobacillus*) transforment le soufre élémentaire (S_0) ou le H_2S en sulfate.



En sol anaérobiose, les bactéries sulfato-réductrices (*Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*) réduisent les sulfates en H_2S .



IV.3. Microbiologie des milieux aquatiques

Les milieux aquatiques regroupent une grande diversité d'environnements, allant des eaux douces (lacs, rivières, nappes phréatiques) aux milieux marins, en passant par les eaux usées et les zones humides. Ces milieux sont habités par une vaste communauté de micro-organismes, qui jouent des rôles écologiques majeurs. Les micro-organismes aquatiques peuvent être libres dans la colonne d'eau (planctoniques), fixés au fond (benthiques), ou organisés en biofilms sur les surfaces solides. Ils colonisent aussi bien des milieux modérés que des environnements extrêmes, comme les sources hydrothermales.

IV.3.1. Composition microbienne des milieux aquatiques

Dans les milieux aquatiques, on distingue plusieurs types de micro-organismes selon leur mode de vie et leur localisation (Tableau VII)

IV.3.2. Rôles des micro-organismes aquatiques dans les cycles biogéochimiques

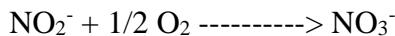
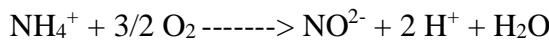
Les micro-organismes aquatiques sont des acteurs majeurs du recyclage des éléments nutritifs, notamment le carbone, l'azote, le phosphore et le soufre (Figure 9). De plus ils jouent un rôle fondamental dans les processus naturels de purification de l'eau, également appelés autoépuration. Grâce à leurs capacités métaboliques, ils dégradent les matières organiques, y compris les excréments, les déchets végétaux ou les hydrocarbures (Tableau VII).

Tableau VII. Microorganismes aquatiques, localisation, rôle et exemples.

Type	Localisation	Exemples	Fonctions principales
Planctoniques	En suspension dans la colonne d'eau	<i>Cyanobactéries, Chlorella, Paramecium, Vibrio</i>	Photosynthèse (producteurs primaires), consommation de bactéries, recyclage de matière organique
Benthiques	Dans les sédiments ou fixés sur substrats	<i>Desulfovibrio, Bacillus, Clostridium</i>	Dégradation de la matière organique, fermentation, cycles de l'azote et du soufre
Biofilm	Fixés sur des surfaces solides (roches, plantes, canalisations)	<i>Pseudomonas, Leptothrix</i>	Dégradation des polluants, protection microbienne, transformation des nutriments
Extrémophiles	Milieux extrêmes (sources hydrothermales, zones salines)	<i>Thermococcus, Halobacterium</i>	Chimiolithotrophie, participation aux cycles profonds du soufre et du carbone
Zooplancton microbien	Colonne d'eau (prédateurs de bactéries)	<i>Amoeba, Didinium</i>	Contrôle des populations bactériennes, transfert d'énergie dans la chaîne trophique

IV.3.2.1. Cycle d'azote

Les bactéries nitrifiantes (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*) oxydent l'ammonium en nitrite puis en nitrate dans les zones oxygénées.



Dans les zones profondes (milieu anaérobie), les bactéries dénitritifiantes (*Pseudomonas*, *Paracoccus*) réduisent les nitrates en azote gazeux.

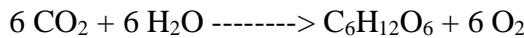


Les cyanobactéries fixatrices (*Anabaena*, *Aphanizomenon*) transforment le diazote dissous en ammonium.

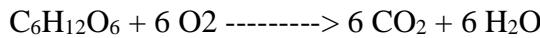


IV.3.2.2. Cycle du carbone

Dans les milieux aquatiques, les microalgues et cyanobactéries (*Microcystis*, *Anabaena*) fixent le CO₂ par photosynthèse, fournissant la matière organique de base.



Les bactéries hétérotrophes (*Pseudomonas*, *Vibrio*) dégradent cette matière par respiration.

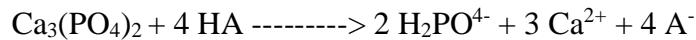


En zones anaérobies, des archées méthanogènes (*Methanobacterium*, *Methanosarcina*) produisent du CH₄.



IV.3.2.3. Cycle du phosphore

Le phosphore minéral insoluble (Ca₃(PO₄)₂) dans les sédiments est solubilisé par des bactéries (*Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus megaterium*) grâce à des acides organiques.

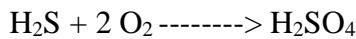


Les cyanobactéries (*Nostoc*, *Oscillatoria*) et autres bactéries hétérotrophes libèrent du phosphate à partir de composés organiques par action enzymatique.

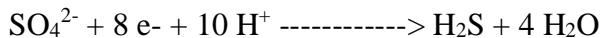


IV.3.2.4. Cycle du soufre

En milieu oxygéné, les bactéries sulfuro-oxydantes (*Thiobacillus*, *Beggiatoa*) transforment les sulfures ou le soufre élémentaire en acide sulfurique, libérant des sulfates.



En conditions anaérobies, les bactéries sulfato-réductrices (*Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*) transforment les sulfates en sulfures.



IV.4. Microbiologie de l'air

L'air constitue un milieu de transit pour les micro-organismes, bien qu'il ne représente pas un véritable habitat permanent pour eux. En comparaison avec les sols ou les milieux aquatiques, la concentration microbienne dans l'atmosphère est généralement beaucoup plus faible. Les micro-organismes y sont transportés sous forme de bioaérosols, c'est-à-dire de fines particules biologiques en suspension, pouvant contenir des cellules vivantes (bactéries, spores, virus) ou des fragments de ces cellules. Leur présence dans l'air varie selon les saisons, les conditions climatiques, la localisation géographique et l'activité humaine.

IV.4.1. Composition microbienne de l'atmosphériques

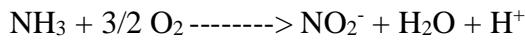
Les bioaérosols contiennent une grande diversité microbienne. Parmi les plus fréquents, on retrouve les spores fongiques, les bactéries, les virus...etc (Tableau VIII).

IV.4.2. Rôles micro-organismes de l'air dans les cycles biogéochimiques

Les micro-organismes présents dans l'air, bien que moins abondants que dans le sol ou l'eau, jouent un rôle non négligeable dans les cycles des bioéléments (Tableau VIII, Figure 9).

IV.4.2.1. Cycle d'azote

Dans l'atmosphère, certaines bactéries présentes dans les nuages (*Pseudomonas syringae*, *Methylobacterium*) peuvent oxyder l'ammoniac volatil (NH_3) en oxydes d'azote.

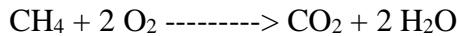


D'autres micro-organismes atmosphériques peuvent réduire des oxydes d'azote (NO_x) en diazote (N_2) dans des micro-environnements pauvres en oxygène.



IV.4.2.2. Cycle de carbone

Certaines bactéries méthanotrophes présentes dans les bioaérosols (*Methylococcus*, *Methylosinus*) oxydent le méthane présent dans l'air pour le transformer en dioxyde de carbone.



Des bactéries hétérotrophes présentes dans les microgouttelettes d'eau atmosphériques peuvent également oxyder des composés organiques volatils (COV) en CO_2 .

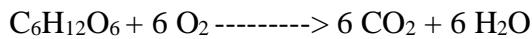
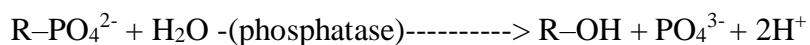


Tableau VIII. Microorganismes de l'air, origine, rôle et impact.

Micro-organisme	Exemples	Origines principales	Rôles / Impact
Spores fongiques	<i>Cladosporium, Alternaria, Aspergillus</i>	Sols, végétation, bois en décomposition	Allergènes, agents de biodégradation, propagation par le vent
Bactéries	<i>Micrococcus, Bacillus, Staphylococcus</i>	Sols, poussières, animaux, peau humaine, activités humaines	Dégénération organique, pathogènes opportunistes, surveillance de la qualité de l'air
Virus	<i>Influenza, Rhinovirus, Coronavirus</i>	Sécrétions respiratoires, aérosols humains	Agents de maladies respiratoires, épidémies, transmission par gouttelettes
Actinomycètes	<i>Streptomyces, Micromonospora</i>	Sols secs, poussières, végétation	Odeurs de terre (géosmine), allergènes, dégradation de matière organique
Archées (rares)	<i>Halococcus</i> (rare dans l'air)	Aérosols marins salins (très spécifiques)	Rôle peu connu, rareté dans les aérosols
Autres particules biologiques	Pollen, fragments de mycélium, toxines	Plantes, moisissures, industries agroalimentaires	Allergènes, toxines (mycotoxines), impact sanitaire

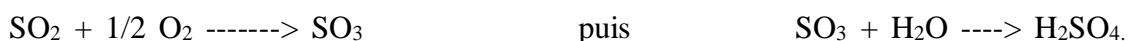
IV.4.2.3. Cycle du phosphore

Le phosphore dans l'air est surtout associé à des particules ou poussières. Certaines bactéries présentes dans les aérosols (*Bacillus, Streptomyces*) peuvent libérer du phosphate à partir de composés organiques adsorbés sur ces particules.



IV.4.2.4. Cycle de soufre

Certaines bactéries sulfuro-oxydantes présentes dans les nuages ou bioaérosols (*Thiobacillus, Acidithiobacillus*) peuvent oxyder le sulfure d'hydrogène (H_2S) volatil en dioxyde de soufre (SO_2), puis en acide sulfurique. $2H_2S + 3O_2 \rightarrow 2SO_2 + 2H_2O$



V. Microbiologie de l'air, des eaux domestiques et des eaux usées

La microbiologie de l'environnement étudie les micro-organismes qui colonisent ou traversent différents milieux, qu'ils soient naturels ou influencés par l'activité humaine. Parmi ces milieux, l'air, les eaux domestiques et les eaux usées occupent une place importante, car ils abritent une diversité microbienne significative et jouent un rôle majeur dans les questions de santé publique, de qualité environnementale et de traitement sanitaire. Connaître l'origine, la nature et les fonctions de ces micro-organismes permet d'adopter des stratégies efficaces de contrôle et de prévention.

V.1. Microbiologie de l'air

V.1.1. Nature et caractéristiques de l'air atmosphérique

L'air n'est pas un habitat stable pour les micro-organismes, mais un milieu de transit. Les bactéries, virus, champignons et spores qui s'y trouvent proviennent principalement du sol, de l'eau ou des activités humaines et animales.

Par exemple, *Bacillus subtilis* et *Streptomyces spp.* Peuvent être projetés dans l'atmosphère lors d'épisodes venteux, tandis que des bactéries marines comme *Pseudomonas spp.* se retrouvent dans les embruns (Poussière de gouttelettes formée par les vagues qui se brisent, et emportée par le vent).

Les activités agricoles, industrielles ou hospitalières peuvent aussi libérer des agents pathogènes tels que *Staphylococcus aureus* ou *Mycobacterium tuberculosis*.

V.1.2. Origine des micro-organismes de l'air

L'air atmosphérique, bien qu'il ne constitue pas un habitat permanent, héberge une diversité notable de micro-organismes provenant de sources variées (Figure 9, Tableau IX).

V.1.2.1. Sources naturelles : comprennent principalement le sol, dont l'érosion et l'action du vent soulèvent des particules contaminées, et l'eau, où les vagues et les embruns diffusent des micro-organismes marins. Ces milieux libèrent dans l'air différentes espèces bactériennes telles que *Bacillus*, *Mycobacterium* et *Pseudomonas*, mais aussi des champignons filamenteux comme *Aspergillus fumigatus*, *Penicillium spp.* et *Cladosporium spp.*. Des spores fongiques et bactériennes, formes de résistance capables de survivre dans des conditions défavorables, ainsi que des actinomycètes tels que *Streptomyces griseus*, peuvent également être présents.

V.1.2.2. Sources anthropiques : incluent les émissions issues des systèmes de ventilation, de l'incinération, des activités agricoles ou des pratiques médicales. Ces activités peuvent libérer dans l'atmosphère des bactéries pathogènes et des virus respiratoires, notamment les virus grippaux, les adénovirus et les coronavirus, qui se transmettent facilement par les aérosols.

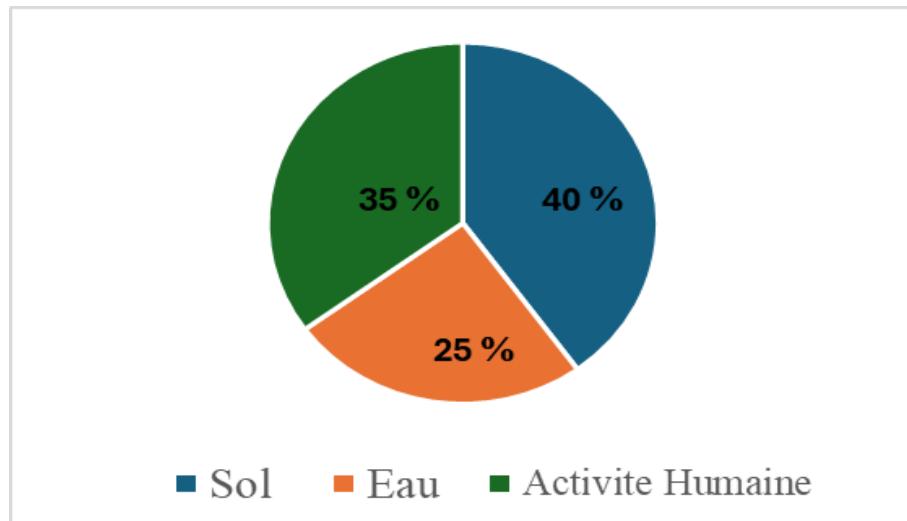


Figure 9. Origine des microorganismes de l'air.

Ces micro-organismes, qu'ils soient d'origine naturelle ou humaine, jouent des rôles multiples. Sur le plan sanitaire, certains sont responsables d'infections respiratoires, d'allergies ou d'autres maladies. Sur le plan écologique, plusieurs espèces participent aux cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et du soufre. Enfin, certaines bactéries nucléatrices de glace, comme *Pseudomonas syringae*, influencent le climat en contribuant à la formation des nuages et des précipitations.

Tableau IX. Sources des microorganismes de l'air.

Type de source	Origine	Micro-organismes présents	Rôles principaux
Sources naturelles	Sol : érosion, vent Eau : vagues, embruns marins	Bactéries : <i>Bacillus</i> , <i>Mycobacterium</i> , <i>Pseudomonas</i> Champignons : <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Penicillium spp.</i> , <i>Cladosporium spp.</i> Spores bactériennes et fongiques Actinomycètes : <i>Streptomyces griseus</i>	Sanitaire : agents pathogènes et allergènes Écologique : cycles du C, N, S Climatique : formation des nuages (<i>Pseudomonas syringae</i>)
Sources anthropiques	Émissions de systèmes de ventilation, incinération, agriculture, Pratiques médicales	Bactéries pathogènes diverses Virus respiratoires : virus grippaux, adénovirus, coronavirus	Sanitaire : maladies respiratoires, épidémies Écologique : dispersion de micro-organismes liés aux activités humaines

V.1.3. Traitement de l'air contaminé

Le traitement de l'air contaminé par des micro-organismes repose sur plusieurs méthodes complémentaires.

- ✓ La filtration mécanique, notamment avec des filtres HEPA (High Efficiency Particulate Air), permet de retenir efficacement les particules contenant des bactéries, des virus et des spores.
- ✓ La ventilation contrôlée assure un renouvellement constant de l'air et réduit la concentration microbienne.
- ✓ L'irradiation UV est utilisée pour inactiver les micro-organismes en endommageant leur matériel génétique.
- ✓ La réduction des émissions de poussières et l'entretien régulier des systèmes de ventilation sont essentiels pour limiter la prolifération microbienne.

V.2. Microbiologie des eaux domestiques

Les eaux domestiques désignent les eaux utilisées dans les foyers humains pour la boisson, la cuisine, le lavage, etc. Elles sont généralement potables et doivent répondre à des normes microbiologiques strictes.

V.2.1. Nature et caractéristiques des eaux domestiques

Les eaux domestiques regroupent toutes les eaux utilisées dans un cadre ménager pour la boisson, la cuisine, le lavage et l'hygiène. Elles sont généralement potables et doivent respecter des normes microbiologiques strictes afin de préserver la santé publique. Toutefois, elles peuvent être contaminées par différents micro-organismes à divers stades, depuis la source jusqu'à leur consommation.

Exemple, *Escherichia coli* peut être présent dans une eau de source contaminée par des matières fécales, tandis que *Legionella pneumophila* peut se développer dans des systèmes de distribution ou des réservoirs mal entretenus.

V.2.2. Origine des micro-organismes des eaux domestiques

L'eau domestique, destinée à un usage ménager et souvent à la consommation humaine, doit répondre à des normes microbiologiques strictes. Toutefois, elle peut être contaminée à différentes étapes de son parcours, depuis la captation jusqu'à la distribution.

V.2.2.1. À la source : la contamination survient lorsque les eaux de surface (rivières, lacs) ou souterraines (nappes phréatiques) reçoivent des apports microbiens d'origine fécale, humaine ou animale. Les agents les plus fréquents sont des bactéries entériques comme *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* et *Shigella dysenteriae*, ainsi que des protozoaires tels que *Giardia lamblia* et *Cryptosporidium parvum*.

V.2.2.2. Au cours du transport, le réseau de distribution peut devenir un réservoir microbien. Les canalisations anciennes ou endommagées favorisent la formation de biofilms où prolifèrent des bactéries opportunistes telles que *Legionella pneumophila* ou *Pseudomonas aeruginosa*.

V.2.2.3. Lors du stockage ou de l'utilisation domestique, l'eau peut subir une recontamination si elle est conservée dans des réservoirs mal entretenus ou manipulée de manière inappropriée. Les virus entériques, comme le norovirus et le rotavirus, peuvent également être introduits à cette étape.

