Modèles en Sciences de la Vie
Chapitre 1
Bioénergétique
Introduction à la bioénergétique et aux types trophiques

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

2023

Introduction

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

Enthalpie libre

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

$$\alpha A + \beta B \rightleftarrows \gamma C + \delta D \tag{1}$$

La variation d'énergie libre est donc :

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[C]^\delta * [D]^\delta}{[A]^\alpha * [B]^\beta} \tag{2}$$

Enthalpie libre

Exercice 1 : Enthalpie libre standard des réactions organiques

1. L'alcool déshydrogénase catalyse la réaction suivante :

$$isopropanol + NAD^+ \leftrightarrow acetone + NADH, H^+$$

La constante d'équilibre K de la réaction à 25 deg C est de $7,19.10^9 mol/L$. Calculez ΔG_0 ($R = 8,32 J.mol^{-1}.K-1$. 2. La première étape de glycolyse

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

$$ATP + H_2O \rightleftarrows ADP + Pi \quad \Delta G^{0'} = -30,5 KJ.mol^{-1} \tag{3}$$

$$Glucose - 6 - P + H_2O \rightleftarrows glucose + Pi \quad \Delta G^{0'} = -13,8 KJ.mol^{-1} \tag{4}$$

Enthalpie libre des réactions redox et équation de Nerst

$$A_{ox}^{n+} + B_{red} \rightleftarrows A_{red} + B_{ox}^{n+} \tag{5}$$

La variation d'énergie libre est donc :

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[A_{red}][B_{ox}^{n+}]}{[A_{ox}^{n+}][B_{red}]} \tag{6}$$

$$\Delta G = -w_{electrique} = -nF\Delta E \tag{7}$$

Exprimez ΔE

Nombre d'oxydo réduction

- 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.

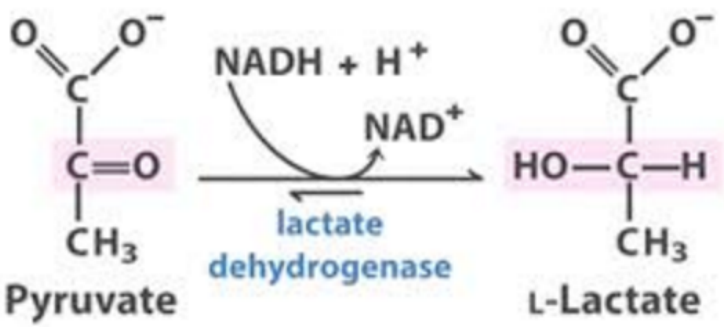
Exercice

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 :



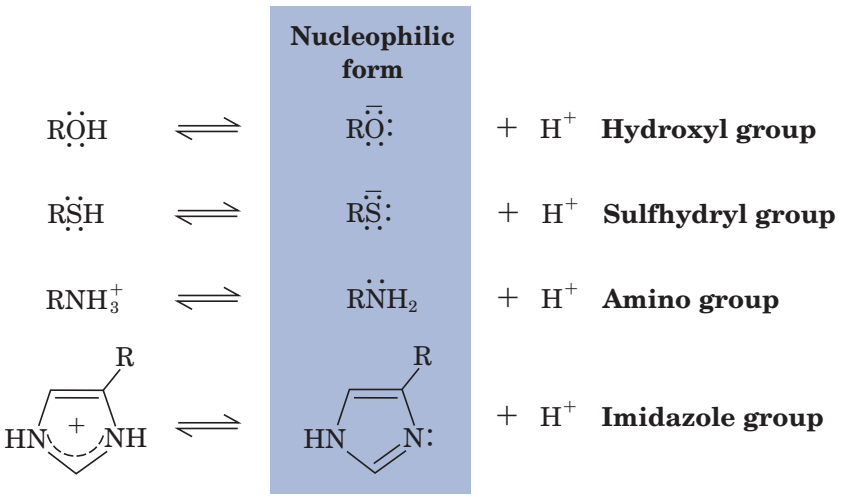
Rupture de liaison

- **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.

