

Bioénergétique

Chapitre 1

Introduction à la bioénergétique et aux types trophiques

V. Garlatti
virginie.garlatti@univ-tln.fr
Bureau U 025

2026

Définition : Métabolisme : processus global qui assure aux organismes vivants l'apport et l'utilisation de l'énergie libre dont ils ont besoin pour assurer leurs fonctions variées

PARTIE 1. PRINCIPES DE LA BIOÉNERGÉTIQUE

- ◇ Chimie pour la bioénergétique
- ◇ L'énergie cellulaire
- ◇ Production et utilisation d'énergie
- ◇ Deux grands types de voies

Chimie pour la bioénergétique

Chimie pour la bioénergétique

Les notions de chimie vues dans cette partie sont des notions déjà travaillées au cours de votre cursus. Dans l'espace moodle, vous trouverez des liens vers des cours unisciel afin de retravailler les notions si besoin.

Enthalpie libre

Définition : L'enthalpie libre (notée G) ou énergie de Gibbs est composée de l'enthalpie (H) qui est l'énergie totale, en Joule, à laquelle on soustrait le terme T que multiplie S , S étant l'entropie et T étant la température

$$\Delta G = G_{\text{produit}} - G_{\text{reactifs}}$$

soit la réaction : $\alpha A + \beta B \rightleftharpoons \gamma C + \delta D$ La variation d'énergie libre est :

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[C]^{\delta} [D]^{\delta}}{[A]^{\alpha} [B]^{\beta}}$$

Une réaction est favorable quand son ΔG est négatif et elle est à l'équilibre quand son $\Delta G = 0$

Enthalpie libre

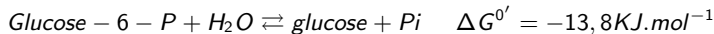
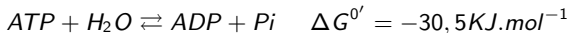
Exercice 1 : Enthalpie libre standard des réactions organiques

1. L'alcool déshydrogénase catalyse la réaction suivante :



La constante d'équilibre K de la réaction à 25°C est de $7,19 \cdot 10^9 \text{ mol/L}$. Calculez ΔG_0 ($R = 8,32 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

2. La première étape de glycolyse consiste à dégrader la molécule d'ATP en ADP et P_i afin de placer le P_i sur la carbone 6 du glucose. Calculer l'enthalpie libre de cette réaction sachant que :



Enthalpie libre des réactions redox et équation de Nerst

La thermodynamique des réactions redox est souvent exprimée en potentiel électrique ΔE .

soit la réaction : $A_{ox}^{n+} + B_{red} \rightleftharpoons A_{red} + B_{ox}^{n+}$

La variation d'énergie libre est :

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[A_{red}][B_{ox}^{n+}]}{[A_{ox}^{n+}][B_{red}]}$$

$$\Delta G = -w_{\text{electrique}} = -nF\Delta E$$

Une réaction redox est favorable quand son ΔE est positif

Enthalpie libre des réactions redox et équation de Nerst

A partir des équations précédentes, **démontrez l' équation de Nernst** :

$$\Delta E = \Delta E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[A_{red}][B_{ox}^{n+}]}{[A_{ox}^{n+}][B_{red}]}$$

Nombre d'oxydo-réduction

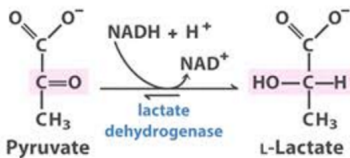
Le nombre redox permet de quantifier la capacité d'un atome à donner ou recevoir des électrons pour équilibrer sa couche de valence.

- ◇ **Atome isolé** : 0
- ◇ **Ion simple** : valeur algébrique de leur charge
- ◇ **Molécules et ions complexes** : dans un composé covalent le nombre d'oxydation de chaque élément correspond à la charge restant sur l'élément une fois les électrons de liaison attribués à l'atome le plus électronégatif.

Exercice

Exercice 2 : Réactions rédox

1. Soit la réaction suivante : $Cu^{2+} + Fe \leftrightarrow Fe^{2+} + Cu$. Donnez les demi-équations rédox ainsi que nombre d'oxydation de chaque espèce
2. Donnez le nombre d'oxydation des carbones dans le méthane, l'éthane, l'éthylène, l'acétate, l'éthanol, le formol
3. Donner les demi-équations rédox de la réaction suivante :



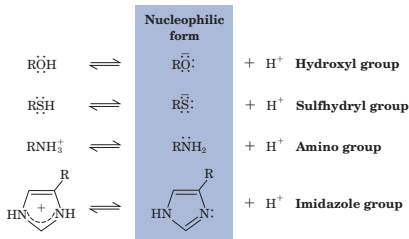
Rupture de liaison

- ◇ **rupture homolytique** : la paire d'électron de la liaison covalente se partage équitablement entre les deux atomes : on obtient des radicaux qui sont des espèces très réactives. Ceci est classique dans les réactions rédox.
- ◇ **rupture hétérolytique** : la paire d'électron est conservée par l'un des deux atomes. Dans ce cas, on obtient un anion et un cation suite à la rupture.