V.2.3. Traitement des eaux domestiques

L'eau domestique destinée à la consommation humaine subit un traitement rigoureux afin d'éliminer tout risque microbiologique.

La première étape est généralement la filtration, qui permet de retenir les particules et certains micro-organismes. Ensuite, la désinfection par chloration, ozonation ou irradiation UV assure l'inactivation des bactéries, virus et parasites pathogènes. Dans certains cas, une ultrafiltration ou une microfiltration membranaire est utilisée pour éliminer les protozoaires résistants comme *Cryptosporidium* et *Giardia*.

L'entretien régulier des réseaux de distribution est également indispensable pour prévenir la formation de biofilms et la recontamination de l'eau.

V.3. Microbiologie des eaux usées

Les eaux usées regroupent différents types d'effluents, notamment les eaux ménagères provenant des cuisines, salles de bains et buanderies, les eaux noires issues des toilettes, les eaux industrielles et les eaux de ruissellement urbain. Elles sont riches en matières organiques, nutriments, agents chimiques et micro-organismes pathogènes.

Ces effluents constituent un environnement favorable au développement et à la survie de nombreux agents infectieux, dont certains présentent un fort risque pour la santé publique, comme *Vibrio cholerae* ou le virus de l'hépatite A.

V.3.2. Origine des micro-organismes des eaux usées

Les eaux usées constituent un mélange d'effluents domestiques, industriels et urbains, présentant une forte charge organique et microbienne. Leur composition microbienne reflète directement les activités humaines et animales qui y contribuent.

V.3.2.1. Origine principale: est la charge fécale issue des déjections humaines et animales. Elle introduit des bactéries entériques telles que *Escherichia coli*, *Enterococcus*

faecalis et *Clostridium perfringens*, ainsi que des protozoaires (*Entamoeba histolytica*) et des helminthes (*Ascaris lumbricoides*).

V.3.2.2. Apports secondaires: proviennent d'activités industrielles, agricoles ou urbaines. Les effluents industriels peuvent contenir des bactéries opportunistes résistantes aux antibiotiques, comme *Pseudomonas aeruginosa* et *Klebsiella pneumoniae*. Les eaux de ruissellement urbain, quant à elles, peuvent véhiculer divers pathogènes, notamment des virus entériques (adénovirus, rotavirus) et des spores bactériennes.

V.3.3. Traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées se déroule en plusieurs étapes (Figure 10).

- ✓ **Traitement primaire** consiste en une décantation physique qui sépare les solides en suspension.
- ✓ **Traitement secondaire** repose sur l'action biologique de micro-organismes dans des systèmes de boues activées, des biofiltres ou des lagunes, afin de dégrader la matière organique.
- ✓ **Traitement tertiaire** a pour objectif la désinfection finale de l'eau par chloration, UV ou ozone, et parfois l'élimination des nutriments excédentaires. Dans certaines stations, les boues issues du traitement subissent une digestion anaérobique qui permet de produire du biogaz, valorisé comme source d'énergie. Ces procédés garantissent la réduction de la charge microbienne avant le rejet dans l'environnement ou la réutilisation de l'eau traitée.

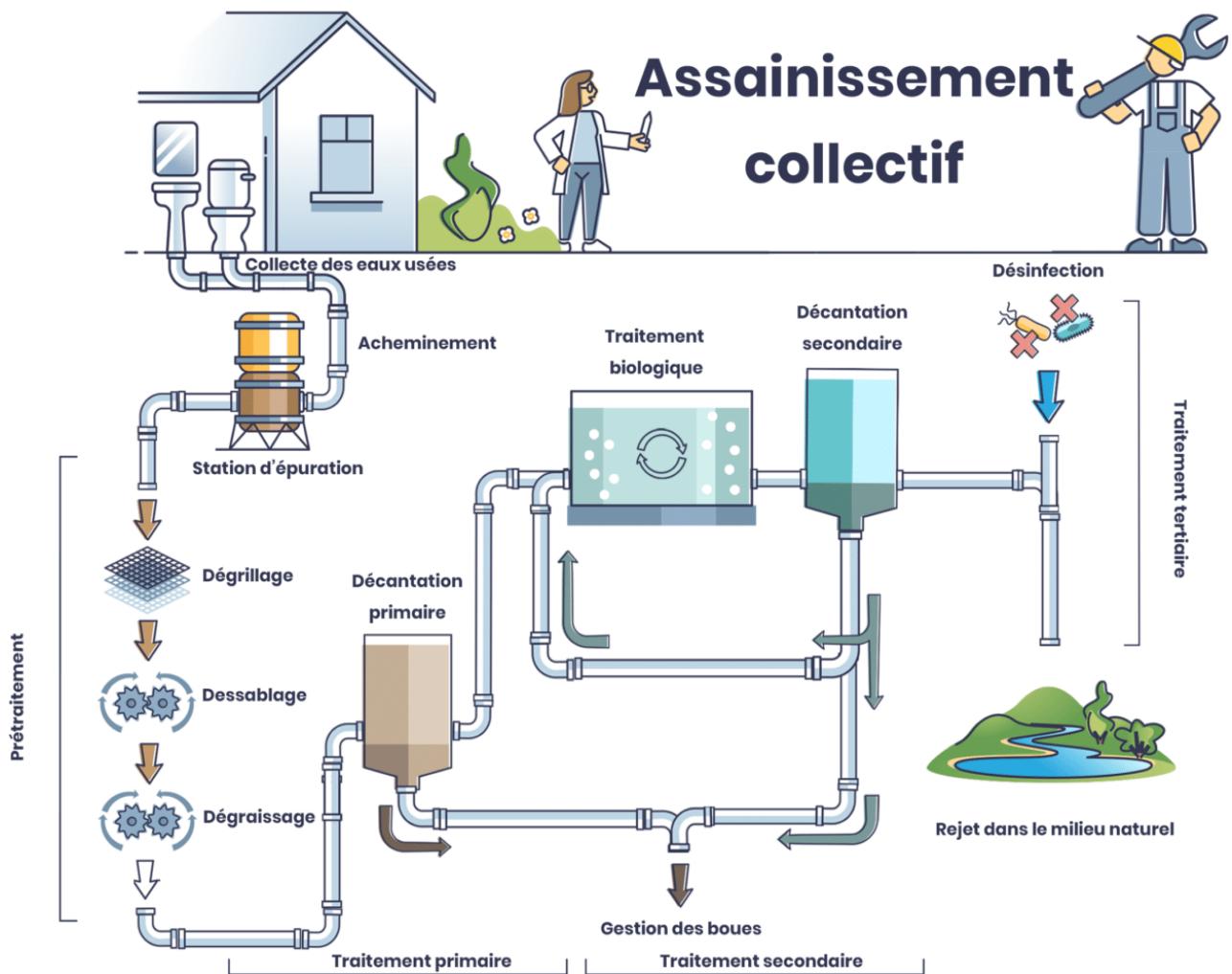


Figure 10: Etapes de traitement des eaux usées.

Deuxième Partie

I. Introduction à la biochimie

La biochimie est une branche de la science qui étudie la composition chimique des êtres vivants et les processus chimiques associés à la vie. Située à l'intersection de la biologie et de la chimie, elle explore les bases moléculaires des fonctions cellulaires et des interactions au sein des systèmes vivants. Elle s'intéresse aux molécules biologiques (protéines, glucides, lipides, acides nucléiques) et à leurs rôles, aux réactions biochimiques qui se déroulent dans les cellules et les organismes, ainsi qu'aux mécanismes régulateurs qui assurent le bon fonctionnement des processus biologiques.

La biochimie environnementale, quant à elle, applique ces connaissances à l'étude des interactions entre les organismes et leur milieu, en analysant les cycles biogéochimiques (carbone, azote, phosphore, soufre, etc.) et la transformation des composés organiques et inorganiques. Elle permet de comprendre comment les processus biochimiques influencent et régulent l'équilibre des écosystèmes, en particulier à travers la dégradation naturelle ou microbienne des polluants. Cette discipline joue un rôle clé dans la bioremédiation, la dépollution des sols et des eaux, la gestion des déchets et l'évaluation de l'impact environnemental des activités humaines.

I.1. Constituants moléculaires de la cellule

Les constituants moléculaires de la cellule, qui forment les bases de la vie, se divisent en quatre grandes catégories : eau, les glucides, les lipides, les protéines et les acides nucléiques.

I.1.1. Eau

L'eau constitue entre 70 et 80 % de la masse cellulaire et joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de la cellule :

- ✓ Solvant universel, permettant aux réactions biochimiques de se dérouler efficacement,
- ✓ Participe au maintien de la forme cellulaire grâce à la pression osmotique.
- ✓ Assure le transport des nutriments, des molécules et des déchets métaboliques, facilitant ainsi les échanges indispensables à la survie et à l'activité cellulaire.

I.1.2. Glucides (sucres)

Les glucides fournissent de l'énergie rapide et jouent un rôle structurel dans certaines cellules. Constitués de : monosaccharides (glucose, fructose), oligosaccharides et polysaccharides (amidon, glycogène, cellulose chez les végétaux) (Figure 11), et qui sont utilisés comme :

- ✓ Source d'énergie rapide (glucose).
- ✓ Réserve d'énergie (glycogène, amidon).
- ✓ Elément de structure (cellulose dans la paroi végétale, chitine dans les champignons).
- ✓ Dans la reconnaissance cellulaire (glycoprotéines, glycolipides).

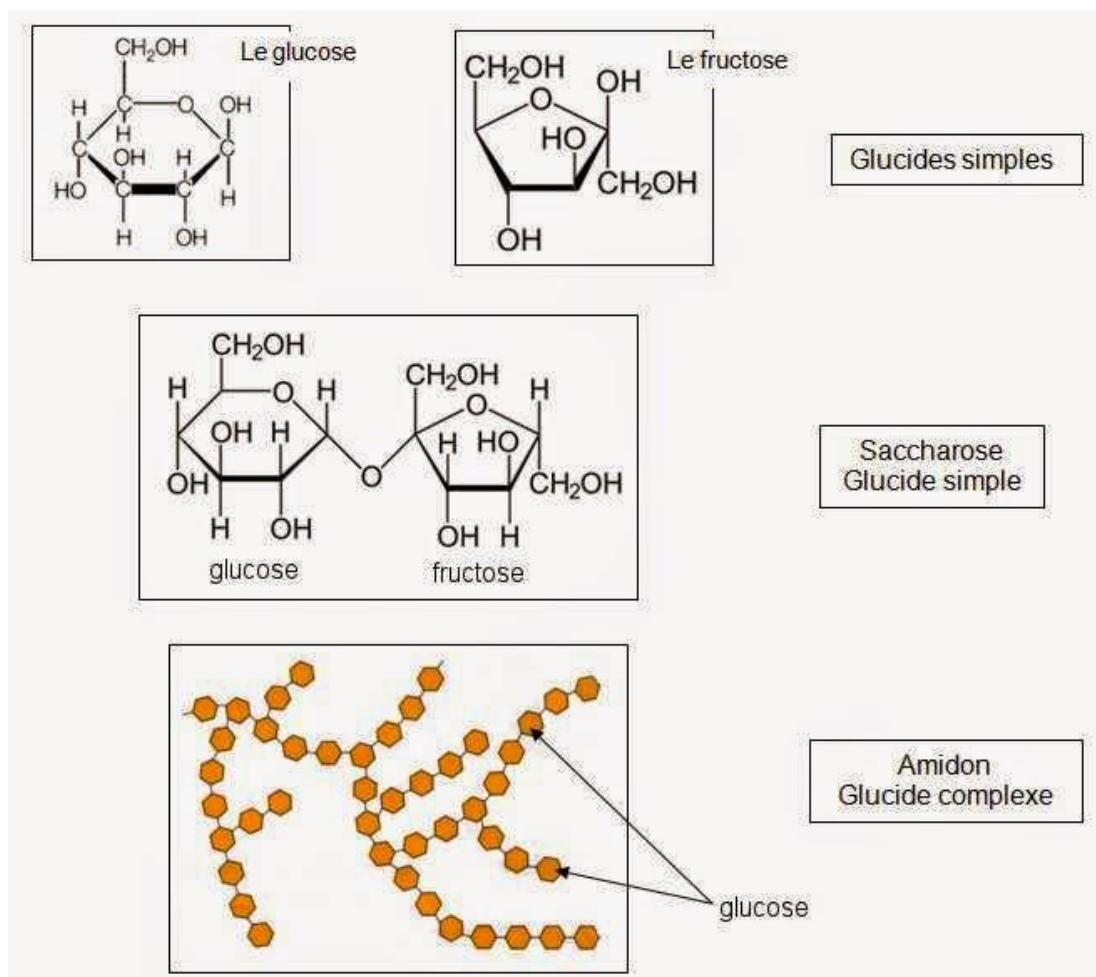


Figure 11. Type de glucides.

I.1.3. Protéines

Les protéines sont des molécules structurales et fonctionnelles indispensables. Constituées de : chaînes d'acides aminés liés par des liaisons peptidiques (Figure 12). Il existe 20 acides aminés, dont certains sont essentiels (non synthétisables par le corps humain). Les protéines jouent le Rôle de :

- ✓ Enzymes catalysant les réactions métaboliques (ex. : ADN polymérase, amylase).
- ✓ Structure et soutien (actine, tubuline, kératine).
- ✓ Transport (hémoglobine, protéines membranaires).
- ✓ Signalisation et régulation (hormones protéiques, facteurs de transcription).

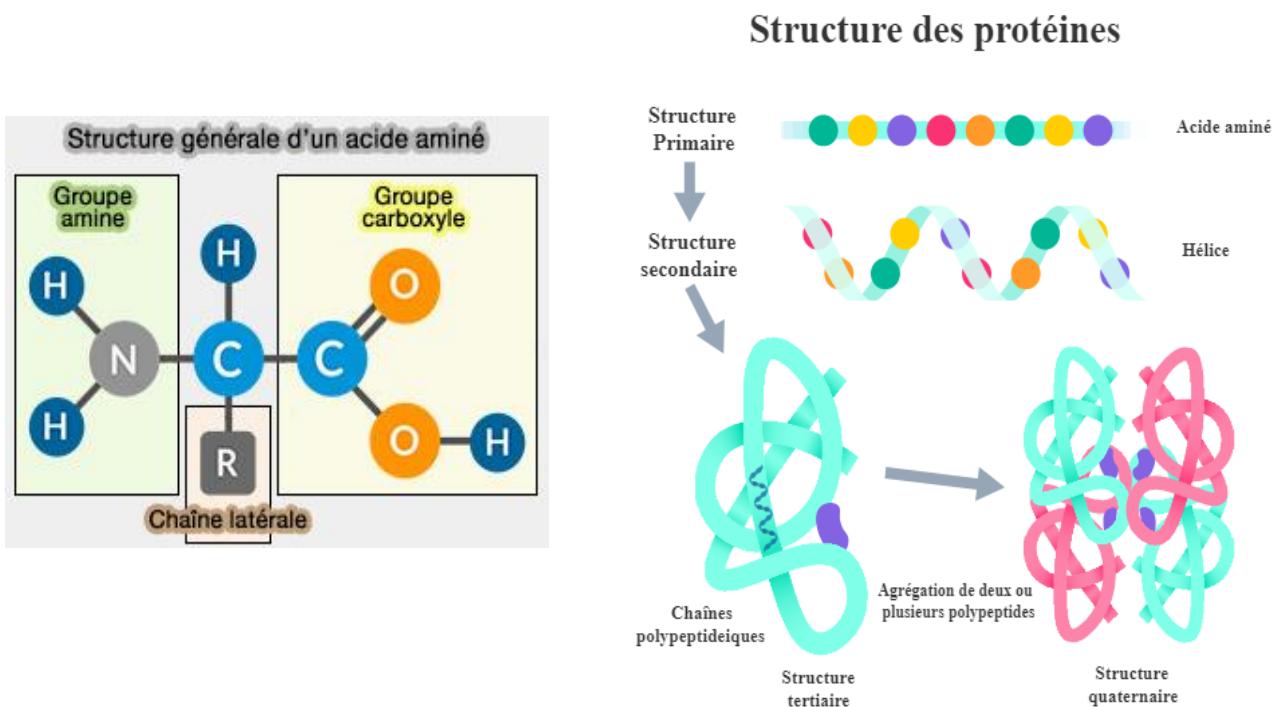


Figure 12. Structure d'acide amine et protéine.

I.1.4. Lipides

Les lipides sont essentiellement composés d'acides gras, de glycérol et de stérols ; dans le cas particulier des cires, ils contiennent également des alcools gras à longue chaîne. Il existe plusieurs types de lipides, chacun jouant un rôle spécifique (Figure 13)

- ✓ **Triglycérides**, servant de réserve énergétique ;
- ✓ **Phospholipides**, éléments structuraux essentiels des membranes biologiques ;
- ✓ **Stéroïdes** tels que le cholestérol et les hormones stéroïdiennes ;
- ✓ **Cires**, qui jouent un rôle de protection et d'imperméabilisation des surfaces biologiques

(cuticule des feuilles, revêtement des plumes ou de la peau chez certains animaux).

Leur rôle global inclut le stockage d'énergie à long terme, la structure membranaire (bicouche lipidique), la signalisation cellulaire (hormones, messagers lipidiques) et la protection contre la déshydratation.