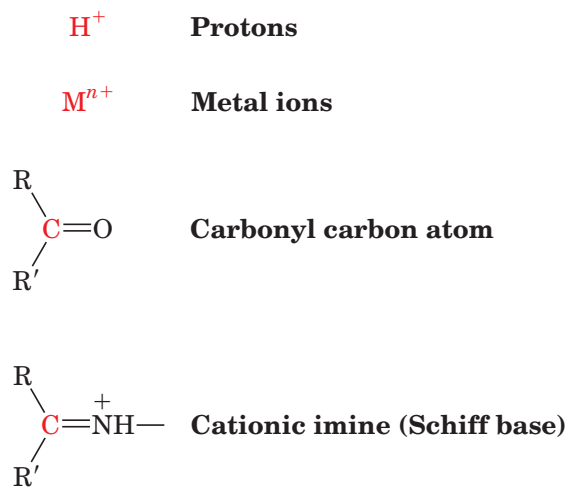
(Voet et Voet, 2021)

Electrophile versus nucléophile

(a) **Nucleophiles**



(b) **Electrophiles**



(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

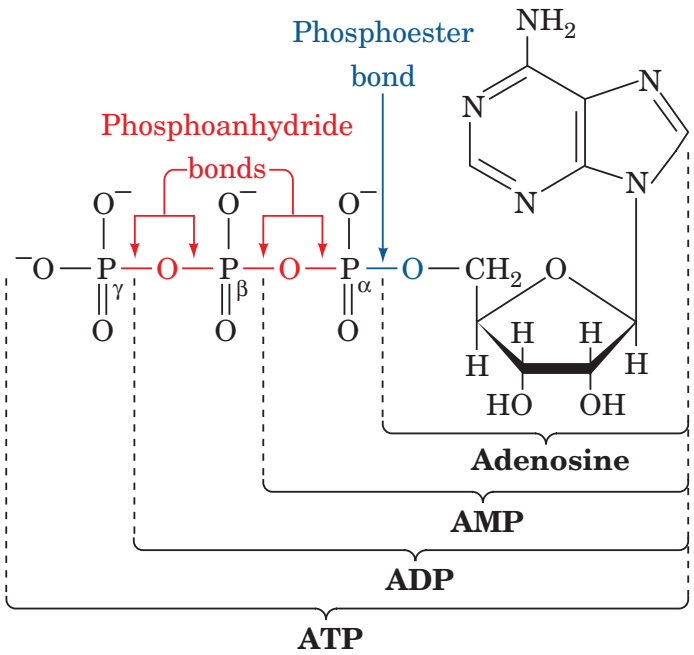
(Voet et Voet, 2021)

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)

La molécule d'ATP



$$ATP + H_2O \rightleftarrows ADP + Pi \quad \Delta G^{0'} = -30,5 KJ.mol^{-1} \qquad (8)$$

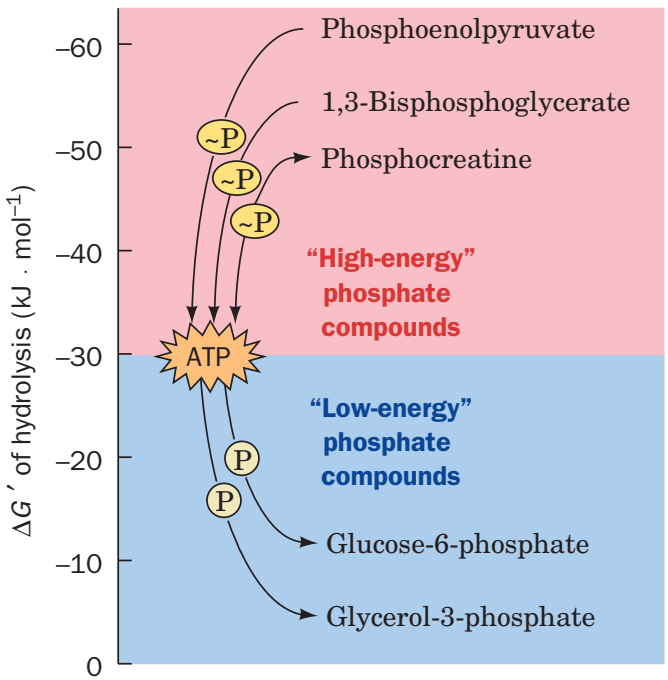
$$ATP + H_2O \rightleftarrows AMP + PPi \quad \Delta G^{0'} = -45,6 KJ.mol^{-1} \qquad (9)$$

Les molécules phosphorylées

Compound	$\Delta G^{\circ\prime}$ (kJ · mol^{-1})
Phosphoenolpyruvate	−61.9
1,3-Bisphosphoglycerate	−49.4
ATP (→ AMP + PP_i)	**−45.6**
Acetyl phosphate	−43.1
Phosphocreatine	−43.1
ATP (→ 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 :