(VOET et VOET, 2021)

Electrophile versus nucléophile

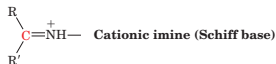
(a) Nucleophiles



(b) Electrophiles

H^+ **Protons**

M^{n+} **Metal ions**



(VOET et VOET, 2021)

Types de réactions

- ◇ Réactions de transfert de groupe
- ◇ Réaction d'oxydoréduction
- ◇ Réactions d'élimination, d'isomérisation et de réarrangement
- ◇ Formation de liaisons CC

(VOET et VOET, 2021)

L'énergie cellulaire

L'énergie cellulaire : des composés phosphorylés et des composés réduits comme monnaie d'échange

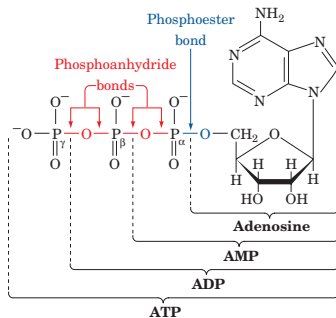
Les monnaies d'échange

- ◇ Les NTP : les nucléotides tri-phosphates dont LA molécule fournisseur universelle d'énergie est l'ATP.
- ◇ Les co-enzymes réduits : NADH, NAPH et FADH₂.

(VOET et VOET, 2021)

└ L'énergie cellulaire : des composés phosphorylés et des composés réduits comme monnaie d'échange

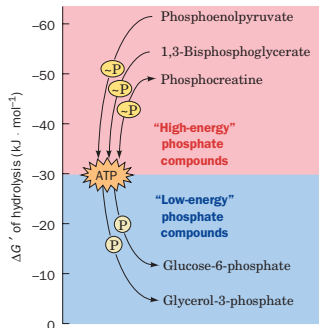
La molécule d'ATP



Les molécules phosphorylées

Compound	$\Delta G^{0'} \text{ (kJ} \cdot \text{mol}^{-1}\text{)}$
Phosphoenolpyruvate	-61.9
1,3-Bisphosphoglycerate	-49.4
ATP ($\rightarrow$ AMP + PP_i)	-45.6
Acetyl phosphate	-43.1
Phosphocreatine	-43.1
ATP ($\rightarrow$ ADP + P_i)	-30.5
Glucose-1-phosphate	-20.9
PP_i	-19.2
Fructose-6-phosphate	-13.8
Glucose-6-phosphate	-13.8
Glycerol-3-phosphate	-9.2

Source: Mostly from Jencks, W.P., in Fasman, G.D. (Ed.), *Handbook of Biochemistry and Molecular Biology* (3rd ed.), *Physical and Chemical Data*, Vol. I, pp. 296–304, CRC Press (1976).



(a) Les $\Delta G^{0'}$ des principales molécules phosphorylées (b) Place de l'ATP au sein des molécules phosphorylées

(VOET et VOET, 2021)

Utilisation ATP dans la cellule

Pas de réserve d'ATP :

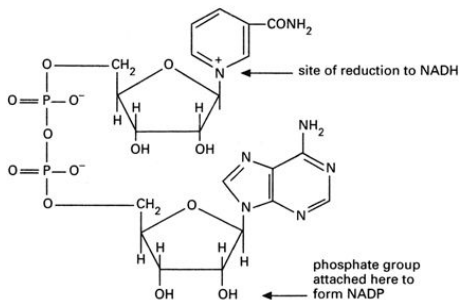
- ◇ Concentration stable ($\pm 10\%$)
- ◇ besoins de la cellule pendant une ou deux minutes

Utilisation de hydrolyse d'ATP :

- ◇ Réactions métaboliques :
- ◇ Voies de signalisation :
- ◇ Transports primaires :
- ◇ Cytosquelette

(VOET et VOET, 2021)

Place au niveau des potentiels redox



Half-Reaction	E° (V)
$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$	0.815
$\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$	0.42
Cytochrome $a_3(\text{Fe}^{3+}) + e^- \rightleftharpoons$ cytochrome $a_3(\text{Fe}^{2+})$	0.385
$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}_2$	0.295
Cytochrome $a(\text{Fe}^{3+}) + e^- \rightleftharpoons$ cytochrome $a(\text{Fe}^{2+})$	0.29
Cytochrome $c(\text{Fe}^{3+}) + e^- \rightleftharpoons$ cytochrome $c(\text{Fe}^{2+})$	0.235
Cytochrome $c_1(\text{Fe}^{3+}) + e^- \rightleftharpoons$ cytochrome $c_1(\text{Fe}^{2+})$	0.22
Cytochrome $b(\text{Fe}^{3+}) + e^- \rightleftharpoons$ cytochrome $b(\text{Fe}^{2+})$ (mitochondrial)	0.077
Ubiquinone + $2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ ubiquinol	0.045
Fumarate ⁻ + $2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ succinate ⁻	0.031
$\text{FAD} + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{FADH}_2$ (in flavoproteins)	-0.040
Oxaloacetate ⁻ + $2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ malate ⁻	-0.166
Pyruvate ⁻ + $2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ lactate ⁻	-0.185
Acetaldehyde + $2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ ethanol	-0.197
$\text{FAD} + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{FADH}_2$ (free coenzyme)	-0.219
$\text{S} + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2\text{S}$	-0.23
Lipoic acid + $2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ dihydrolipoic acid	-0.29
$\text{NAD}^+ + \text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{NADH}$	-0.315
$\text{NADP}^+ + \text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{NADPH}$	-0.320
Cystine + $2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ 2 cysteine	-0.340
Acetoacetate ⁻ + $2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ β -hydroxybutyrate ⁻	-0.346
$\text{H}^+ + e^- \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{H}_2$	-0.421
$\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{SO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$	-0.454
Acetate ⁻ + $3\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ acetaldehyde + H_2O	-0.581