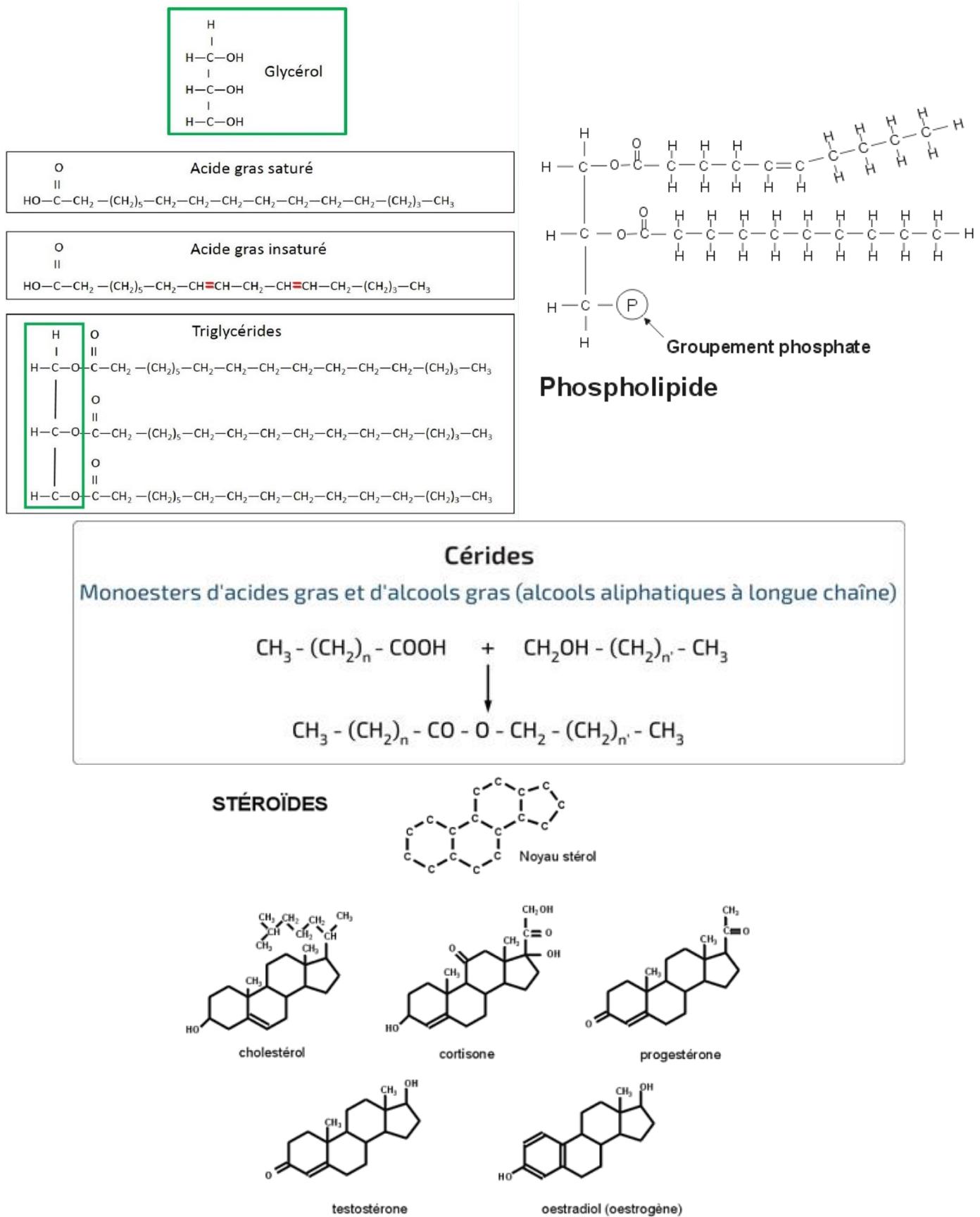


Figure 13. Type de lipides.

I.1.5. Acides nucléiques

Les acides nucléiques sont des macromolécules essentielles à la vie constituées d'unités de base appelées nucléotides. Ils contiennent l'information génétique nécessaire pour le fonctionnement et la reproduction des organismes vivants. Il existe deux types principaux d'acides nucléiques (Figure 14).

- **ADN (acide désoxyribonucléique) :**

L'ADN est une double hélice formée de deux brins complémentaires, constituée de nucléotides, chaque nucléotide ayant :

- ✓ Un groupe phosphate.
- ✓ Un sucre (désoxyribose).
- ✓ Une base azotée (adénine, thymine, cytosine ou guanine).
- ✓ Les bases azotées s'apparentent selon des règles spécifiques : Adénine (A) avec Thymine (T), Cytosine avec (C) Guanine (G).

- **ARN (acide ribonucléique) :**

Molécule à simple brin, dont le sucre des nucléotides est le ribose. La différence clé : L'uracile (U) remplace la thymine (T) de l'ADN. Intervient dans la synthèse des protéines (ARN messager, ARN de transfert, ARN ribosomal).

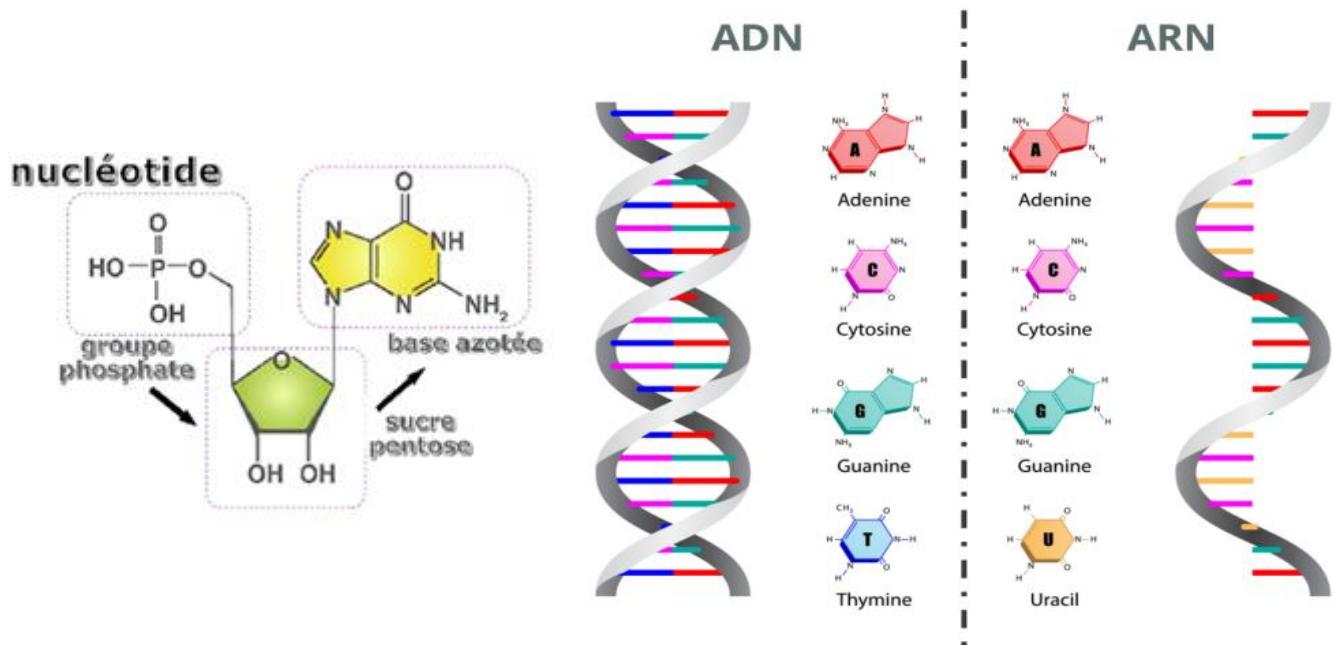


Figure 14. Structure d'un nucléotide, ADN et ARN.

I.2. Notions de bioénergétique

La bioénergétique est l'étude de la transformation et de l'utilisation de l'énergie dans les systèmes biologiques. Elle permet de comprendre comment les cellules produisent, stockent et utilisent l'énergie pour accomplir leurs fonctions vitales.

I.2.1. Principes de base

- **Thermodynamique en biologie :**
 - **1er principe :** loi de conservation d'énergie. L'énergie ne peut être ni créée ni détruite, mais seulement transformée.
 - **2e principe :** Les transformations énergétiques augmentent l'entropie globale.
- **Concept d'énergie libre de Gibbs (ΔG) :**
 - Permet de prédire si une réaction chimique est spontanée :
 - $\Delta G < 0$: Réaction exergonique (libère de l'énergie).
 - $\Delta G > 0$: Réaction endergonique (nécessite de l'énergie).
 - $\Delta G = 0$: Équilibre.

I.2.2. Sources d'énergie des cellules

- **ATP (Adénosine Triphosphate) :**

L'ATP est une molécule énergétique principale. Libère de l'énergie lors de l'hydrolyse en ADP (Adénosine Diphosphate) ou AMP (Adénosine Monophosphate) (Figure 15). Elle sert de "monnaie énergétique" pour les processus cellulaires.

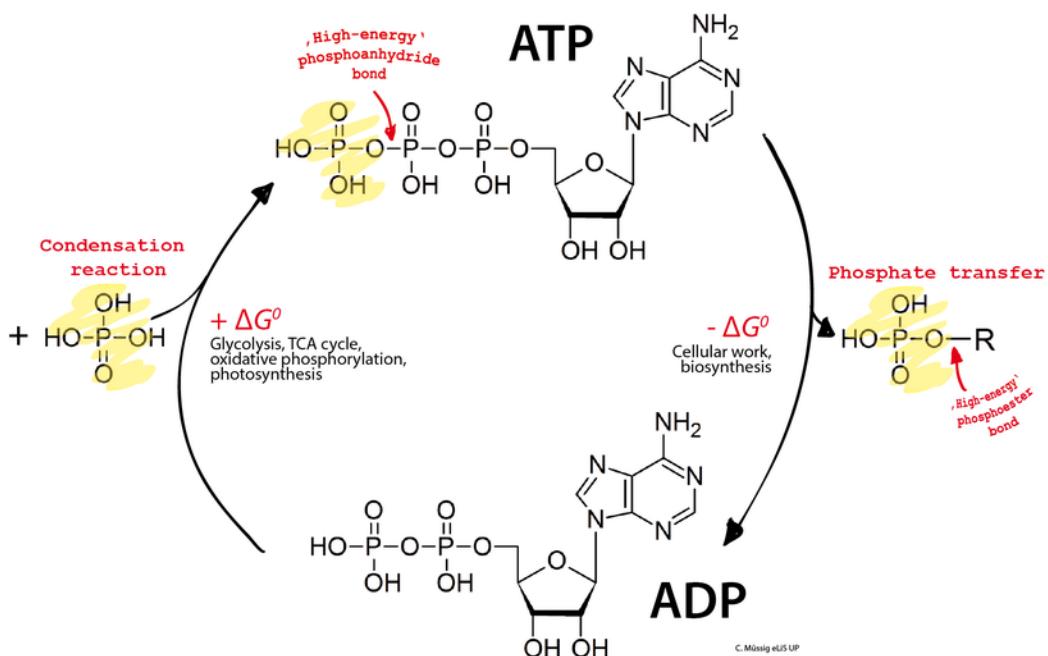


Figure 15. Hydrolyse d'ATP.

- **NADH et FADH₂**

NADH (nicotinamide adénine dinucléotide réduit) et **FADH₂** (flavine adénine dinucléotide réduit) sont des molécules cruciales dans le métabolisme énergétique des cellules (Figure 16), notamment au cours de la respiration cellulaire. Ces deux molécules agissent comme des transporteurs d'électrons dans la production d'énergie sous forme d'ATP (adénosine triphosphate).

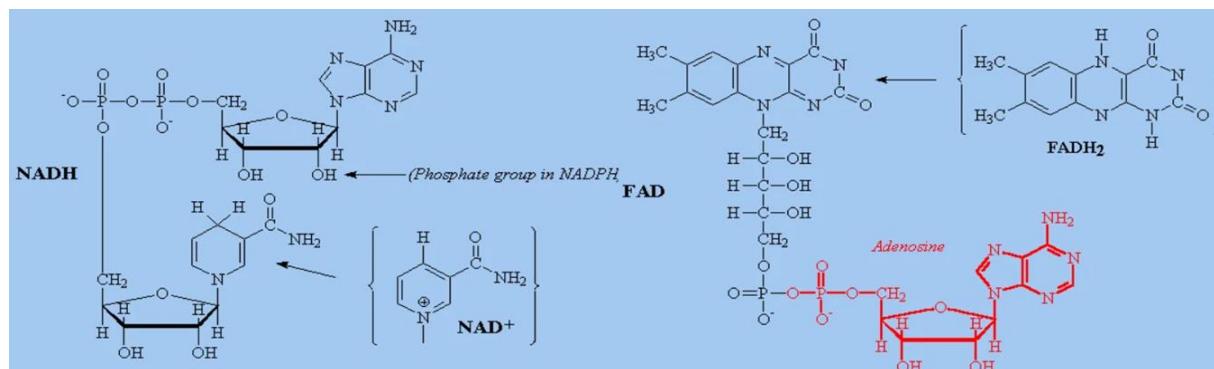


Figure 16. Structures chimiques des coenzymes NAD⁺/NADH et FAD/FADH₂.

- **Glucose et autres substrats**

Ce sont de principale source d'énergie pour les cellules. Le glucose est dégradé via la glycolyse, le cycle de Krebs et la chaîne de transport des électrons.

Les lipides précisément les acides gras sont décomposés en acétyl-CoA dans les mitochondries par β -oxydation, qui entre ensuite dans le cycle de Krebs.

Les protéines sont utilisées comme source d'énergie en cas de carence en glucides et en lipides. Par dégradation en acides aminés (Transamination et Désamination oxydative), les acides aminés peuvent être convertis en pyruvate, acétyl-CoA ou intermédiaires du cycle de Krebs.

I.2.3. Voies métaboliques

Les **voies métaboliques** sont des séries organisées de réactions chimiques se déroulant dans les cellules pour transformer des molécules en énergie ou en produits essentiels. Ces voies sont catalysées par des enzymes spécifiques et régulées pour répondre aux besoins de l'organisme.

- **Catabolisme** : Dégradation des molécules complexes en molécules simples, avec libération d'énergie.
- **Anabolisme** : Synthèse de molécules complexes à partir de précurseurs simples, nécessitant de l'énergie

➤ **Amphibolisme** : Voies pouvant être cataboliques ou anaboliques selon les besoins cellulaires. (Cycle de Krebs peut être catabolique : Production d'énergie via l'oxydation ou Anabolique : Fournit des précurseurs pour la synthèse (ex. : acides aminés)).

I.2.3.1. Voies cataboliques

Les voies cataboliques libèrent de l'énergie en décomposant des molécules complexes en composés plus simples.

a. Glycolyse

La glycolyse est une voie métabolique fondamentale dans le catabolisme énergétique. C'est un processus biochimique qui dégrade une molécule de glucose ($C_6H_{12}O_6$) en deux molécules de pyruvate ($C_3H_4O_3$), générant de l'énergie sous forme deux ATP et deux NADH. Elle se déroule dans le cytoplasme des cellules et constitue une étape cruciale dans le métabolisme des organismes, qu'ils soient aérobies ou anaérobies.

b. Cycle de Krebs (cycle de l'acide citrique)

Le cycle de Krebs, également appelé cycle de l'acide citrique ou cycle des acides tricarboxyliques (TCA), est une voie métabolique centrale du catabolisme énergétique. Il se déroule dans la matrice mitochondriale et constitue une étape majeure du métabolisme aérobie, où les molécules issues de la dégradation des glucides, des lipides et des protéines sont oxydées (Oxydation du pyruvate en CO_2) pour produire de l'énergie (3NADH, 1FADH₂ et 2ATP). Chez les procaryotes le cycle de Krebs se déroule dans le cytoplasme.

c. Chaîne de transport des électrons

La chaîne de transport des électrons (CTE) est une série de complexes protéiques et de molécules associées situés dans la membrane interne de la mitochondrie. Son rôle principal est de produire de grandes quantités d'ATP par le biais de la phosphorylation oxydative, en utilisant l'énergie des électrons provenant du NADH et du FADH₂ générés par la glycolyse, le cycle de Krebs, et la β -oxydation.

Les procaryotes n'ont pas de mitochondries, mais leur membrane plasmique joue un rôle similaire à celui de la membrane interne mitochondriale chez les eucaryotes.

d. Fermentation

La fermentation cellulaire est un processus métabolique anaérobie qui permet de produire de l'énergie (sous forme d'ATP) en l'absence d'oxygène. Elle consiste à régénérer le NAD^+ , indispensable pour la glycolyse, en convertissant le pyruvate en d'autres composés selon le type de fermentation.

I.2.3.2 Voies anaboliques

a. Photosynthèse (chez les organismes photosynthétiques)

La photosynthèse est un processus biologique par lequel les organismes autotrophes (comme les plantes, les algues et certaines bactéries) utilisent l'énergie lumineuse pour synthétiser des composés organiques, principalement du glucose, à partir de molécules simples comme l'eau (H_2O) et le dioxyde de carbone (CO_2). Ce processus est fondamental pour la production de la biomasse sur Terre et la fourniture d'énergie aux écosystèmes. Les Phases principales de la photosynthèse sont :

- ✓ **Réactions photochimiques** (phase claire) :
 - Production d'ATP et NADPH grâce à l'énergie solaire.
- ✓ **Cycle de Calvin** (phase sombre) :
 - Fixation du CO_2 pour produire du glucose.

b. Glycogenèse

C'est la synthèse de glucose à partir de précurseurs non glucidiques (pyruvate, lactate, acides aminés), qui se déroule au niveau du foie et des reins.

c. Synthèse des protéines

Consiste en l'Assemblage d'acides aminés pour former des protéines au niveau des ribosomes (cytoplasme ou réticulum endoplasmique rugueux).

d. Synthèse des acides gras

La formation d'acides gras se fait à partir d'acétyl-CoA au niveau du cytoplasme des cellules du foie et du tissu adipeux.

II. Protéines

II.1. Structure et propriétés des acides aminés

Les acides aminés sont les unités de base des protéines. Ils possèdent une structure chimique spécifique qui leur confère des propriétés uniques, essentielles pour les fonctions biologiques.

II.1.1 Structure générale des acides aminés

Un acide aminé est une molécule organique composée de quatre groupes fonctionnels autour d'un carbone central (appelé carbone alpha) (Figure 17)

- ✓ Un groupe amine ($-\text{NH}_2$) : Basique.
- ✓ Un groupe carboxyle ($-\text{COOH}$) : Acide.
- ✓ Un atome d'hydrogène ($-\text{H}$).
- ✓ Un groupe R : Chaîne latérale variable qui détermine les propriétés spécifiques de l'acide aminé.