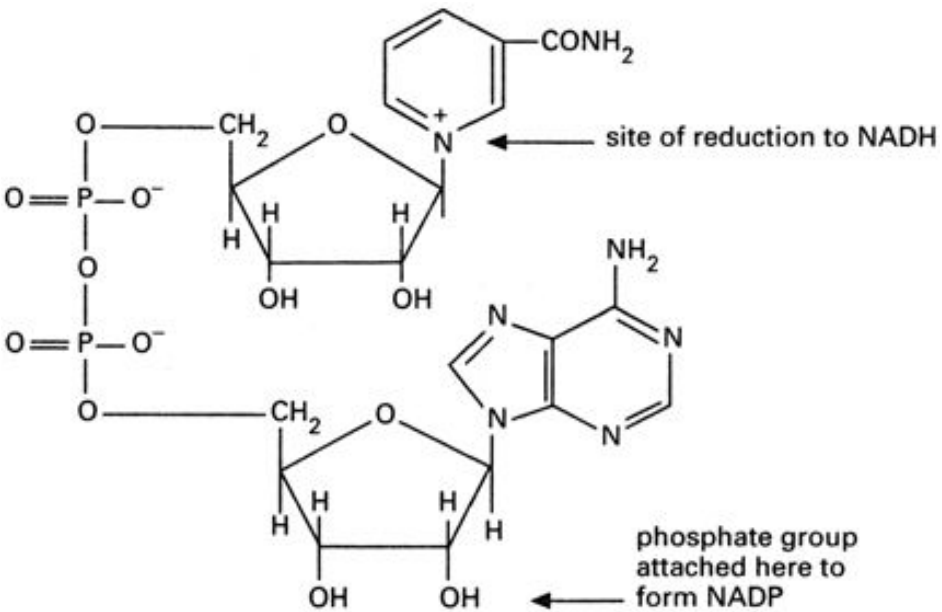
- Concentration stable (+/- 10 %)
- besoins de la cellule pendant une ou deux minutes

Utilisation de hydrolyse d'ATP :

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

(Voet et Voet, 2021)

Place au niveau des potentiels redox



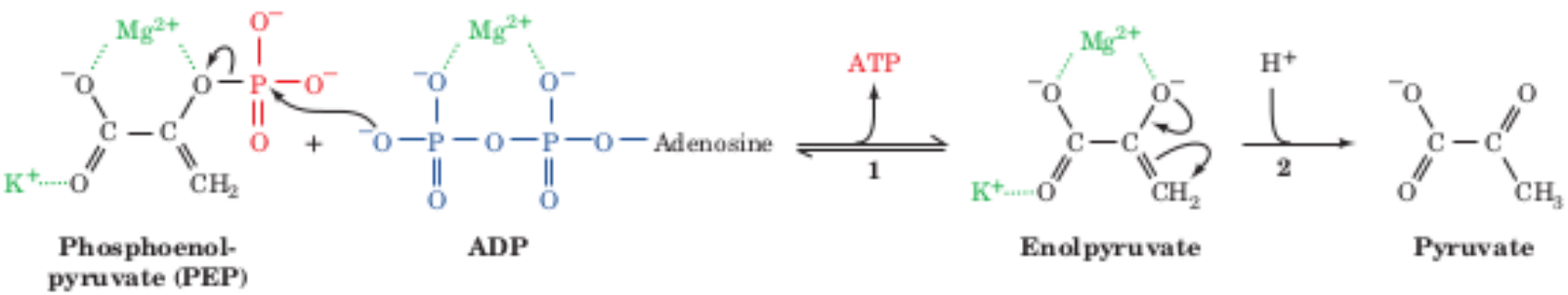
Half-Reaction	$\mathscr{E}^{\circ\prime}$ (V)
$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2O$	0.815
$NO_3^- + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons NO_2^- + H_2O$	0.42
Cytochrome $a_3(Fe^{3+}) + e^- \rightleftharpoons$ cytochrome $a_3(Fe^{2+})$	0.385
$O_2(g) + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2O_2$	0.295
Cytochrome $a(Fe^{3+}) + e^- \rightleftharpoons$ cytochrome $a(Fe^{2+})$	0.29
Cytochrome $c(Fe^{3+}) + e^- \rightleftharpoons$ cytochrome $c(Fe^{2+})$	0.235
Cytochrome $c_1(Fe^{3+}) + e^- \rightleftharpoons$ cytochrome $c_1(Fe^{2+})$	0.22
Cytochrome $b(Fe^{3+}) + e^- \rightleftharpoons$ cytochrome $b(Fe^{2+})$ (*mitochondrial*)	0.077
Ubiquinone $+ 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ ubiquinol	0.045
Fumarate$^- + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ succinate$^-$	0.031
$FAD + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons FADH_2$ (*in flavoproteins*)	−0.040
Oxaloacetate$^- + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ malate$^-$	−0.166
Pyruvate$^- + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ lactate$^-$	−0.185
Acetaldehyde $+ 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ ethanol	−0.197
$FAD + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons FADH_2$ (*free coenzyme*)	−0.219
$S + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2S$	−0.23
Lipoic acid $+ 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ dihydrolipoic acid	−0.29
$NAD^+ + H^+ + 2e^- \rightleftharpoons NADH$	−0.315
$NADP^+ + H^+ + 2e^- \rightleftharpoons NADPH$	−0.320
Cystine $+ 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons 2$ cysteine	−0.340
Acetoacetate$^- + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ β-hydroxybutyrate$^-$	−0.346
$H^+ + e^- \rightleftharpoons \frac{1}{2}H_2$	−0.421
$SO_4^{2-} + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons SO_3^{2-} + H_2O$	−0.454
Acetate$^- + 3H^+ + 2e^- \rightleftharpoons$ acetaldehyde $+ H_2O$	−0.581