Utilisation des cofacteurs réduits

Il existe trois grands co-facteurs réduits :

- ◇ le NADPH : source d'énergie dans les voies de biosynthèse
- ◇ le NADH : produit lors des voies cataboliques et utilisé par la chaîne respiratoire uniquement. Le trop plein de NADH dans le cytoplasme est absorbé par la fermentation.
- ◇ le FADH₂ : le plus souvent associé avec une enzyme, sert de transporteur d'électron transitoire.

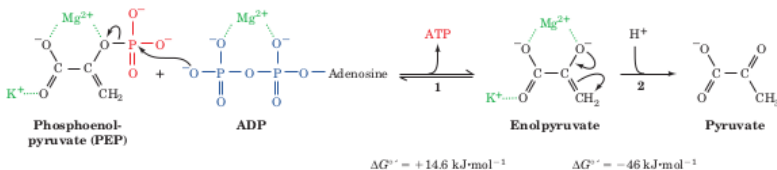
Production ou utilisation d'énergie

Production ou utilisation d'énergie

Couplage chimique

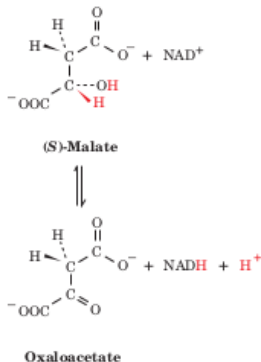
Définition : Le couplage chimique consiste à utiliser une réaction favorable pour fournir l'énergie à une réaction défavorable.

Dans le cas ci-dessous, l'oxydation du PEP en énoL-pyruvate fournit l'énergie pour phosphoryler un ADP en ATP (transfert de groupe). L'énergie de l'oxydation du PEP en énoLpyruvate est stockée dans l'ATP.



Couplage chimique

Dans le cas ci-dessous, l'oxydation du Malate fournit les électrons pour réduire le NAD^+ . Dans ce cas l'énergie, de l'oxydation du malate est stockée sous forme de NADH, H^+ .

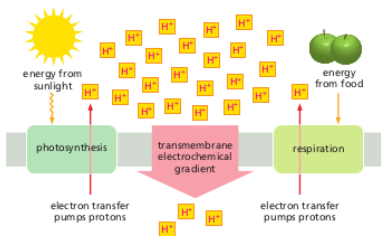


Couplage chimiosmotique

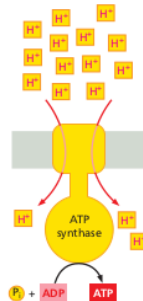
Définition : Le couplage chimio-osmotique consiste à stocker l'énergie de réaction dans un gradient de concentration ionique souvent en proton

Couplage chimiosmotique

L'énergie du transfert d'électron entre des couples redox permet de créer un gradient de concentration en proton : **l'énergie est stockée sous forme de gradient chimio-osmotique**



La dissipation du gradient chimio-osmotique dans l'ATP synthase permet la synthèse d'ATP : **l'énergie est stockée sous forme d'ATP.**



(VOET et VOET, 2021)

Deux grands types de voies métaboliques

Deux grands types de voies métaboliques

Voies métaboliques

Définition : Voie métabolique : série de réactions enzymatiques successives qui forment des produits spécifiques

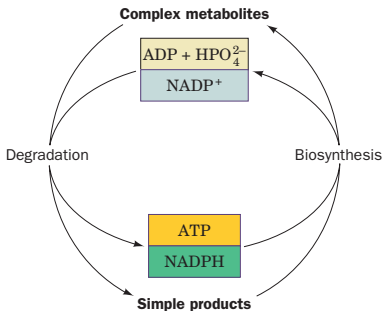
Définition : Métabolites : substrats, intermédiaires ou produits des voies métaboliques

Définition : Catabolisme : voies métaboliques qui assurent la synthèse d'énergie par la dégradation de métabolites complexes en métabolites simples. C'est un terme utilisé surtout pour les chimioorganotrophes qui utilisent les molécules organiques comme source d'énergie

Définition : Anabolisme : voies métaboliques qui assurent la biosynthèse. L'anabolisme consiste le plus souvent en réactions endergoniques (défavorables) qui sont possibles par couplage avec la dégradation de NTP ou du NADPH

Voies métaboliques

Chez les eucaryotes, seul les NTP et le NADPH peuvent fournir de l'énergie à l'anabolisme. Les autres coenzymes réduits servent d'intermédiaires entre les réactions redox du catabolisme et les chaînes de transfert d'électrons.