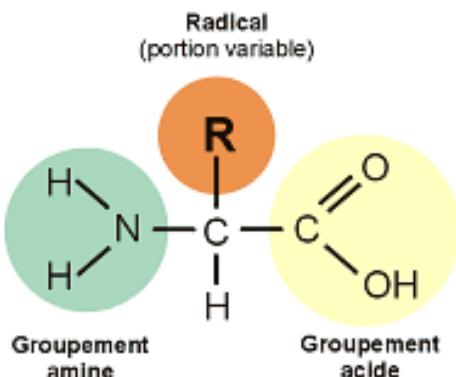


Figure 17. Structure d'un acide aminé.

II.1.2. Classification des acides aminés

Les acides aminés sont classés selon les propriétés de leur chaîne latérale (**R**) (Figure 18) :

II.1.2.1. Acides aminés polaires

- **Non chargés** : Interagissent avec l'eau, mais sans charge nette.
 - Exemple : Sérine, Thréonine, Asparagine, Glutamine.
- **Chargés** : Possèdent une charge positive ou négative.
 - Chargés positivement (basiques) : Lysine, Arginine, Histidine.
 - Chargés négativement (acides) : Acide aspartique, Acide glutamique.

II.1.2.2. Acides aminés non polaires :

- **Hydrophobes**
 - Exemple : Alanine, Valine, Leucine, Isoleucine, Méthionine, Phénylalanine, Tryptophane, Proline, Glycine, Cysteine et Proline

II.1.2.3. Acides aminés spéciaux

- Glycine** : Le plus simple, avec un seul hydrogène comme chaîne latérale.
- Cystéine** : Peut former des ponts disulfures (liaisons -S-S-) pour stabiliser les protéines.
- Proline** : Structure cyclique qui induit des coude dans les protéines.

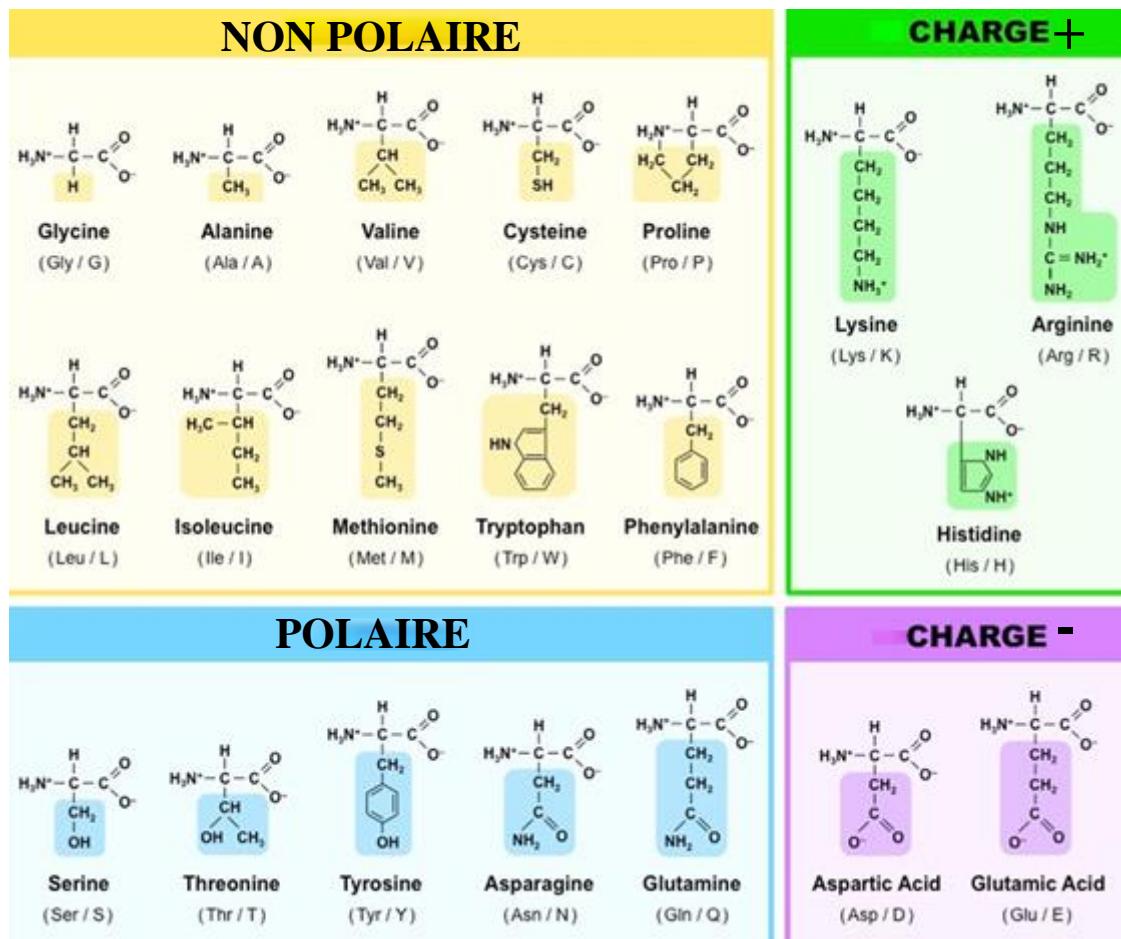


Figure 18. Classes d'acide amine.

II.1.3. Propriétés physico-chimiques des acides aminés

II.1.3.1. Caractère Amphotère :

Les acides aminés possèdent à la fois un groupe acide (-COOH) et un groupe basique (-NH₂). Cette structure leur permet d'agir comme un acide ou une base selon le pH de la solution.

➤ Dans un milieu acide (pH bas) :

Le groupe carboxyle (-COOH) reste protoné, et le groupe amine (-NH₂) capte un proton, formant -NH₃⁺. L'acide aminé agit comme une base en acceptant des protons.

➤ Dans un milieu basique (pH élevé)

Le groupe carboxyle perd un proton et devient un carboxylate ($-\text{COO}^-$), tandis que le groupe amine reste déprotoné ($-\text{NH}_2$). L'acide aminé agit comme un acide en libérant des protons.

➤ À un pH intermédiaire (point isoélectrique, Pi)

L'acide aminé se trouve sous une forme zwitterionique, où le groupe carboxyle est sous forme $-\text{COO}^-$ et le groupe amine est sous forme $-\text{NH}_3^+$. La charge globale de la molécule est nulle. Le point isoélectrique diffère selon la nature de la chaîne latérale (R).

II.1.3.2. Solubilité :

Les acides aminés polaires sont hydrophiles et solubles dans l'eau en raison de leur nature amphotère et de leur capacité à former des interactions électrostatiques avec les molécules d'eau.

Les acides aminés non polaires sont hydrophobes et se regroupent dans les environnements aqueux (cœur des protéines).

II.1.3.3. Formation de liaisons peptidiques

Les acides aminés se lient entre eux via des liaisons peptidiques (entre le groupe carboxyle d'un acide aminé et le groupe amine d'un autre). Cette liaison libère une molécule d'eau (Figure 19).

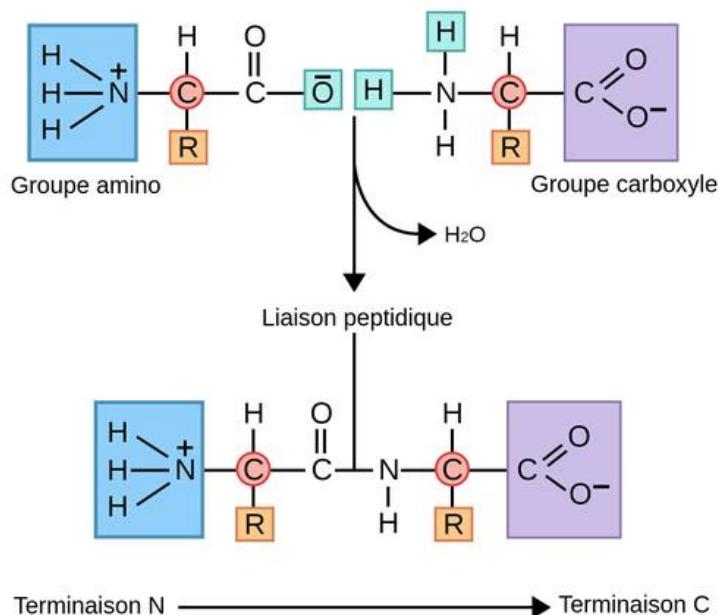


Figure 19. Liaison peptidique.

II.1.3.4. Réactivité chimique :

Les acides aminés sont des molécules réactives en raison de leurs deux groupes fonctionnels principaux : le groupe amine ($-\text{NH}_2$) et le groupe carboxyle ($-\text{COOH}$), ainsi que parfois de leur chaîne latérale (R). Ces groupes confèrent aux acides aminés une variété de réactions chimiques importantes dans des contextes biologiques, chimiques et industriels.

a. Réactivité du groupe carboxyle ($-\text{COOH}$)

✓ Formation d'amides (réaction avec des amines)

Le groupe carboxyle réagit avec un groupe amine pour former une liaison amide, un processus essentiel dans la formation des liaisons peptidiques dans les protéines.

✓ Estéification

Réaction avec des alcools pour former des esters, souvent en présence d'un catalyseur acide.

✓ Décarboxylation :

En chauffant ou en présence d'un catalyseur, le groupe carboxyle libère du CO_2 , produisant une amine. Cette réaction est importante dans les voies métaboliques (Figure 20).

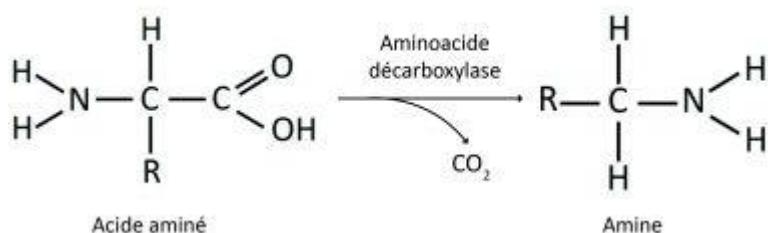


Figure 20. Réaction de décarboxylation.

b. Réactivité du groupe amine ($-\text{NH}_2$)

✓ Formation de liaisons peptidiques

Le groupe amine réagit avec le groupe carboxyle d'un autre acide aminé pour former une liaison peptidique, libérant une molécule d'eau (Formation de peptides et protéines). Structures essentielles à la construction, la fonction enzymatique et la régulation biologique des cellules.

✓ Réaction avec des aldéhydes ou cétones

Le groupe amine peut réagir avec des aldéhydes ou des cétones pour former des bases de Schiff (imine) (Figure 21).

Cette réaction intervient dans de nombreux processus biochimiques, notamment dans la synthèse des acides aminés, la formation des coenzymes (La pyridoxal phosphate), et les réactions enzymatiques de transamination qui permettent le transfert de groupes amine entre molécules.

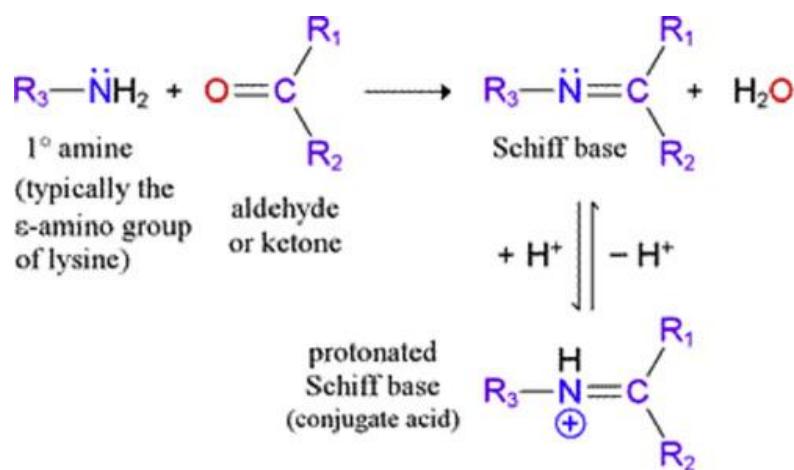


Figure 21. Réaction avec aldéhyde ou cétone.

✓ **Acylation**

Réaction avec des halogénures d'acyle pour former des amides. Cette réaction est utile pour la synthèse de peptides, de protéines et de nombreux composés bioactifs, car elle permet la formation de liaisons amide stables, caractéristiques des structures protéiques.

c. Réactivité des chaînes latérales (R)

La réactivité des chaînes latérales varie en fonction de leur nature.

✓ **Groupes hydroxyles (-OH) (sérine, thréonine)**

Peuvent être phosphorylés (ajout de groupes phosphate) dans des réactions enzymatiques importantes pour la signalisation cellulaire.

✓ **Groupes soufrés (cystéine, méthionine)**

La cystéine peut former des **ponts disulfure** (R-S-S-R) par oxydation, ce qui stabilise la structure des protéines.

✓ **Groupes aromatiques (phénylalanine, tyrosine)**

Réagissent dans des réactions de substitution électrophile aromatique.

✓ **Groupes basiques (lysine, arginine, histidine)**

Participent à des réactions d'échange de protons, influençant les propriétés acido-basiques des protéines.

✓ **Groupes acides (acide aspartique, acide glutamique)**

Peuvent participer à des réactions d'estérification ou d'amidation

II.2. Structure et propriétés des protéines

Les protéines sont des macromolécules biologiques essentielles à la vie, impliquées dans une multitude de fonctions cellulaires, telles que la catalyse enzymatique, la

signalisation, le transport, et le soutien structural. Leur structure et leurs propriétés déterminent leur fonction

II.2.1. Structure des Protéines

Les protéines ont une organisation structurale hiérarchique (Figure 22). :

➤ **Structure Primaire** : Séquence linéaire d'acides aminés reliés par des liaisons peptidiques. La séquence détermine la manière dont la protéine se replie et fonctionne.

Exemple : Gly-Ala-Val-Leu.

➤ **Structure Secondaire** : Organisation locale des segments de la chaîne protéique stabilisée par des liaisons hydrogène entre les groupes CO et NH du squelette peptidique. Types principaux :

- Hélice α : Structure spiralee.
- Feuillet β : Feuillet plissé formé par des segments adjacents.
- Coude et boucle : Structures non régulières.

➤ **Structure Tertiaire** : Organisation tridimensionnelle complète d'une chaîne polypeptidique. Elle se stabilise par des interactions hydrophobes, liaisons hydrogène, ponts disulfures, et interactions ioniques.

➤ **Structure Quaternaire** : Assemblage de plusieurs chaînes polypeptidiques (sous-unités). Permet des interactions coopératives entre sous-unités. Exemple : L'hémoglobine (4 sous-unités).

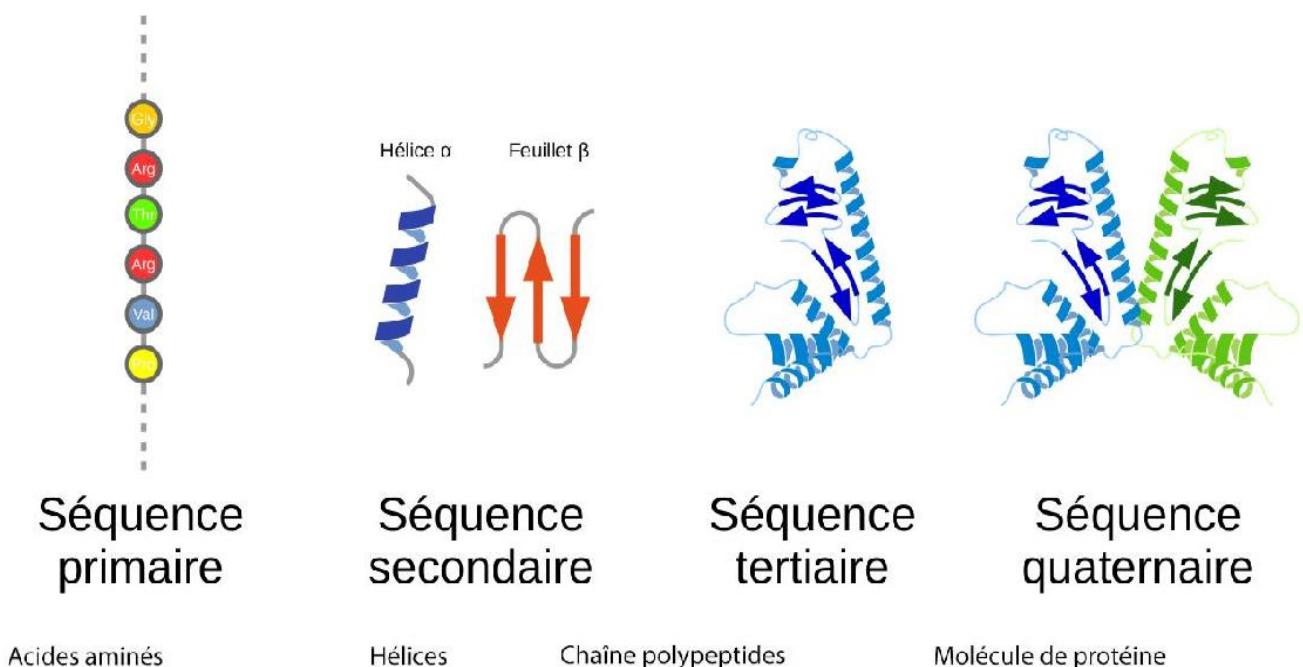


Figure 22. Organisation structurale des protéines.

II.2.2. Propriétés physico-chimiques des Protéines**II.2.2.1. Solubilité**

Varie selon les protéines (solubles dans l'eau ou les solutions salines) et dépend des interactions hydrophiles et hydrophobes.

II.2.2.2. Propriétés Acido-basiques

Les protéines peuvent agir comme des acides ou des bases (ampholytes). Point isoélectrique (pI) : pH auquel la protéine a une charge nette nulle.

II.2.2.3. Spécificité

Chaque protéine remplit une fonction précise grâce à sa structure. Exemple : Les enzymes catalysent des réactions spécifiques.

II.2.2.4. Dénaturation

Perte de la structure tridimensionnelle (tertiaire et/ou secondaire) sans rupture de la structure primaire. Ce phénomène est causé par des changements de température, de pH ou des agents chimiques et qui est généralement irréversible.