Utilisation des cofacteurs réduits

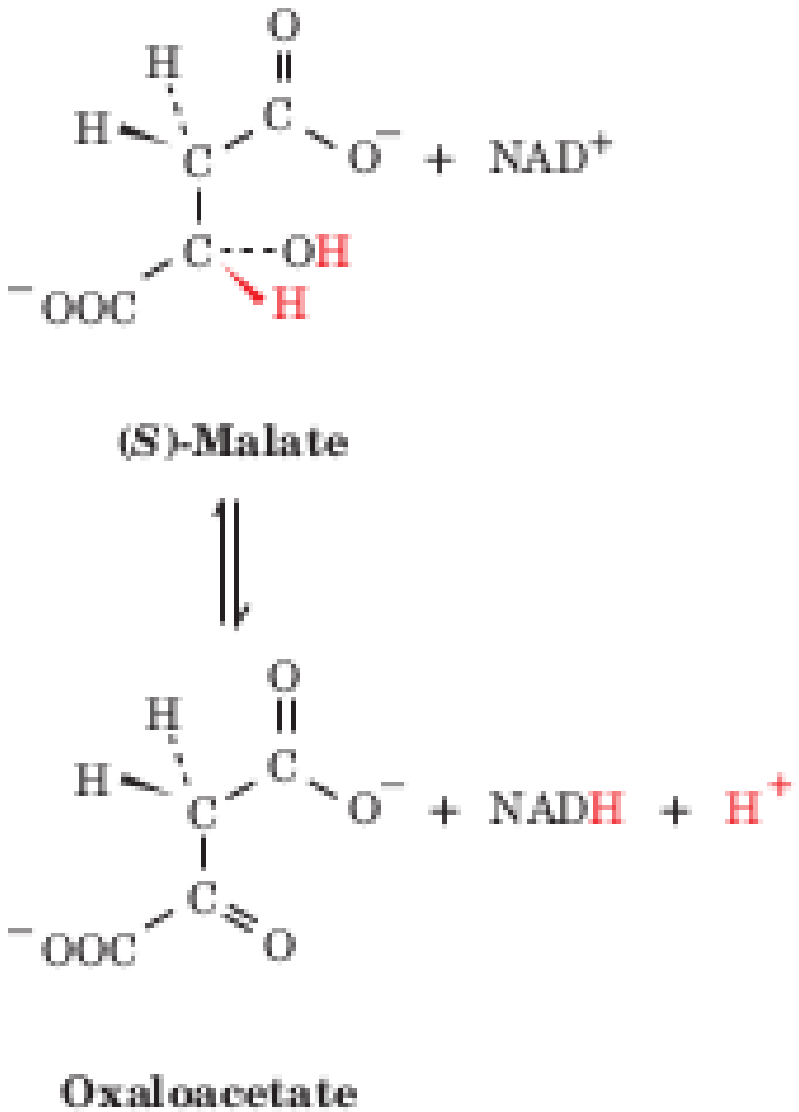
Il existe trois grands co-facteurs réduits :

- 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.