Voies métaboliques

Chez les eucaryotes, les voies métaboliques sont compartimentées dans les organites cellulaires.

Table 16-1 Metabolic Functions of Eukaryotic Organelles

Organelle	Function
Mitochondrion	Citric acid cycle, electron transport and oxidative phosphorylation, fatty acid oxidation, amino acid breakdown
Cytosol	Glycolysis, pentose phosphate pathway, fatty acid biosynthesis, many reactions of gluconeogenesis
Lysosomes	Enzymatic digestion of cell components and ingested matter
Nucleus	DNA replication and transcription, RNA processing
Golgi apparatus	Post-translational processing of membrane and secretory proteins; formation of plasma membrane and secretory vesicles
Rough endoplasmic reticulum	Synthesis of membrane-bound and secretory proteins
Smooth endoplasmic reticulum	Lipid and steroid biosynthesis
Peroxisomes (glyoxisomes in plants)	Oxidative reactions catalyzed by amino acid oxidases and catalase; glyoxylate cycle reactions in plants

Schéma Bilan

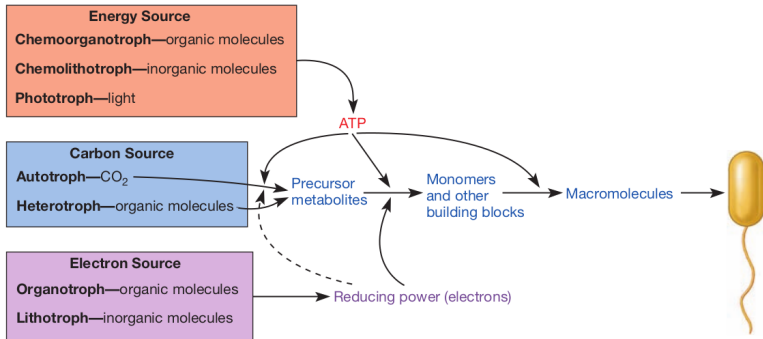
Schéma bilan 1 : Principes des échanges d'énergie cellulaire

Faites un schéma bilan sur la production et l'utilisation de l'énergie dans la cellule en incluant les lois de chimie.

PARTIE 2. LES TYPES TROPHIQUES

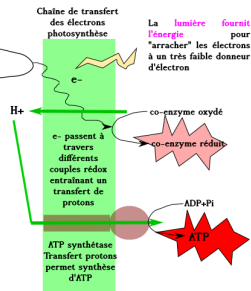
- ◇ Types trophiques et besoins des organismes
- ◇ Organisation du métabolisme dans les différents types trophiques

Besoins et types trophiques



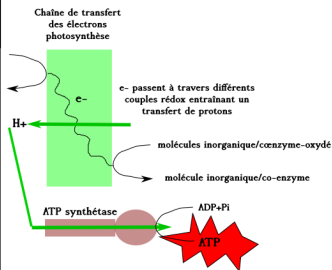
La phototrophie

PHOTOORGANOTROPHIE	PHOTOLITHOTROPHIE			Donneur électron "faible"
Donneur électron organique	Donneur électron inorganique			Niveau énergétique trop bas pour fournir seul de l'énergie
Molécule organique réduite (SUCCINATE)	Fe (II)	H ₂ S, S ⁰ , H ₂	H ₂ O	réduit
Molécule organique oxydée	Fe (III)	H ₂ S, S ⁰ , H ₂	O ₂	oxydé
Bactéries pourpre non sulfureuses	Photoferrotrophes	Bactéries pourpre sulfureuses	Cyanobactérie	Type micro-organisme
Rhodospirillaceae	<i>Chlorobium Rhodobacter</i>	<i>Thiospirillum</i>	<i>Chroococcus</i>	Exemple (genre)
				Exemple (espèce)
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	<i>Chlorobium ferrooxidans</i>	<i>Thiospirillum jenense</i>	<i>Chroococcus turgidus</i>	
Gram-negative, 0,8- 1 µm	Gram-negative, 0,5 x 1,0-1,5 µm	Gram-negative, 3 x 20 µm	Gram-negative, 20 µm	

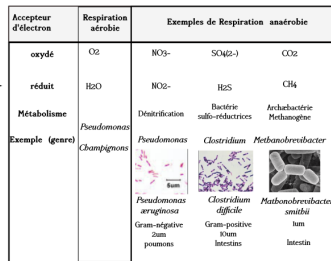


La chimiolithotrophie

Donneur électron inorganique "fort"			
Niveau énergétique suffisant pour fournir de l'énergie			
H ₂	H ₂ S, S ²⁻ , thiosulfate	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻
H ₂	sulfate, sulfites	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
Archéobactérie Méthanogène	sulfo-bactéries	Bactéries Nitrifiantes	Bactéries Nitrifiantes
<i>Méthanobacterium</i>	<i>Thiobacillus</i>	<i>Nitrosococcus</i>	<i>Nitrobacter</i>
			