II.2.2.5. Interactions avec d'autres molécules

Liaison avec des ligands (comme les ions, hormones, ou autres protéines) ou une interaction avec les membranes cellulaires ou des substrats enzymatiques.

II.2.2.6. Propriétés Optiques

Les protéines absorbent la lumière ultraviolette (surtout à 280 nm grâce à la présence de résidus d'acides aminés aromatiques comme la tyrosine et le tryptophane).

III. Enzymologie

L'enzymologie est une branche de la biochimie qui étudie les enzymes, leur structure, leur fonctionnement, et leur rôle dans les réactions biochimiques. Lorsqu'elle est appliquée aux bactéries, on parle d'enzymologie bactérienne, qui explore le rôle des enzymes dans le métabolisme bactérien, leur contribution à la survie, à la croissance et à l'interaction avec l'environnement.

III.1. Définition des enzymes

Les enzymes sont des protéines catalytiques qui accélèrent les réactions biochimiques sans être consommées par celles-ci. Elles sont spécifiques à leurs substrats et agissent selon le modèle "clé-serrure" ou "adaptation induite".

III.2. Caractéristiques des enzymes

- **Spécificité** : Les enzymes sont spécifiques à un substrat ou à un groupe de substrats.
- **Activité optimale** : Fonctionnent à des températures et pH spécifiques.

Exemple : Les enzymes thermophiles bactériennes fonctionnent à des températures élevées.

- **Réversibilité** : La plupart des réactions enzymatiques sont réversibles.
- **Inhibition** :
 - Inhibiteurs compétitifs : Liaison au site actif.
 - Inhibiteurs non compétitifs : Liaison à un site allostérique.
 - Inhibiteurs incompatitifs : se lient uniquement au complexe enzyme-substrat

III.3. Structure et mécanisme d'action des enzymes

III.3.1. Structure des enzymes

Les enzymes sont des protéines (ou parfois des ARN catalytiques) dont la structure est directement liée à leur fonction. Leur organisation est hiérarchique et comprend plusieurs niveaux (Figure 23) :

➤ **Structure primaire** Séquence linéaire d'acides aminés reliés par des liaisons peptidiques. Cette séquence, codée par le gène, détermine la façon dont la protéine se repliera et donc sa fonction enzymatique.

➤ **Structure secondaire** Organisation locale de la chaîne polypeptidique en motifs réguliers stabilisés par des liaisons hydrogène entre les groupes CO et NH du squelette. Les principaux motifs :

- Hélice α : Enroulement serré en spirale.
- Feuillet β plissé : Brins parallèles ou antiparallèles formant un plan plissé.
- Coudes et boucles : Segments flexibles reliant les motifs réguliers.

➤ **Structure tertiaire.** Repliement tridimensionnel complet de la protéine. Avec des forces stabilisatrices : Liaisons hydrogène, interactions hydrophobes, ponts disulfure (liaisons covalentes entre cystéines), forces de Van der Waals, liaisons ioniques

La structure tertiaire forme le site actif, région où le substrat se fixe et où la réaction se produit.

➤ **Structure quaternaire (chez certaines enzymes)** Association de plusieurs chaînes polypeptidiques (sous-unités) pour former un complexe fonctionnel. (L'ADN polymérase ou l'alcool déshydrogénase).

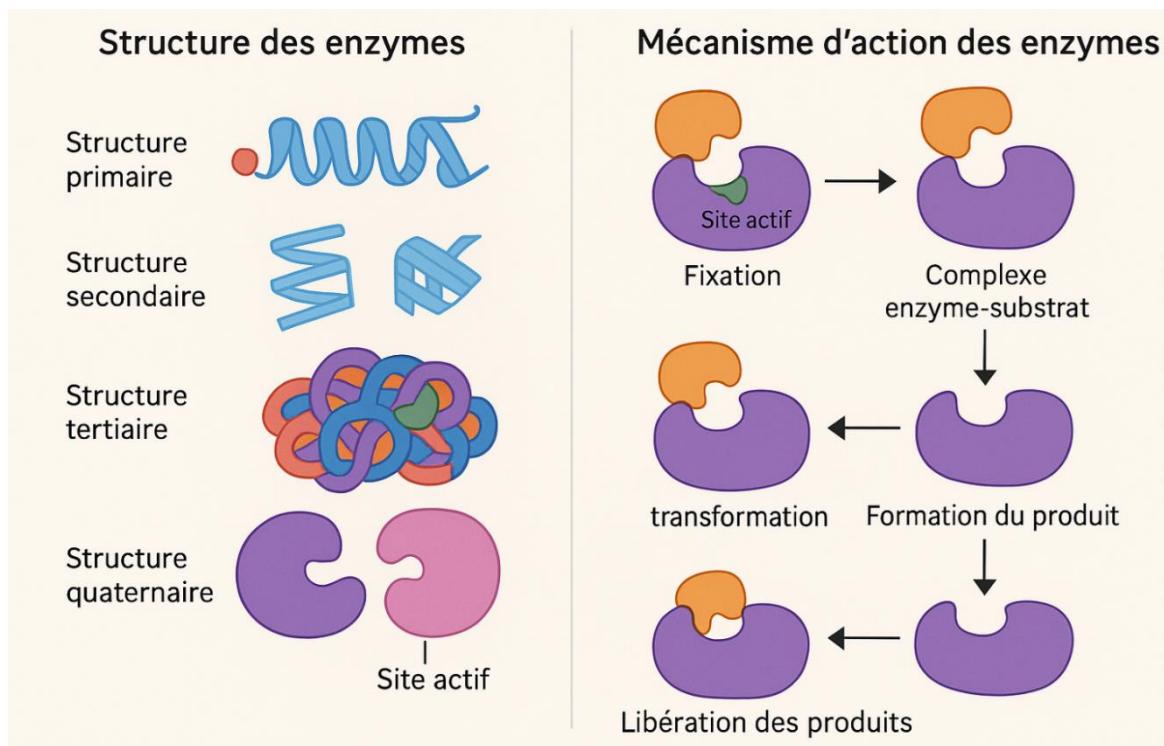


Figure 23. Structure et mécanisme d'action des enzymes.

III.3.2. Coenzyme et cofacteur

Les coenzymes et cofacteurs sont essentiels pour le fonctionnement des enzymes, assurant la spécificité et l'efficacité des réactions biologiques à travers de multiples mécanismes.

Ce sont des molécules auxiliaires indispensables à l'activité enzymatique, de nature organique et souvent dérivées de vitamines, comme le NAD, la biotine ou la coenzyme A.

Un cofacteur désigne tout composé non protéique nécessaire à l'activité d'une enzyme, il peut s'agir d'un ion métallique (comme Fe^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+}) ou d'une molécule organique appelée coenzyme.

Ils participent activement au processus catalytique, en agissant comme accepteurs ou transporteurs de groupes chimiques, électrons ou atomes d'hydrogène durant la réaction

enzymatique. Ils interviennent soit de façon transitoire (cosubstrats, faiblement liés) soit de façon permanente (groupements prosthétiques, fortement liés). Les ions métalliques, eux, contribuent à stabiliser la structure de l'enzyme, à activer le substrat ou à faciliter la réaction par des transferts d'électrons. Sans la présence du cofacteur ou de la coenzyme, beaucoup d'enzymes deviennent inactives (apoenzymes), leur forme active étant appelée holoenzyme.

III.3.3. Mécanisme d'action des enzymes

Les enzymes agissent selon des étapes (Figure 23)

- **Reconnaissance et fixation du substrat.** L'enzyme reconnaît spécifiquement son substrat grâce à la complémentarité entre le site actif et la structure du substrat. Les forces impliquées sont les liaisons hydrogène, interactions hydrophobes, forces électrostatiques (non covalentes et réversibles).
- **Formation du complexe enzyme-substrat** Une fois le substrat fixé, l'enzyme forme un complexe enzyme-substrat (E-S). Ce complexe abaisse l'énergie d'activation nécessaire pour la réaction, en stabilisant l'état de transition. L'enzyme peut orienter correctement les réactifs et/ou créer un microenvironnement favorable.
- **Catalyse et transformation chimique** L'enzyme facilite la rupture et/ou la formation de liaisons chimiques. Les mécanismes possibles :
 - **Catalyse acido-basique** : des groupements de l'enzyme donnent ou captent des protons.
 - **Catalyse par covalence** : formation temporaire d'une liaison covalente enzyme-substrat.
 - **Catalyse par contrainte** : l'enzyme déforme le substrat pour faciliter la réaction.
- **Formation du complexe enzyme-produit.** Après transformation, l'enzyme est liée au(x) produit(s) formé(s). Les produits ont souvent une affinité plus faible pour le site actif que le substrat initial, ce qui facilite leur libération.
- **Libération des produits et régénération de l'enzyme** Les produits quittent le site actif. L'enzyme retrouve sa conformation initiale et est prête pour un nouveau cycle.

III.4. Complément de cinétique enzymatique

La cinétique enzymatique décrit la relation entre la vitesse de réaction et les concentrations en substrat/enzyme. Elle permet de déterminer des paramètres essentiels comme la V_{max} , le K_m et le k_{cat} .

dIII.4.1. Notions de base

Équation de Michaelis-Menten :

$$v = (V_{max} [S]) / (K_m + [S])$$

- **Vitesse initiale (v_0)** : vitesse mesurée juste après le début de la réaction, avant que le substrat ne soit significativement consommé.
- **Concentration en substrat [S]** : facteur clé influençant la vitesse de réaction.
- **V_{max}** : vitesse maximale lorsque l'enzyme est saturée.
- **K_m** : constante de Michaelis, concentration de substrat pour laquelle $v = V_{max} / 2$
Indique l'affinité de l'enzyme pour le substrat (faible K_m = forte affinité).

III.4.2. Courbe vitesse /concentration

La représentation graphique classique est l'hyperbole de Michaelis-Menten. Pour déterminer plus précisément K_m et V_{max} (Figure 24). Le modèle le plus classique décrit la réaction en trois étapes :

- **Fixation** : $E + S \rightleftharpoons ES$
- **Transformation** : $ES \rightarrow E + P$
- **Libération** : L'enzyme est régénérée et prête pour un nouveau cycle.

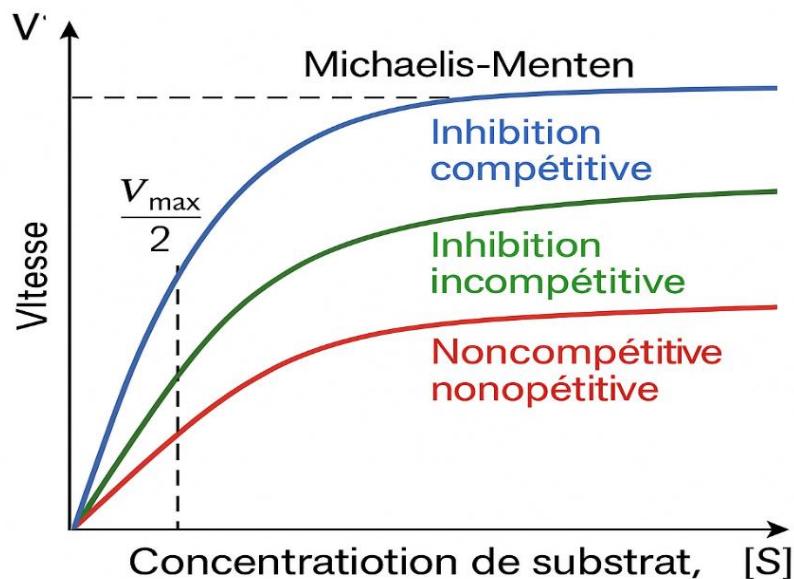


Figure 24. Courbe de Mechaelis-Menten.

III.4.3. Facteurs influençant la vitesse de réaction enzymatique

Des facteurs influençant l'activité enzymatique incluent :

- ✓ Température (optimum souvent proche de 37°C chez l'humain)
- ✓ pH (chaque enzyme a un pH optimal)

- ✓ Présence d'inhibiteurs (compétitifs, non compétitifs, incompétitifs)
- ✓ Concentration en enzyme et substrat

III.5. Introduction au genre enzymatique

Les enzymes sont essentielles à la vie car elles permettent aux réactions biochimiques de se dérouler à des vitesses compatibles avec les besoins de l'organisme. Sans enzymes, la plupart des réactions métaboliques seraient beaucoup trop lentes. Elles participent à des processus variés : Digestion, synthèse de l'ADN et des protéines, production d'énergie (respiration cellulaire, photosynthèse) et signalisation cellulaire et régulation hormonale

Selon la **Commission des Enzymes (EC)**, elles sont classées en 6 grandes classes selon le type de réaction (Tableau X).

Tableau X. Classe d'enzymes selon leur mode d'action.

Classe d'enzyme	Mode d'action	Exemples	Exemples microbiens
Oxydoréductases (EC 1)	Catalysent des réactions d'oxydoréduction : transfert d'électrons ou d'hydrogène entre molécules.	Déshydrogénases, oxydases, peroxydases	<i>Pseudomonas fluorescens</i> (Déshydrogénases), <i>Lactobacillus</i> (Lactate déshydrogénase)
Transférases (EC 2)	Transfèrent un groupe fonctionnel (phosphate, méthyle, acyle) d'une molécule à une autre.	Kinases, transaminases, méthyltransférases	<i>Escherichia coli</i> (Kinases Glycolytiques), <i>Bacillus subtilis</i> (Transaminases)
Hydrolases (EC 3)	Catalysent l'hydrolyse de liaisons chimiques (ester, glycosidique, peptidique).	Lipases, protéases, amylases	<i>Bacillus licheniformis</i> (protéases), <i>Aspergillus niger</i> (Amylases, Lipases)
Lyases (EC 4)	Coupent des liaisons C–C, C–O ou C–N sans hydrolyse ni oxydation.	Décarboxylases, aldolases	<i>Clostridium sporogenes</i> (Décarboxylases), <i>E. coli</i> (Aldolases)
Isomérases (EC 5)	Catalysent la réorganisation intramoléculaire (isomérisation).	Racémases, épimérases, mutases	<i>Lactobacillus brevis</i> (Racémases), <i>Streptococcus thermophilus</i> (Epimérases)
Ligases (EC 6)	Catalysent la formation de liaisons (C–O, C–N, C–S) couplée à l'hydrolyse d'ATP.	ADN synthétases ligase	<i>E. coli</i> (ADN ligase), <i>Rhizobium sp.</i> (Glutamine synthétase)

IV. Dégradation microbienne des protéines

Cycles d'azote et du soufre

La dégradation microbienne des protéines constitue un maillon essentiel dans le recyclage de la matière organique au sein des écosystèmes. Elle est principalement assurée par des micro-organismes, notamment des bactéries et des champignons, qui fragmentent les protéines complexes en unités plus simples telles que les acides aminés. Ces composés subissent ensuite diverses transformations biochimiques, libérant des éléments minéraux tels que l'ammoniac, les nitrates, ou encore le sulfure d'hydrogène, qui sont réintégrés dans les grands cycles biogéochimiques de l'azote et du soufre. Ces cycles assurent la disponibilité de nutriments essentiels à la croissance des végétaux, régulent la qualité des sols et des eaux, et participent au maintien des équilibres écologiques dans les environnements naturels et artificiels.

IV.1. Dégradation des protéines dans le cycle d'azote

Le cycle de l'azote débute par l'ammonification, processus durant lequel les protéines et les acides aminés issus de la matière organique sont dégradés par des bactéries hétérotrophes telles que *Bacillus*, *Clostridium* ou encore *Proteus*. Ces micro-organismes produisent des enzymes protéolytiques capables d'hydrolyser les liaisons peptidiques, libérant ainsi des acides aminés. Ces derniers subissent ensuite des désaminations libérant de l'ammoniac (NH_3), qui, en présence d'eau, se transforme en ion ammonium (NH_4^+), forme plus stable et assimilable par les micro-organismes et les plantes.

L'ammonium ainsi produit entre dans la phase de nitrification, un processus strictement aérobie mené par deux types de bactéries chimio-autotrophes. D'une part, les bactéries du genre *Nitrosomonas* oxydent l'ammonium en nitrites (NO_2^-). D'autre part, ces derniers sont convertis en nitrates (NO_3^-) par les bactéries du genre *Nitrobacter*. Les nitrates formés peuvent être assimilés par les plantes ou être réintégrés dans l'environnement selon d'autres voies métaboliques.

La dénitrification représente la dernière étape majeure du cycle de l'azote. En conditions anaérobies, certaines bactéries comme *Pseudomonas* ou *Paracoccus* utilisent les nitrates comme accepteurs d'électrons dans leur métabolisme respiratoire. Ce processus réduit progressivement les nitrates en nitrites, puis en monoxyde d'azote (NO), protoxyde d'azote (N_2O) et enfin en azote moléculaire (N_2), gaz inerte qui retourne dans l'atmosphère. Cette boucle permet de réguler l'accumulation de composés azotés dans les écosystèmes et évite la sur-fertilisation des milieux, source d'eutrophisation (Figure 25).