<i>Méthanobacterium thermoautotrophicum</i>	<i>Thiobacillus thiophilus</i>	<i>Nitrosococcus wardiae</i>	<i>Nitrobacter agilis</i>
2.5 µm	gram-negative 1 µm	gram-negative 1 µm	gram-negative 1 µm



.ifs



La chimioorganotrophie

Exercice 3 : Comparaison du rendement énergétique de la respiration aérobie et anaérobie (coutouly travaux 2012)

La bactérie dénitrifiante est une bactérie chimio-organotrophe anaérobie stricte. Elle possède néanmoins une chaîne de transporteurs d'électrons lui permettant de respirer avec comme accepteur final d'électron est l'ion nitrate (NO_3^-) qui est réduit en nitrite (NO_2^-). La dégradation des sucres mène à la production de NADH qui alimente la chaîne respiratoire.

1. Écrire l'équation bilan de la chaîne respiratoire
2. Calculer la variation d'enthalpie libre standard
3. Comparer à la variation d'enthalpie de la respiration avec comme accepteur final l'oxygène.

Données : $E'_{0(\text{NADH}/\text{NAD}^+)} = -0,32\text{V}$, $E'_{0(\frac{1}{2}\text{O}_2/\text{H}_2\text{O})} = 0,81\text{V}$,

$E'_{0(\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-)} = 0,42\text{V}$, $F = 96500\text{C}$

Auto ou hétérotrophie

Obtention molécules complexes : voies anaboliques métabolismes assimilatifs

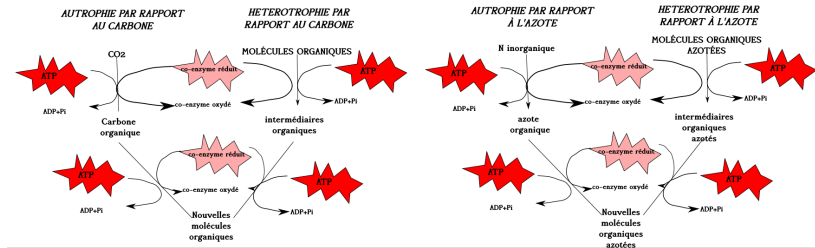


Schéma bilan

Schéma bilan 2 : Les types trophiques

Faites un schéma bilan sur les types trophiques

PARTIE 3. LES TYPES TROPHIQUES DANS LES ÉCOSYSTÈMES

- ◇ Rôle des métabolismes dans les cycles biogéochimiques
- ◇ Interactions des micro-organismes dans l'écosystème

Rôle des métabolismes dans les cycles biogéochimiques

Rôle des métabolismes dans les cycles biogéochimiques

Roches et micro-organismes

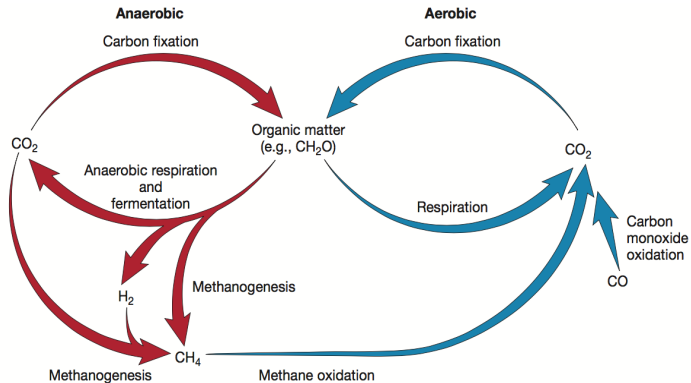
Roche	Micro-organisme	processus	date	Image
Pétrole	plancton	sédimentation océanique	20 à 350 millions d'années	
stromatolite	biofilms	précipitation carbonate autour de micro-organismes	3,8 milliards d'années à nos jours	
fer rubané	procaryotes et bio-films	Précipitation de fer autour de cohorte de bactéries feroxidante	Essentiellement avant apparition O ₂ (environ 2.34 milliards d'années) et un peu lors des épisodes de Terre boule de neige (700 et 500 millions d'années)	 (ENS lyon)
Calcaire oolithique	Micro-organisme planctonique et bio-films	Sédimentation de plateforme continentale	jusqu'à aujourd'hui	