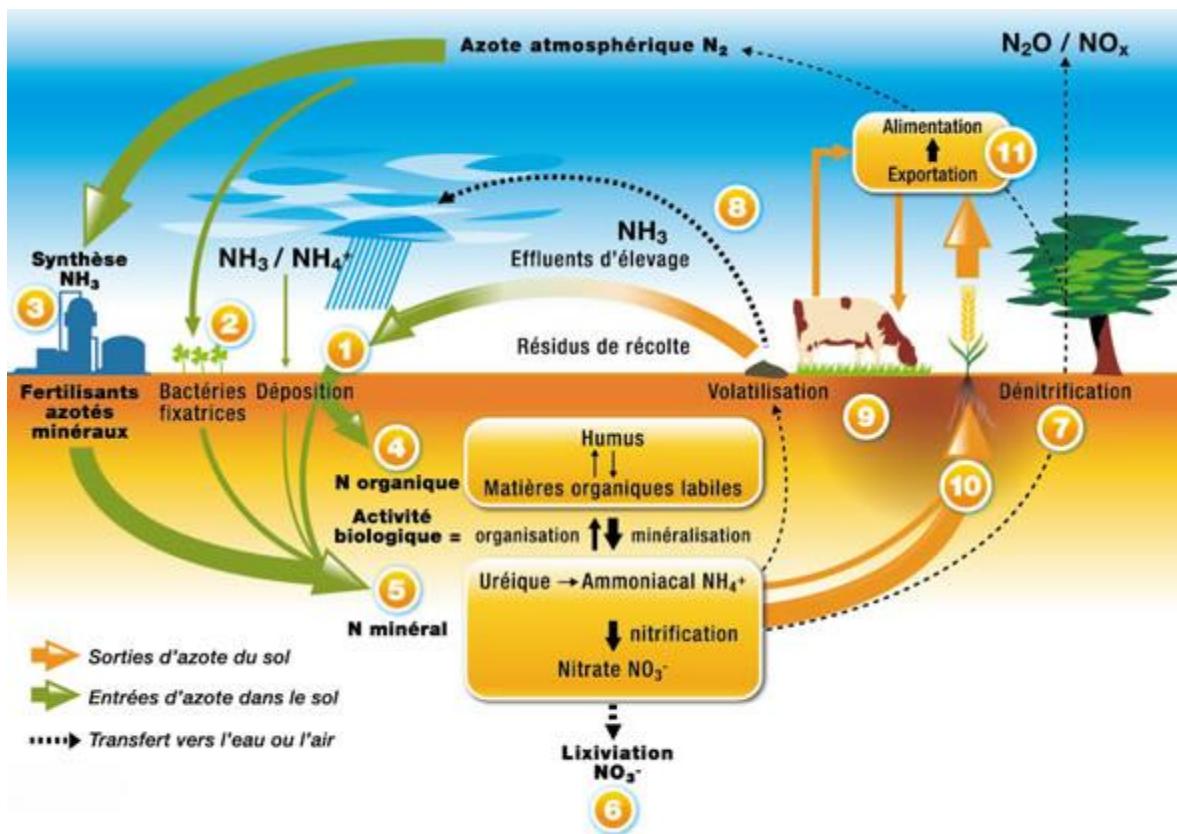


Figure 25. Dégradation des protéines dans le cycle de l'azote.

IV.2. Dégradation des protéines dans le cycle du soufre

Le cycle du soufre est étroitement lié à la dégradation microbienne des acides aminés contenant du soufre, notamment la cystéine et la méthionine. Lors de la décomposition de ces composés par des bactéries anaérobies telles que *Clostridium* ou *Desulfovibrio*, il se forme du sulfure d'hydrogène (H₂S), un gaz toxique à l'odeur caractéristique d'œuf pourri. Cette molécule peut ensuite suivre plusieurs voies de transformation selon les conditions environnementales.

En présence d'oxygène, certaines bactéries sulfureuses telles que *Thiobacillus* ou *Beggiatoa* sont capables d'oxyder le H₂S en soufre élémentaire (S⁰), puis en sulfate (SO₄²⁻), forme minérale soluble du soufre. Ce sulfate est assimilé par les plantes et les micro-organismes pour la biosynthèse de nouveaux acides aminés soufrés, bouclant ainsi la boucle de l'assimilation.

En milieu réducteur ou anaérobiose, d'autres micro-organismes, appelés bactéries sulfato-réductrices, tels que *Desulfovibrio desulfuricans*, utilisent les sulfates comme accepteurs terminaux d'électrons et les réduisent à nouveau en H₂S. Ce mécanisme, appelé réduction dissimilatrice, est typique des environnements privés d'oxygène tels que les sédiments aquatiques, les marais ou les réacteurs anaérobies. Il participe également à la

précipitation de métaux lourds sous forme de sulfures, contribuant à l'immobilisation de polluants métalliques dans les sols (Figure 26).

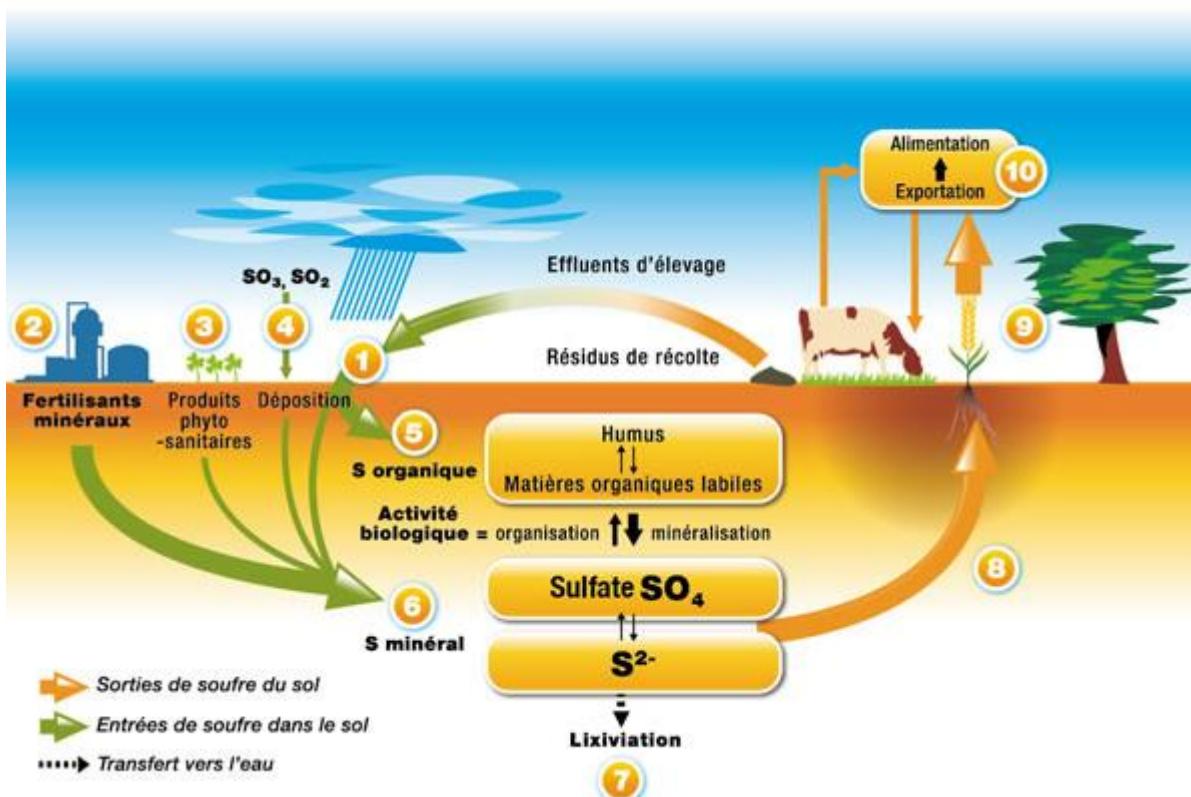


Figure 26. Dégradation des protéines dans le cycle du soufre.

IV.3. Interactions écologiques entre les cycles

Les cycles de l'azote et du soufre sont fortement interdépendants dans les écosystèmes. Ils impliquent des processus microbiens similaires (dégradation organique, oxydation, réduction) qui se déroulent souvent dans les mêmes compartiments environnementaux, comme les sols, les sédiments ou les systèmes de traitement des eaux. Les produits issus de l'un peuvent inhiber ou stimuler les réactions de l'autre. Par exemple, le H_2S formé dans le cycle du soufre peut inhiber l'activité des bactéries nitrifiantes aérobies, réduisant l'efficacité du cycle de l'azote en zones anaérobies.

Dans les milieux humides, les fosses septiques, les stations d'épuration et les biotopes naturels riches en matière organique, ces cycles permettent la stabilisation de la matière, la dégradation des polluants azotés et soufrés, et la remise en circulation des nutriments nécessaires à la croissance des végétaux. Ils participent également à la régulation des émissions de gaz d'origine biologique, comme le N_2 , le N_2O ou le H_2S , dont certains ont un impact direct sur le climat ou la santé humaine.

IV.4. Importance écologique et applications

La compréhension de ces cycles microbien-dépendants est cruciale pour de nombreuses applications.

En agriculture, elle permet d'améliorer la fertilisation naturelle des sols tout en limitant les apports d'engrais chimiques.

En assainissement, elle est utilisée pour optimiser le fonctionnement des systèmes biologiques de traitement des eaux usées, notamment dans les procédés de nitrification-dénitrification et dans les digesteurs anaérobies.

En bioremédiation, elle permet de concevoir des solutions basées sur les micro-organismes pour éliminer ou immobiliser des polluants organiques ou métalliques.

Enfin, sur le plan sanitaire, le contrôle des émissions gazeuses issues de la décomposition microbienne est essentiel pour éviter les nuisances olfactives, la toxicité de l'air ambiant et la dégradation des écosystèmes aquatiques.

La dégradation microbienne des protéines, à travers les cycles de l'azote et du soufre, illustre la complexité et la synergie des processus biologiques au sein de l'environnement. Ces mécanismes assurent le recyclage des éléments nutritifs, la purification naturelle des milieux et la stabilité écologique globale. Une meilleure compréhension et une maîtrise technologique de ces processus ouvrent des perspectives concrètes pour améliorer la gestion durable des déchets, l'efficacité des traitements environnementaux et la prévention des impacts sanitaires liés à la pollution organique et minérale

V. Glucides

Les glucides sont des biomolécules constituées de carbone, d'hydrogène et d'oxygène.

Ils sont classés en trois catégories principales :

- ✓ **Monosaccharides** : Glucose ($C_6H_{12}O_6$), Fructose, Galactose
- ✓ **Disaccharides** : Saccharose ($C_{12}H_{22}O_{11}$), Lactose, Maltose
- ✓ **Polysaccharides** : Cellulose ($(C_6H_{10}O_5)_n$), Amidon, Glycogène

Les microorganismes exploitent ces glucides comme source d'énergie et de carbone, participant ainsi à divers processus biologiques et écologiques.

Le métabolisme des glucides par les microorganismes présente un potentiel important pour des applications environnementales.

V.1. Structure et propriétés des oses

V.1.1. Définition

Les oses (monosaccharides) sont les unités de base des glucides. Ce sont des polyalcools possédant une fonction aldéhyde (aldoses) ou cétone (cétooses).

Formule générale : $C_n(H_2O)_n$ ($n \geq 3$).

V.1.2. Structure

Les oses peuvent se présenter sous différentes formes (Figure 27)

➤ **Forme linéaire** : Formule de Fischer. Cette représentation met en évidence : le nombre d'atomes de carbone, la position des groupements hydroxyles ($-OH$) et la fonction chimique principale (aldéhyde ou cétone).

➤ **Forme cyclique** : En solution, la majorité des oses adoptent une forme cyclique par réaction intramoléculaire :

- Aldoses : la fonction aldéhyde réagit avec un groupe hydroxyle \rightarrow formation d'un hémiacétal.
- Cétooses : la fonction cétone réagit avec un groupe hydroxyle \rightarrow formation d'un hémicétal.

Deux principaux types de cycles :

- Pyranose : cycle à 6 atomes (5 carbones + 1 oxygène).
- Furanose : cycle à 5 atomes (4 carbones + 1 oxygène).

➤ Isomérie

Isomérie D/L (stéréochimie) : Déterminée par la position du $-OH$ sur le carbone asymétrique le plus éloigné de la fonction carbonyle.

- **D** : $-\text{OH}$ à droite dans la projection de Fischer.
- **L** : $-\text{OH}$ à gauche.
- Anomérie α/β (carbone anomérique)
 - Après cyclisation, le carbone anomérique (portant la fonction hémiacétalique) devient un centre asymétrique.
 - α : le $-\text{OH}$ du carbone anomérique est orienté à l'opposé du CH_2OH dans la projection de Haworth.
 - β : le $-\text{OH}$ du carbone anomérique est orienté du même côté que le CH_2OH .

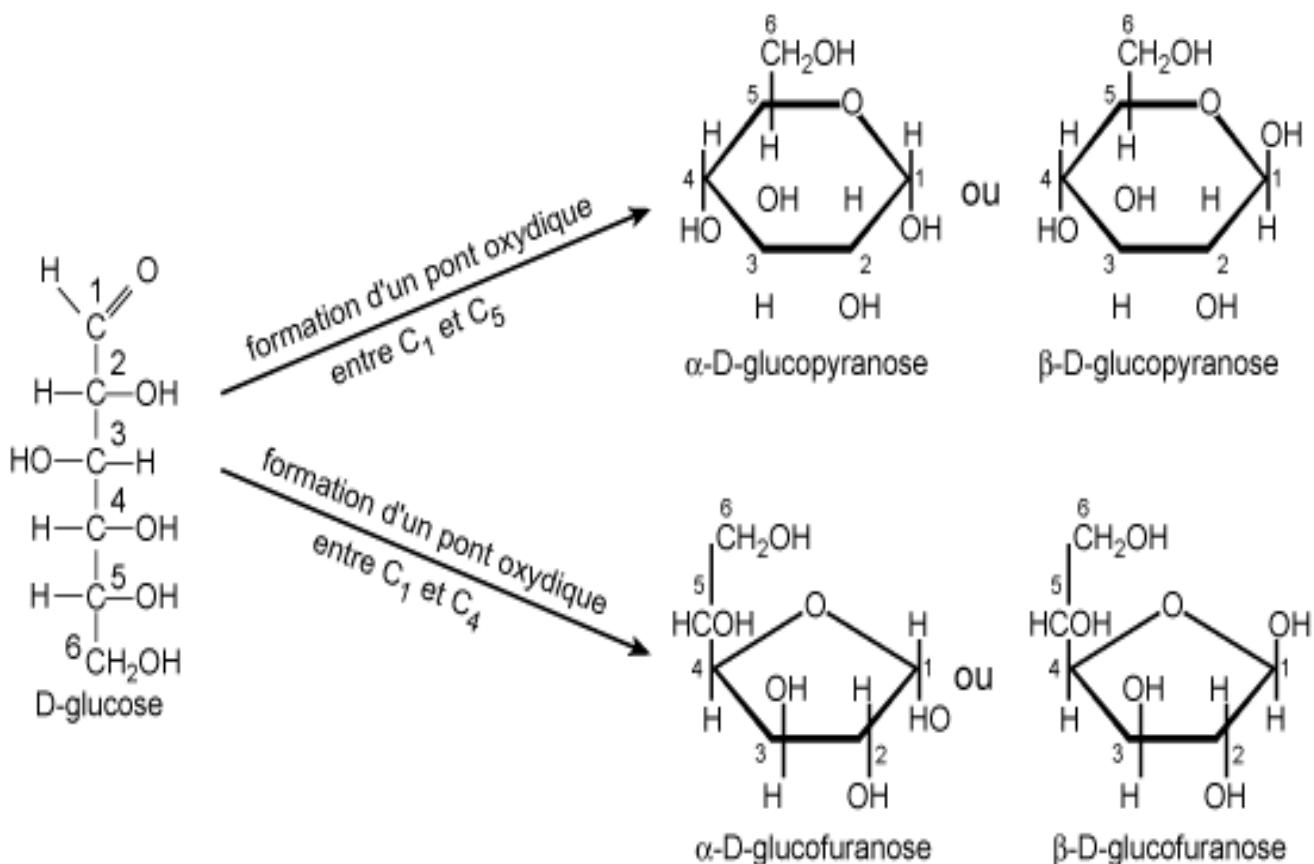


Figure 27. Structure des oses (Linéaire, cyclique et isomères).

V.1.3. Classification

V.1.3.1. Selon le nombre de carbone : Les oses sont classés en fonction du nombre d'atomes de carbone dans leur squelette (Tableau XI)

Tableau XI. Classification des oses selon le nombre d'atome de carbone.

Nombre de carbones	Nom	Exemples
3 carbones	Trioses	Glycéraldéhyde, Dihydroxyacétone
4 carbones	Tétroses	Érythrose, Érythrulo
5 carbones	Pentoses	Ribose, Arabinose, Ribulose, Xylulose
6 carbones	Hexoses	Glucose, Galactose, Mannose, Fructose
7 carbones	Heptoses	Sédochéptulose
8 carbones	Octoses	Acide neuraminique (dérivé)
9 carbones	Nonoses	Acide sialique

V.1.3.2. Selon la fonction chimique :

Les oses peuvent également être classés en fonction du groupe fonctionnel principal présent (Tableau XII)

Tableau XII. Classification des oses selon fonction chimiques.

Type	Fonction chimique	Exemples
Aldoses	Aldéhyde (-CHO) sur le carbone 1.	Glycéraldéhyde, Ribose, Glucose, Galactose, Mannose
Cétoses	Cétone ($>C=O$) généralement sur le carbone 2.	Dihydroxyacétone, Ribulose, Xylulose, Fructose, Sédochéptulose

V.1.4. Propriétés des oses**V.1.4.1. Propriétés physiques**

- Aspect** : Solides cristallins, incolores.
- Solubilité** : Très solubles dans l'eau grâce aux nombreuses fonctions hydroxyle (-OH).
- Goût** : Généralement sucré (fructose le plus sucré).
- Pouvoir rotatoire** : Ils dévient le plan de la lumière polarisée (activité optique), peuvent être **D** ou **L** selon la configuration.
- Hygroscopicité** : Capacité à absorber l'humidité de l'air.

V.1.4.2. Propriétés chimiques

- **Propriétés réductrices** : Les aldoses et la plupart des cétooses réduisent les ions Cu^{2+} (réaction de Fehling/Benedict) et Ag^+ (réaction du miroir d'argent).
- **Mutarotation** : Changement spontané du pouvoir rotatoire en solution dû à l'équilibre entre les formes α et β cycliques et la forme linéaire.
- **Formation de liaisons glycosidiques** : Les oses peuvent s'unir à d'autres oses ou à des composés non glucidiques.
 - **Réactions d'oxydation** : Oxydation douce → acides aldoniques / oxydation forte → acides aldariques.
 - **Réactions de réduction** : Donnent des polyols (ex. glucose → sorbitol).
 - **Réactions avec les amines** : Formation de bases de Schiff (principe du dosage de certains sucres).

V.1.4.3. Propriétés biologiques

- **Source d'énergie immédiate** (Glucose → Glycolyse).
- **Rôle structural** (Ribose dans l'ARN, Désoxyribose dans l'ADN).
- **Précurseurs métaboliques** pour de nombreuses molécules (Acides aminés, Lipides, Nucléotides).
- **Participation à la reconnaissance cellulaire** Via les glycoprotéines et les glycolipides.

V.2. Structure et propriétés des glucides

V.2.1. Définition générale

Les glucides sont des molécules organiques servant avant tout de source d'énergie. Chez l'être humain, ils représentent la principale source de carburant rapide, car ils sont facilement dégradés en glucose, la forme utilisable par les cellules. Ils sont retrouvés dans de nombreux aliments : fruits, légumes, céréales, légumineuses, produits sucrés, etc.

V.2.2. Classification

On distingue plusieurs types de glucides :

- **Glucides simples**
 - *Monosaccharides* (Glucose, Fructose, Galactose)
 - *Disaccharides* (Saccharose, Lactose, Maltose) → Assimilation rapide, goût sucré marqué.
- **Glucides complexes**
 - *Oligosaccharides* (Courtes Chaînes De Sucres)

- *Polysaccharides* (Amidon, Glycogene, Cellulose) → Digestion plus lente, libération progressive de l'énergie.

V.2.3. Propriétés des glucides

V.2.3.1. Propriétés physiques

- a. **Solubilité** : Les glucides simples sont généralement solubles dans l'eau (goût sucré).
 - a. Les polysaccharides peuvent être insolubles (ex. cellulose) ou former des gels (amidon).
- b. **Goût** : Les monosaccharides et certains disaccharides ont un goût sucré, avec intensité variable (fructose > saccharose > glucose > lactose).
- c. **Pouvoir rotatoire** : Certains glucides dévient la lumière polarisée (dextrogyres ou lévogyres).

V.2.3.2. Propriétés chimiques

- a. **Réductrices** : Certains glucides (Glucose, Maltose, Lactose) possèdent un groupement aldéhyde ou cétone libre et peuvent réduire des ions métalliques (réaction de Fehling ou Benedict).
- b. **Hydrolysables** : Les disaccharides et polysaccharides peuvent être hydrolysés en sucres simples sous l'action d'enzymes ou d'acides.
- c. **Formation de liaisons glycosidiques** : Liaison entre deux sucres ou entre un sucre et une autre molécule (lipide, protéine).

V.2.3.3. Propriétés biologiques

- a. **Rôle énergétique rapide** : Libération immédiate de glucose.
- b. **Réserve énergétique** : Stockage à court terme (glycogène) ou à long terme (amidons dans les plantes).
- c. **Rôle structural** : Cellulose chez les plantes, chitine chez les insectes et crustacés.
- d. **Rôle fonctionnel** : Implication dans la reconnaissance cellulaire (glycoprotéines, glycolipides).

V.3. Dégradation microbienne des déchets cellulosiques et cycle du carbone

La cellulose est un polymère de glucose lié par des liaisons β -1,4-glycosidiques, insoluble et résistant, constituant la majeure partie de la biomasse végétale. Sa dégradation est un élément clé du cycle global du carbone, car elle libère le carbone fixé par la photosynthèse.

Les déchets cellulosiques proviennent principalement des :

- **Résidus agricoles** : Tiges, balles de céréales, canne à sucre, maïs.
- **Déchets forestiers** : Copeaux de bois, sciure.

- **Déchets urbains** : papier, carton.
- **Sous-produits industriels** : Pulpe de betterave, résidus de textile à base de coton.

V.3.1. Mécanisme d'action des microorganismes sur les déchets cellulosiques

La décomposition des déchets cellulosiques implique plusieurs étapes successives, réalisées par différents micro-organismes (Bactéries, Champignons, Actinomycètes) producteurs d'enzymes spécifiques (Tableau XIII) :

Tableau XIII. Groupes microbiens et enzymes produites.

Groupe microbien	Exemples d'espèces	Enzymes produites
Champignons	<i>Trichoderma reesei</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Penicillium</i> spp., <i>Chaetomium globosum</i>	Endoglucanases, Exoglucanases (cellobiohydrolases), β -Glucosidases
Bactéries	<i>Clostridium thermocellum</i> , <i>Cellulomonas fimi</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	Endoglucanases, Exoglucanases, β -Glucosidases, Cellulosomes
Actinomycètes	<i>Streptomyces</i> spp.	Endoglucanases, Hémicellulases, β -Glucosidases

V.3.1.1. Hydrolyse enzymatique

- Les champignons (*Trichoderma reesei*, *Aspergillus niger*, *Penicillium* spp., *Chaetomium globosum*) sécrètent principalement des Endoglucanases, Exoglucanases (cellobiohydrolases) et β -Glucosidases.
- Les bactéries (*Clostridium thermocellum*, *Cellulomonas fimi*, *Bacillus subtilis*) produisent des cellulases similaires, souvent organisées en cellulosomes pour une action synergique.
- Les actinomycètes (*Streptomyces* spp.) libèrent des Endoglucanases, des hémicellulases (pour attaquer les polysaccharides associés) et des β -glucosidases.

Ces enzymes fragmentent les chaînes de cellulose en unités plus petites, notamment la cellobiose.

a. Production de sucres simples

Les β -glucosidases transforment la cellobiose en glucose, utilisable par les micro-organismes comme source d'énergie et de carbone.

b. Fermentation ou respiration

- **En conditions aérobies** : le glucose est oxydé, produisant du CO₂, de la chaleur et des composés humiques (compostage).
- **En conditions anaérobies** : il est fermenté pour donner des acides organiques, de l'éthanol ou du méthane (méthanisation).

V.3.1.2. Cycle du carbone

La dégradation microbienne des déchets cellulosiques joue un rôle central dans le cycle du carbone (Figure 28), car elle assure le retour du carbone organique des végétaux vers l'atmosphère, le sol ou d'autres réservoirs, fermant ainsi la boucle de circulation du carbone.

➤ **En milieu aérobie**, les champignons filamenteux tels que *Aspergillus niger* ou *Penicillium* spp., ainsi que des bactéries aérobies comme *Bacillus subtilis* ou *Cellulomonas fimi*, sécrètent des cellulases comprenant des endoglucanases (couplant aléatoirement les chaînes internes de cellulose), des exoglucanases ou cellobiohydrolases (libérant la cellobiose aux extrémités) et des β -glucosidases (hydrolysant la cellobiose en glucose). Ce glucose est ensuite oxydé par la respiration cellulaire en dioxyde de carbone (CO₂) et eau, tout en générant de l'ATP, ce qui permet une minéralisation rapide de la matière organique et enrichit les sols en nutriments assimilables.

➤ **En conditions anaérobies**, comme dans les marais, les sédiments, les fosses septiques ou les digesteurs, des bactéries fermentaires telles que *Clostridium thermocellum* ou *Ruminococcus albus* produisent également des cellulases (Endoglucanases, Exoglucanases et β -glucosidases) pour hydrolyser la cellulose en glucose, puis fermentent ce glucose en acides organiques, alcools et hydrogène. Ces produits intermédiaires sont ensuite utilisés par des archées méthanogènes, comme *Methanobacterium formicicum* ou *Methanosarcina barkeri*, qui possèdent des enzymes clés de la méthanogenèse telles que la méthyl-coenzyme M réductase (MCR) et l'acétyl-CoA décaboxylase/synthase, permettant la production de méthane soit par voie hydrogénotrophe (réduction du CO₂ avec H₂) soit par voie acétoclastique (dégradation de l'acétate). Ce processus contribue aux émissions naturelles de CH₄, un gaz à effet de serre majeur.

Les principaux processus du cycle du carbone comprennent :

- **Photosynthèse**, qui fixe le carbone atmosphérique (CO₂) sous forme organique dans les végétaux ;
- **Respiration aérobie et la fermentation**, qui libèrent ce carbone dans l'atmosphère ou le sol ;

- **Décomposition microbienne**, qui transforme la matière organique morte en humus et gaz ;
- **Séquestration du carbone**, dans les sols et les sédiments, où il peut rester immobilisé pendant des siècles.

Les échanges constants entre ces réservoirs assurent la régulation du CO₂ atmosphérique, influencent la fertilité des sols et participent aux cycles de l'eau et de l'énergie.

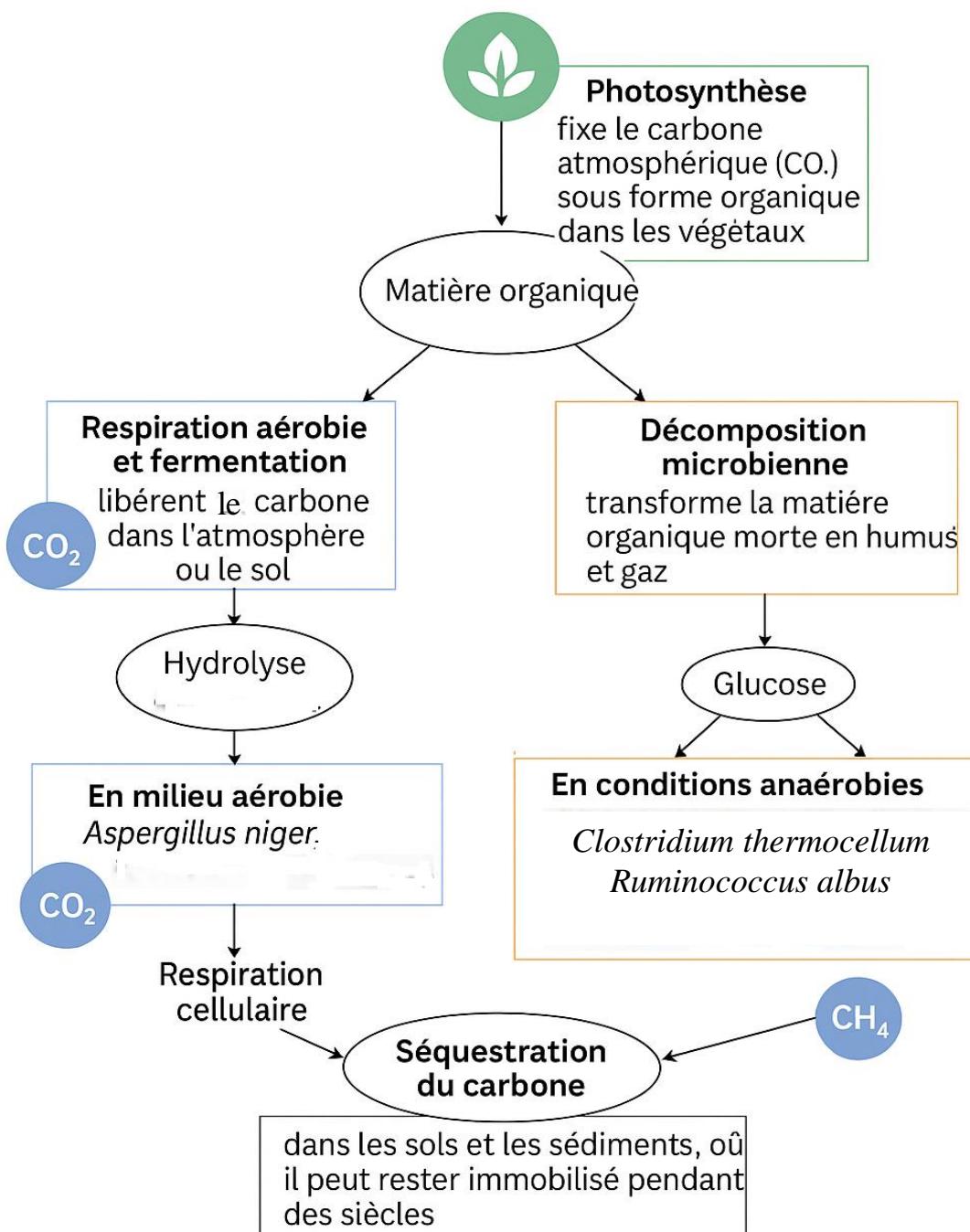


Figure 28. Dégradation microbienne des déchets cellulaires dans le cycle du carbone.

V.4. Transport d'électrons et cycle du phosphore et de l'oxygène

V.4.1. Transport d'électrons

Le transport d'électrons est un processus biochimique essentiel à la production d'énergie dans les cellules. Il se déroule principalement dans :

- La membrane interne mitochondriale (chez les eucaryotes)
- La membrane plasmique (chez certaines bactéries)
- Les thylakoïdes des chloroplastes (chez les plantes et cyanobactéries, pendant la photosynthèse)

➤ **Principe :**

- Des molécules riches en électrons (comme le NADH ou le FADH₂) donnent leurs électrons à une chaîne de transporteurs (complexes protéiques et coenzymes).
- Les électrons passent de transporteur en transporteur, libérant de l'énergie qui sert à pomper des protons (H⁺) de part et d'autre de la membrane.
- Ce gradient de protons alimente l'ATP synthase, produisant de l'ATP (phosphorylation oxydative en respiration ou photophosphorylation en photosynthèse).
- Dans la respiration aérobie, l'accepteur final des électrons est l'oxygène, qui forme de l'eau.

V.4.2. Cycle du phosphore

Le phosphore (P) est un élément essentiel pour l'ADN, l'ARN, l'ATP et les membranes (phospholipides). Son réservoir principal sont des roches phosphatées. Les étapes clés du cycle sont :

- ✓ Altération des roches → libération des ions phosphates (PO₄³⁻) dans le sol et l'eau.
- ✓ Absorption par les plantes → intégration dans les molécules biologiques.
- ✓ Transmission dans la chaîne alimentaire → herbivores → carnivores.
- ✓ Décomposition → libération de phosphates dans le sol ou l'eau.
- ✓ Sédimentation → retour au réservoir rocheux après des millions d'années.

V.4.3. Cycle de l'oxygène

L'oxygène (O₂) circule entre l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère. Sa source de production est la photosynthèse (plantes, algues, cyanobactéries) qui mène à la libération d'O₂ à partir de l'eau. Les étapes clés du cycle sont :

- ✓ **Production :** L'O₂ atmosphérique est produit principalement par la photosynthèse, grâce aux plantes, algues et cyanobactéries, qui libèrent de l'oxygène à partir de la photolyse de l'eau.

- ✓ **Utilisation biologique et chimique** : L'oxygène est consommé par les organismes lors de la respiration cellulaire et intervient aussi dans divers processus chimiques, comme l'oxydation des minéraux.
- ✓ **Échanges avec les milieux aquatiques** : Une partie de l'O₂ atmosphérique se dissout dans l'eau, où il circule et soutient la respiration des organismes aquatiques.

VI. Lipides

Les lipides sont des biomolécules composées principalement de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Ils sont classés en plusieurs catégories :

- ✓ **Acides gras** : saturés (ex. acide palmitique) et insaturés (ex. acide oléique)
- ✓ **Triglycérides** : stockage d'énergie
- ✓ **Phospholipides** : composants des membranes biologiques
- ✓ **Stérols et isoprénoides** : cholestérol, hopanoïdes chez les bactéries

Les microorganismes utilisent ces lipides comme source d'énergie et de carbone, jouant un rôle clé dans divers processus biologiques et écologiques.

VI.1 Structure et propriétés des acides gras

Les acides gras sont des acides carboxyliques à longue chaîne hydrocarbonée. Ils constituent les unités de base des lipides simples (triglycérides) et complexes (phospholipides, glycolipides) (Tableau XIV).

Formule générale : R-COOH, où R est une chaîne aliphatique de 4 à 36 atomes de carbone.

Tableau XIV : Types d'acide gras.

Nom de l'acide gras	Formule brute	Structure simplifiée
Acide butyrique	C ₄ H ₈ O ₂	CH ₃ —CH ₂ —CH ₂ —COOH
Acide laurique	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	CH ₃ —(CH ₂) ₁₀ —COOH
Acide myristique	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	CH ₃ —(CH ₂) ₁₂ —COOH
Acide palmitique	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	CH ₃ —(CH ₂) ₁₄ —COOH
Acide stéarique	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	CH ₃ —(CH ₂) ₁₆ —COOH
Acide oléique	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	CH ₃ —(CH ₂) ₇ —CH=CH—(CH ₂) ₇ —COOH
Acide linoléique	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	CH ₃ —(CH ₂) ₄ —CH=CH—CH ₂ —CH=CH—(CH ₂) ₇ —COOH
Acide α -linolénique	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	CH ₃ —CH ₂ —CH=CH—CH ₂ —CH=CH—CH ₂ —CH=CH—(CH ₂) ₇ —COOH
Acide arachidonique	C ₂₀ H ₃₂ O ₂	CH ₃ —(CH ₂) ₄ —(CH=CH—CH ₂) ₄ —(CH ₂) ₂ —COOH

VI.1.1. Structure des acides gras

Les acides gras présentent des parties constitutives

- Tête polaire : groupement carboxyle $-\text{COOH}$ (hydrophile, acide faible).
- Queue apolaire : chaîne hydrocarbonée $**(-\text{CH}_2-)**_n$ (hydrophobe).