Disponibilité des macro-élément dans l'environnement

Table 27.1 The Major Forms of Carbon, Nitrogen, Sulfur, and Iron Important in Biogeochemical Cycling						
Cycle	Significant Gaseous Component Present?	Major Forms and Valences				
		Reduced Forms	Intermediate Oxidation State Forms			Oxidized Forms
C	Yes	Methane: CH ₄ (−4)	Carbon monoxide CO (+2)			CO ₂ (+4)
N	Yes	Ammonium: NH ₄ ⁺ , organic N (−3)	Nitrogen gas: N ₂ (0)	Nitrous oxide N ₂ O (+1)	Nitrite: NO ₂ [−] (+3)	Nitrate: NO ₃ [−] (+5)
S	Yes	Hydrogen sulfide: H ₂ S, SH groups in organic matter (−2)	Elemental sulfur: S ⁰ (0)	Thiosulfate: S ₂ O ₃ ^{2−} (+2)	Sulfite: SO ₃ ^{2−} (+4)	Sulfate: SO ₄ ^{2−} (+6)
Fe	No	Ferrous iron: Fe ²⁺ (+2)				Ferric Iron: Fe ³⁺ (+3)
Note: The carbon, nitrogen, and sulfur cycles have significant gaseous components, and these are described as gaseous nutrient cycles. The iron cycle does not have a gaseous component, and this is described as a sedimentary nutrient cycle. Major reduced, intermediate oxidation state, and oxidized forms are noted, together with valences.						

Figure – Les formes inorganiques des macro-éléments selon leur degré d'oxydation (WILLEY et al., 2008)

Le cycle du carbone



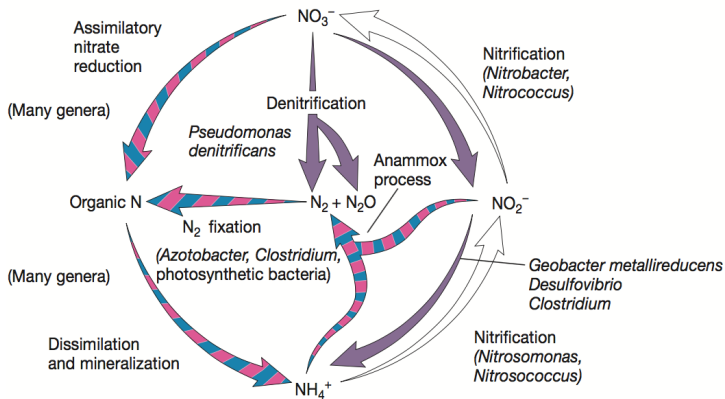
(WILLEY et al., 2008)

Décomposition de la matière organique

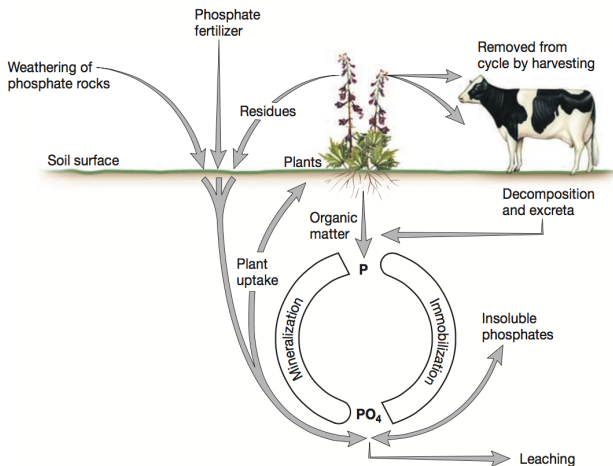
Table 27.2 Complex Organic substrate Characteristics That Influence Decomposition and Degradability									
Substrate	Basic Subunit	Linkages (if Critical)	Elements Present in Large Quantity					Degradation	
			C	H	O	N	P	With O ₂	Without O ₂
Starch	Glucose	$\alpha(1\rightarrow4)$ $\alpha(1\rightarrow6)$	+	+	+	–	–	+	+
Cellulose	Glucose	$\beta(1\rightarrow4)$	+	+	+	–	–	+	+
Hemicellulose	C6 and C5 monosaccharides	$\beta(1\rightarrow4)$, $\beta(1\rightarrow3)$, $\beta(1\rightarrow6)$	+	+	+	–	–	+	+
Lignin	Phenylpropene	C–C, C–O bonds	+	+	+	–	–	+	–
Chitin	<i>N</i> -acetylglucosamine	$\beta(1\rightarrow4)$	+	+	+	+	–	+	+
Protein	Amino acids	Peptide bonds	+	+	+	+	–	+	+
Hydrocarbon	Aliphatic, cyclic, aromatic		+	+	–	–	–	+	+ / –
Lipids	Glycerol, fatty acids; some contain phosphate and nitrogen	Esters, ethers	+	+	+	+	+	+	+
Microbial biomass		Varied	+	+	+	+	+	+	+
Nucleic acids	Purine and pyrimidine bases, sugars, phosphate	Phosphodiester and <i>N</i> -glycosidic bonds	+	+	+	+	+	+	+

(WILLEY et al., 2008)