VI.1.2. Classification selon la saturation

VI.1.2.1. Acides gras saturés

- Pas de doubles liaisons $\text{C}=\text{C}$
- Chaîne droite, empilement facile \rightarrow solides à température ambiante
- Exemples : acide palmitique (C16:0), acide stéarique (C18:0)

VI.1.2.2. Acides gras insaturés

- Une ou plusieurs doubles liaisons $\text{C}=\text{C}$
- Monoinsaturés (1 double liaison) : acide oléique (C18:1 $\Delta 9$)
- Polyinsaturés (≥ 2 doubles liaisons) : acide linoléique (C18:2 $\Delta 9,12$), acide α -linolénique (C18:3 $\Delta 9,12,15$)
- Configuration *Cis* (naturelle) ou *Trans* (produits industriels)

VI.1.3 Propriétés des acides gras

VI.1.3.1. Propriétés physiques

- **État physique** : Saturés solides / insaturés liquides
- **Point de fusion** : Augmente avec la longueur de chaîne / diminue avec le nombre de doubles liaisons
- **Solubilité** : Insolubles dans l'eau mais solubles dans les solvants organiques
- **Odeur et goût** : Certains acides gras courts sont volatils et odorants (acide butyrique)

VI.1.3.2. Propriétés chimiques

- **Acidité** : pKa du $-\text{COOH} \approx 4,8$ (acide faible)
- **Hydrogénéation** : Saturation des doubles liaisons \rightarrow formation de graisses solides (margarine)
- **Oxydation** : Auto-oxydation des insaturés \rightarrow rancissement
 β -oxydation \rightarrow production d'ATP
- **Estéification** : Formation de triglycérides ou phospholipides avec des alcools
- **Saponification** : Hydrolyse basique des triglycérides \rightarrow savons + glycérol

VI.1.3.3. Propriétés biologiques

- **Rôle énergétique** : 1 g = ~ 9 kcal (37 kJ)
- **Réserve** : Stockage sous forme de triglycérides dans les tissus adipeux

- **Structure :** Composant essentiel des membranes (phospholipides, glycolipides)
- **Précurseurs :** Hormones (prostaglandines, leucotriènes), vitamines liposolubles.

VI.2. Structure et propriétés des lipides

Les lipides sont un ensemble de molécules organiques hydrophobes ou amphiphiles, riches en carbone et hydrogène, avec peu d'oxygène. Ils regroupent les graisses, huiles, cires, stéroïdes, phospholipides, etc. Ils sont insolubles dans l'eau mais solubles dans les solvants organiques.

VI.2.1. Structure des lipides

Les lipides sont constitués principalement de carbone (C), hydrogène (H) et oxygène (O), parfois phosphore (P), azote (N) ou soufre (S). Ils possèdent une partie hydrophobe (chaînes hydrocarbonées) et, pour certains, une partie hydrophile (groupes polaires).

Ils possèdent une organisation structurale selon différents types (simple, complexe, dérivés) (Tableau XV, Figure 29)

Tableau XV. Types de lipides.

Type de lipide	Constitution	Formule chimique générale
Lipides simples	Glycérol + 3 acides gras (triglycérides) ou alcool à longue chaîne + acide gras (cires)	Triglycéride : $C_3H_5(OOCR)_3$ Cire : $R-COO-R'$
Lipides complexes	Lipide simple + groupement phosphate ou sucre	Phospholipide : $C_3H_5(OOCR)_2-PO_4-X$ Glycolipide : Lipide-(Glc)n
Lipides dérivés	Dérivés des lipides simples/complexes, parfois sans acide gras	Stéroïde : $C_{17}H_{28}$ (noyau stérane à 4 cycles)

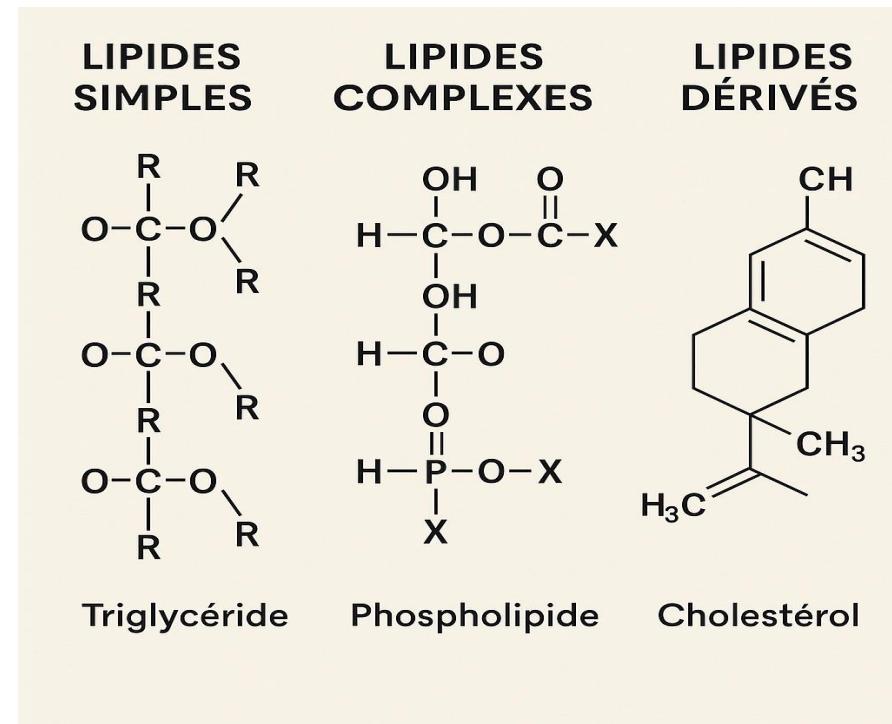


Figure 29. Structure des lipides.

VI.2.2. Propriétés des lipides

VI.2.2.1. Propriétés physiques

- **Insolubilité dans l'eau** : Hydrophobes, solubles dans les solvants organiques (éther, chloroforme, benzène).
- **État physique** : Graisses (AG saturés) solides à température ambiante ; huiles (AG insaturés) liquides.
- **Densité** : Inférieure à celle de l'eau (ils flottent).
- **Point de fusion** : Augmente avec la longueur de la chaîne carbonée et la saturation ; diminue avec plus de doubles liaisons.
- **Aspect** : Translucides, onctueux au toucher.

VI.2.2.2. Propriétés chimiques

- **Hydrolyse** :
 - **Enzymatique** → Libération d'acides gras et glycérol.
 - **Basique** (saponification) → Savons + Glycérol.
- **Hydrogénéation** : Saturation des doubles liaisons (margarine).
- **Oxydation** : Rancissement, altération des lipides insaturés.
- **Estérification** : Formation de triglycérides ou de cires.
- **Réactivité** : Liée aux groupements carboxyle ($-\text{COOH}$), hydroxyle ($-\text{OH}$), phosphate ($-\text{PO}_4^{3-}$).

VI.2.2.3. Propriétés biologiques

- **Réserve énergétique** : 1 g fournit environ 9 kcal (37 kJ), plus du double des glucides et protéines.
- **Rôle structural** : Composants essentiels des membranes cellulaires (phospholipides, cholestérol, glycolipides).
- **Isolation** : Protection thermique (graisse sous-cutanée) et mécanique (autour des organes).
- **Signalisation** : Précurseurs d'hormones stéroïdiennes, prostaglandines, leucotriènes.
- **Transport** : Véhiculer des vitamines liposolubles : A, D, E, K.
- **Rôle flottabilité** : Chez certains animaux aquatiques, les lipides réduisent la densité corporelle pour aider à flotter.

VI.3. Dégradation microbienne des résidus pétroliers : cas des n-alcanes

Les résidus pétroliers sont des mélanges complexes d'hydrocarbures, dont une part importante est constituée de n-alcanes (C_nH_{2n+2} : hydrocarbures saturés linéaires, Figure 30). Ces composés, bien que chimiquement stables, peuvent être biodégradés par certains microorganismes spécialisés, contribuant à l'épuration naturelle des milieux pollués.

La biodégradation des n-alcanes se fait principalement en aérobiose, grâce à des bactéries et champignons hydrocarbonoclastiques selon plusieurs étapes (Figure 31)

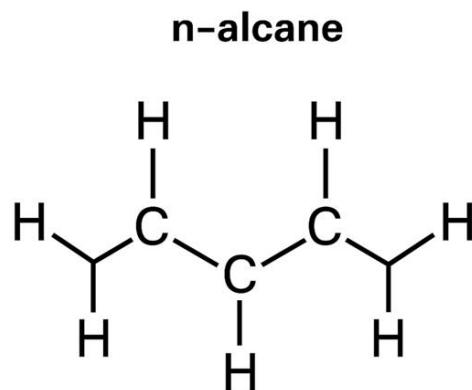


Figure 30. Structure chimique d'un n-alcane.

a) Activation initiale (oxydation de l'alcane)

La première étape consiste à activer chimiquement la molécule de n-alcane, très stable, en l'oxydant. Cette oxydation se fait au niveau du carbone terminal (ω -oxydation) ou subterminal ($\omega-1$ oxydation) grâce à des mono-oxygénases ou dioxygénases. Ces enzymes introduisent un atome d'oxygène dans la chaîne carbonée pour former un alcool primaire. Les principaux microorganismes réalisant cette étape sont *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, ainsi que certaines levures comme *Candida tropicalis* et *Yarrowia lipolytica*.

b) Oxydation de l'alcool en aldéhyde

Une fois l'alcool primaire formé, il est oxydé en aldéhyde par l'action d'enzymes appelées alcool déshydrogénases. Cette transformation augmente la réactivité de la molécule et prépare l'étape suivante. Les bactéries telles que *Pseudomonas putida*, *Rhodococcus sp.*, et les levures comme *Candida tropicalis* participent activement à cette conversion, en utilisant l'alcool produit lors de l'activation initiale de la β -oxydation de l'acide gras

c) Oxydation de l'aldéhyde en acide gras

L'aldéhyde ainsi formé est ensuite converti en acide gras grâce à l'action d'aldéhyde déshydrogénases. Les bactéries du genre *Rhodococcus*, *Alcanivorax*, et les levures *Yarrowia lipolytica* sont particulièrement efficaces dans cette étape. Cette transformation est cruciale car elle rend la molécule compatible avec la voie métabolique de la β -oxydation, commune à la plupart des organismes vivants.

d) Cycle de Krebs

L'acétyl-CoA issu de la β -oxydation entre dans le cycle de Krebs (ou cycle de l'acide citrique), produisant du CO₂, de l'H₂O et de l'ATP. Cette énergie est utilisée par les microorganismes pour leur croissance et leur métabolisme.

Tous les microorganismes cités dans les étapes précédentes peuvent participer à cette phase finale, qui boucle la dégradation complète du n-alcane et contribue au recyclage du carbone dans l'environnement.

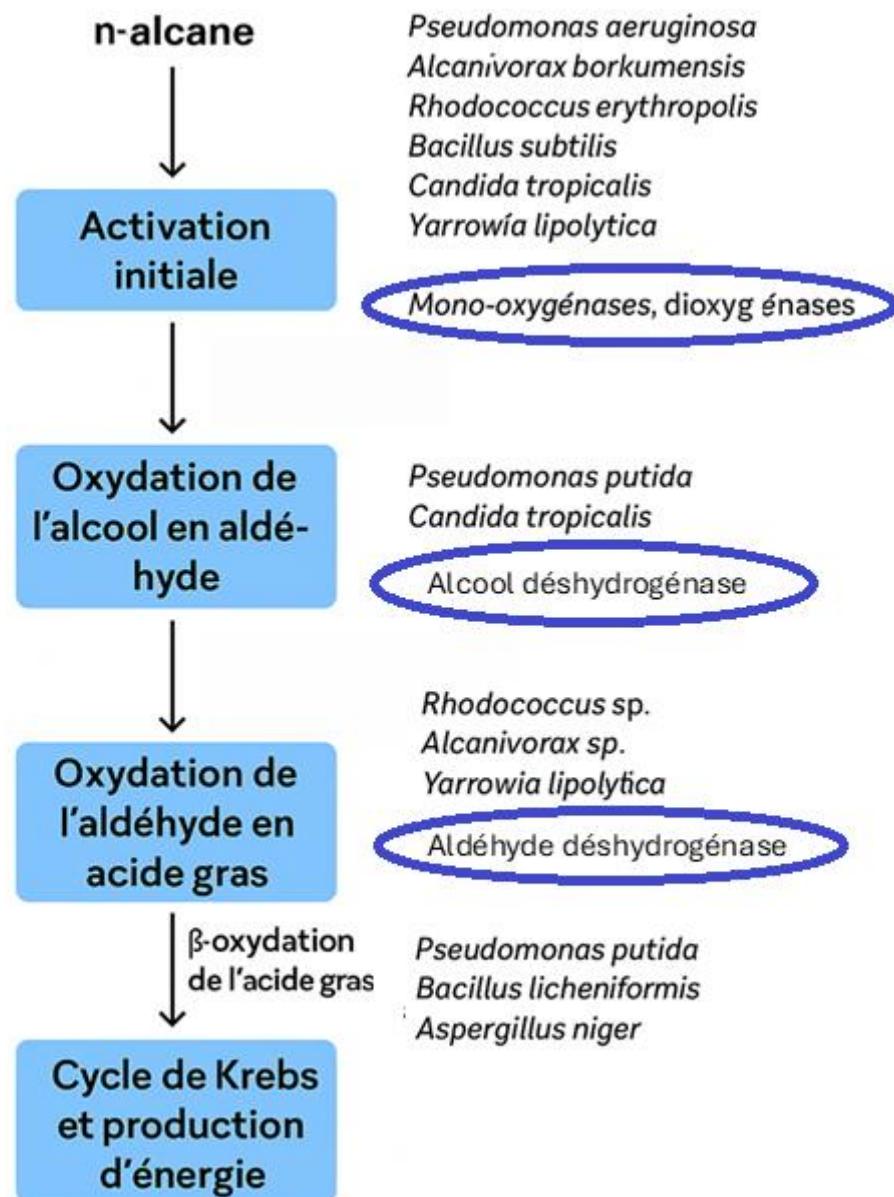


Figure 31. Etapes de dégradation microbienne des n-alcanes (enzymes et microorganismes impliqués).

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le présent cours de Microbiologie et Biochimie Environnementale a permis d'explorer les fondements essentiels de deux disciplines complémentaires : la microbiologie, science des micro-organismes, et la biochimie, science des processus chimiques à la base de la vie. L'objectif a été de fournir aux étudiants une vision intégrée du rôle des micro-organismes dans le fonctionnement des écosystèmes naturels, tout en les dotant des outils conceptuels nécessaires pour comprendre les mécanismes moléculaires qui régissent leur activité.

Dans la première partie du cours, la microbiologie a été abordée à travers l'étude de la morphologie, de la physiologie, et de l'écologie microbienne. L'accent a été mis sur la diversité des formes et des fonctions des micro-organismes, ainsi que sur leur implication dans les cycles biogéochimiques majeurs (carbone, azote, phosphore, soufre). L'étude de la microbiologie des sols, de l'air et des eaux a montré à quel point ces êtres microscopiques sont des acteurs clés de la biosphère, capables de transformer la matière, de recycler les nutriments, et d'influencer la qualité des milieux.

La seconde partie, consacrée à la biochimie, a permis d'analyser en détail les constituants moléculaires de la cellule vivante (eau, ions, glucides, lipides, protéines, acides nucléiques), les bases de la bioénergétique cellulaire, ainsi que le fonctionnement des enzymes et les grandes voies métaboliques. Cette partie a montré que la vie repose sur un réseau coordonné de réactions chimiques, constamment alimentées par des flux d'énergie et de matière.

Au-delà des connaissances théoriques, ce cours vise à stimuler la réflexion scientifique, à développer l'esprit critique, et à préparer les étudiants à des applications concrètes dans des domaines variés : environnement, santé, industrie, biotechnologie, agriculture durable.

En conclusion, comprendre les micro-organismes et leur biochimie, c'est mieux comprendre les mécanismes subtils de la vie et mieux se préparer à relever les défis actuels en matière de protection de l'environnement, de gestion des ressources naturelles, et de transition écologique. Ce cours constitue donc une base essentielle pour toute formation en sciences biologiques et environnementales.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- Atlas, R. M. & Bertha R. (1998). *Microbial Ecology: Fundamentals and Applications* (4th edition). Menlo Park, CA : Benjamin/Cummings, 694 p. ISBN :9788131713846, 8131713849
- Bertrand, J.C., Caumette, P., Lebaron, P., Matheron, R., Normand, P. & Sime-Ngando, T. (2011). *Écologie microbienne : microbiologie des milieux naturels et anthropisés*. Pau : Presses Universitaires de Pau et des Pays de l'Adour, 1002 p. ISBN :9782353110223, 2353110223
- Bitton, G. (2011). *Wastewater Microbiology* (4th edition). Hoboken, NJ : Wiley-Blackwell, 800 p. ISBN :9781118148150, 1118148150
- Després, V. R., Huffman, J. A., Burrows, S. M., Hoose, C., Safatov, A. S., Buryak, G., Fröhlich-Nowoisky, J., Elbert, W., Andreae, M. O., Pöschl, U., & Jaenicke, R. (2012). Primary biological aerosol particles in the atmosphere: A review. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 64(1), 15598.
- Doran P.M. (2013). *Bioprocess Engineering Principles*, Academic Press, 2^e edition Elsevier. ISBN 978-0-12-220851-5
- Weinman, S. (2004). *Toute la biochimie*. Paris : Dunod. 452 p. ISBN :9782100855339, 2100855336.
- Madigan M.T., Aiyer J., Buckley D.H., Sattley W.M., Stahl D.A. (2021). *Brock Biology of Microorganisms*, Global Edition. 16^e édition. Harlow : Pearson Education Limited. 1124 p. ISBN :9781292405063, 1292405066.
- Maier R.M. Pepper I.L. Gerba C.P. (2009). *Environmental Microbiology* (2^e edition). Academic Press-Elsevier Science, Amesterdam. 598p. ISBN 978-0-12-370519-8 ; 0123705193.
- Nelson, D. L., Cox, M. M. (2021). *Lehninger Principles of Biochemistry* (8th edition). W. H. Freeman & Macmillan Learning, New York. 1214 p. ISBN :9781319322342, 1319322344.
- Paolozzi, L., Liébart, J.-C., Arlat, M., Dion, M., & Rakotoarivonina, H. (2023). *Introduction à la microbiologie : microbiologie fondamentale et appliquée* (2^e édition). Paris : Dunod, 288 p. ISBN :9782100863099, 2100863096.
- Pelczar, M. J. Jr., Chan, E. C. S., & Krieg, N. R. (1993). *Microbiology: Concepts and Applications*. New York : McGraw-Hill, 896 p. ISBN :9780070492585, 0070492581.
- Pelmont J. (2008). *Glossaire de biochimie environnementale*. Edition: EDP Sciences, Paris. 1 026 p. ISBN :9782759800049, 2759800040.