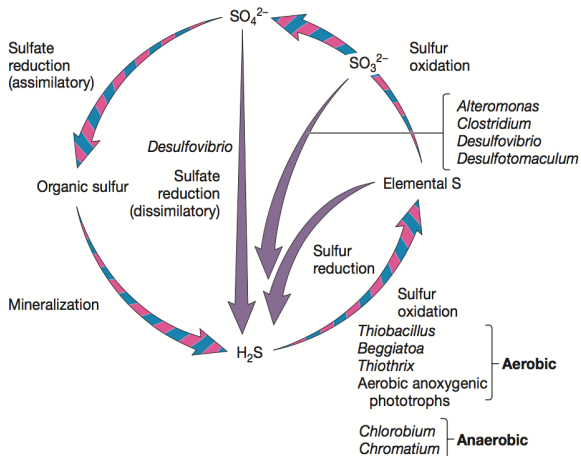
cycle de l'azote



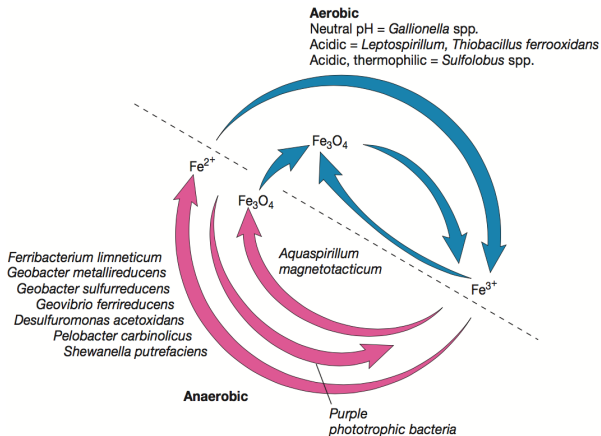
le cycle du phosphate



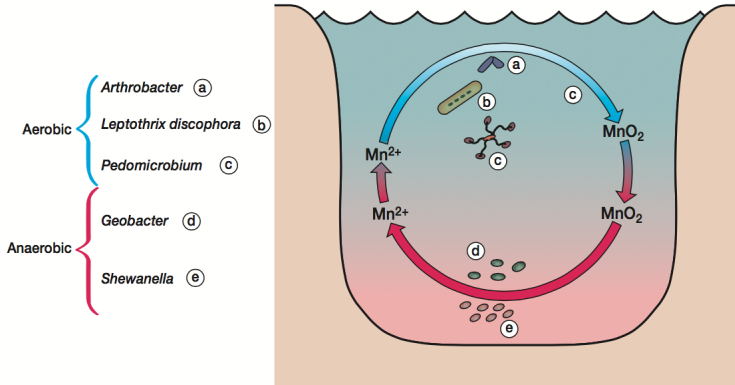
le cycle du soufre



le cycle du Fer



le cycle du Manganèse



(WILLEY et al., 2008)

Toxicité des métaux

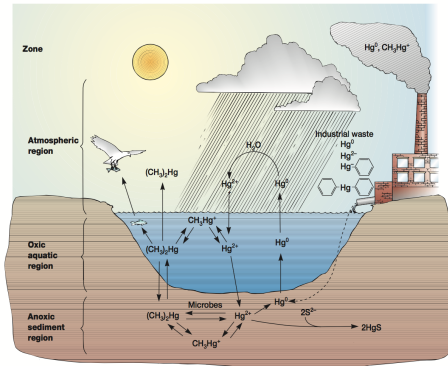
Table 27.3 Examples of Microorganism-Metal Interactions and Relations to Effects on Microorganisms and Homeothermic Animals

Metal Group	Metal		Interactions and Transformations	
			Microorganisms	Homeothermic Animals
Noble metals	Ag Au Pt	Silver Gold Platinum	Microorganisms can reduce ionic forms to the elemental state. Low levels of ionized metals released to the environment have antimicrobial activity.	Many of these metals can be reduced to elemental forms and do not tend to cross the blood-brain barrier. Silver reduction can lead to inert deposits in the skin.
Metals that form stable carbon metal bonds	As Hg Se	Arsenic Mercury Selenium	Microorganisms can transform inorganic and organic forms to methylated forms, some of which tend to bioaccumulate in higher trophic levels.	Methylated forms of some metals can cross the blood-brain barrier, resulting in neurological effects or death.
Other metals	Cu Zn Co	Copper Zinc Cobalt	In the ionized form, at higher concentrations, these metals can directly inhibit microorganisms. They are often required at lower concentrations as trace elements.	At higher levels, clearance from higher organisms occurs by reaction with plasma proteins and other mechanisms. Many of these metals serve as trace elements at lower concentrations.

(WILLEY et al., 2008)

Réseaux trophiques

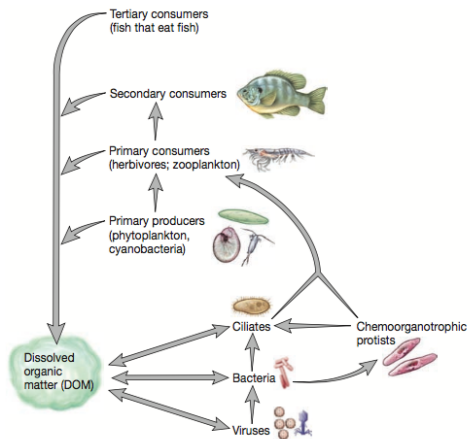
Figure 27.9 The Mercury Cycle. Interactions between the atmosphere, oxic water, and anoxic sediment are critical. Microorganisms in anoxic sediments, primarily *Desulfovibrio*, can transform mercury to methylated forms that can be transported to water and the atmosphere. These methylated forms also undergo biomagnification. The production of volatile elemental mercury (Hg^0) releases this metal to waters and the atmosphere. Sulfide, if present in the anoxic sediment, can react with ionic mercury to produce less soluble HgS .



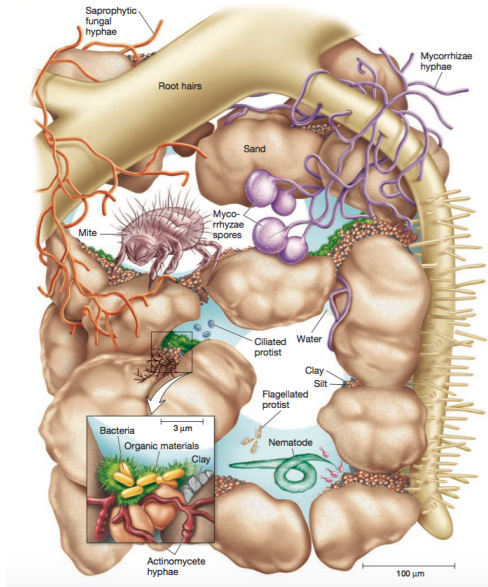
(WILLEY et al., 2008)

Interactions des micro-organismes dans l'écosystème

Interactions des micro-organismes dans l'écosystème



- ◇ Formation de la matière organique (producteurs primaires).
- ◇ Décomposer la matière organique (décomposeurs).
- ◇ Servir de source de nourriture
- ◇ Modifier les substrats et les nutriments
- ◇ Changer les taux de matière sous forme solide et gazeuse
- ◇ Produire des composés qui inhibent la croissance, l'activité ou la survie des autres espèces.
- ◇ Contribuer au fonctionnement des plantes et des animaux par des interactions positives ou négatives.



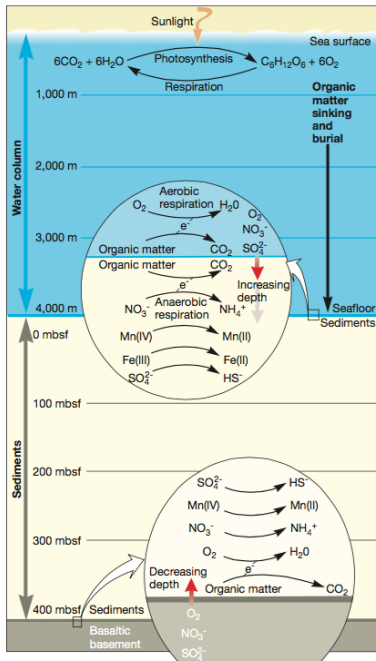


Table 27.4 Characteristics of Extreme Environments in Which Microorganisms Grow		
Stress	Environmental Conditions	Microorganisms Observed
High temperature	121°C	<i>Geogemma barossii</i>
	110–113°C, deep marine trenches	<i>Pyrolobus fumarii</i> <i>Methanopyrus kandleri</i> <i>Pyrodictium abyssi</i>
	67–102°C, marine basins	<i>Pyrococcus abyssi</i>
	85°C, hot springs	<i>Thermus</i> <i>Sulfolobus</i>
	75°C, sulfur hot springs	<i>Thermothrix thiopara</i>
Low temperature	–12°C, antarctic ice	<i>Psychromonas ingrahamii</i>
Osmotic stress	13–15% NaCl	<i>Chlamydomonas</i>
	25% NaCl	<i>Halobacterium</i> <i>Halococcus</i>
pH	pH 10.0 or above	<i>Bacillus</i>
	pH 3.0 or lower	<i>Saccharomyces</i> <i>Thiobacillus</i>
	pH 0.5	<i>Picrophilus oshimae</i>
	pH 0.0	<i>Ferroplasma acidarmanus</i>
Low water availability	$a_w = 0.6–0.65$	<i>Torulopsis</i> <i>Candida</i>
Temperature and low pH	85°C, pH 1.0	<i>Cyanidium</i> <i>Sulfolobus acidocaldarium</i>
Pressure	500–1,035 atm	<i>Colwellia hadaliensis</i>

Schéma bilan

Schéma bilan 3 : Les types trophiques et place dans l'environnement

Dans le cycle du carbone et le cycle de l'azote et replacez les types trophiques responsables des passages d'une forme moléculaire à l'autre.

Références



VOET, Donald et Judith G. VOET (2021). *Biochemistry : international adaption*. eng. Fourth edition. New York, NY : Wiley. ISBN : 978-1-119-77064-0.



WILLEY, Joanne M. et al. (2008). *Prescott, Harley, and Klein's microbiology*. 7th ed. OCLC : ocm71044581. New York : McGraw-Hill Higher Education. ISBN : 978-0-07-299291-5 978-0-07-330208-9.