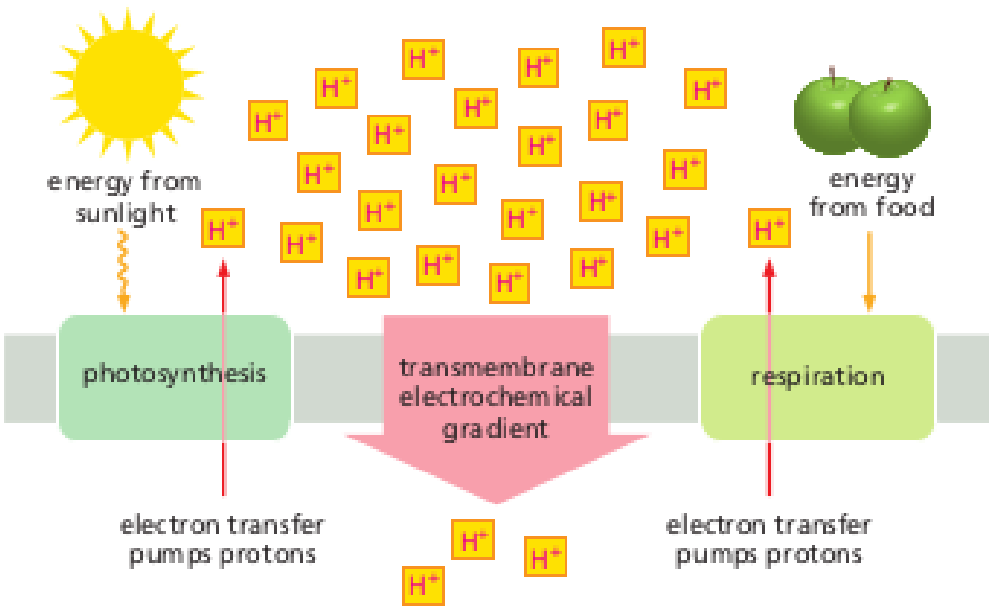
Couplage chimique



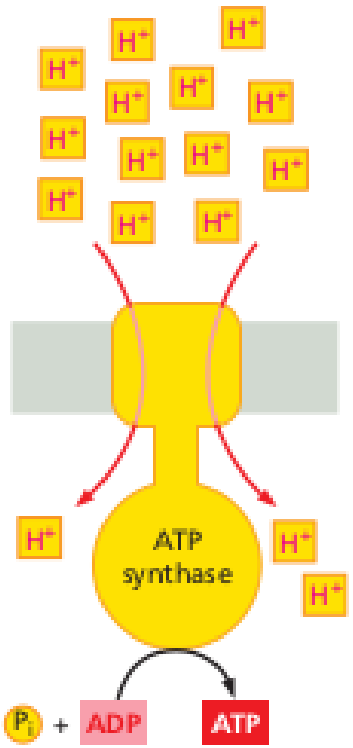
Couplage chimique



Couplage chimiosmotique



(c) Réactions redox entraîne gradient H^+



(d) gradient H^+ entraîne synthèse ATP

Figure – Réactions de production d'ATP et de NADH par couplage chimique (2)

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 consite le plus souvent en réactions endergoniques (défavorables) qui sont possibles par couplage avec la dégradation de NTP ou du NADPH

Voies métaboliques

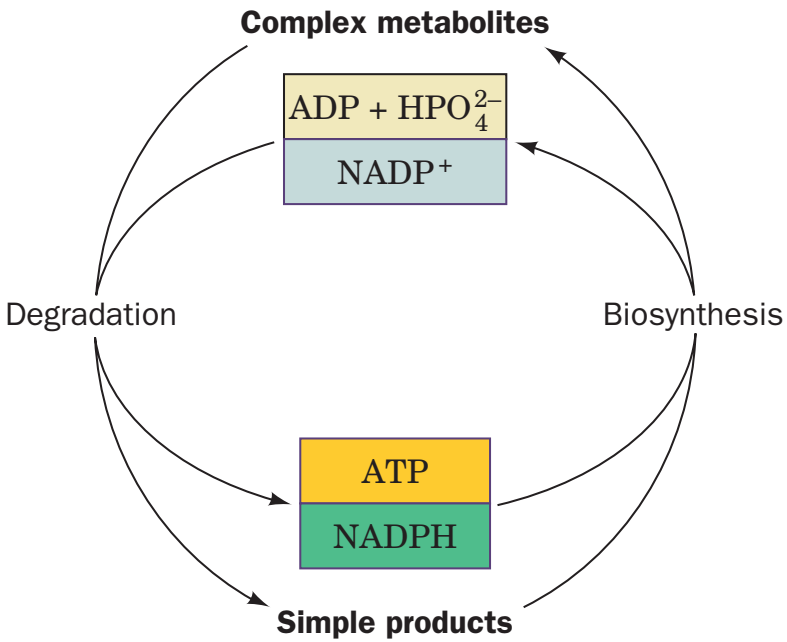


Figure – Lien entre catabolisme et anabolisme

Voies métaboliques

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

Figure – Répartition des voies dans les organites

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.

Besoins et types trophiques

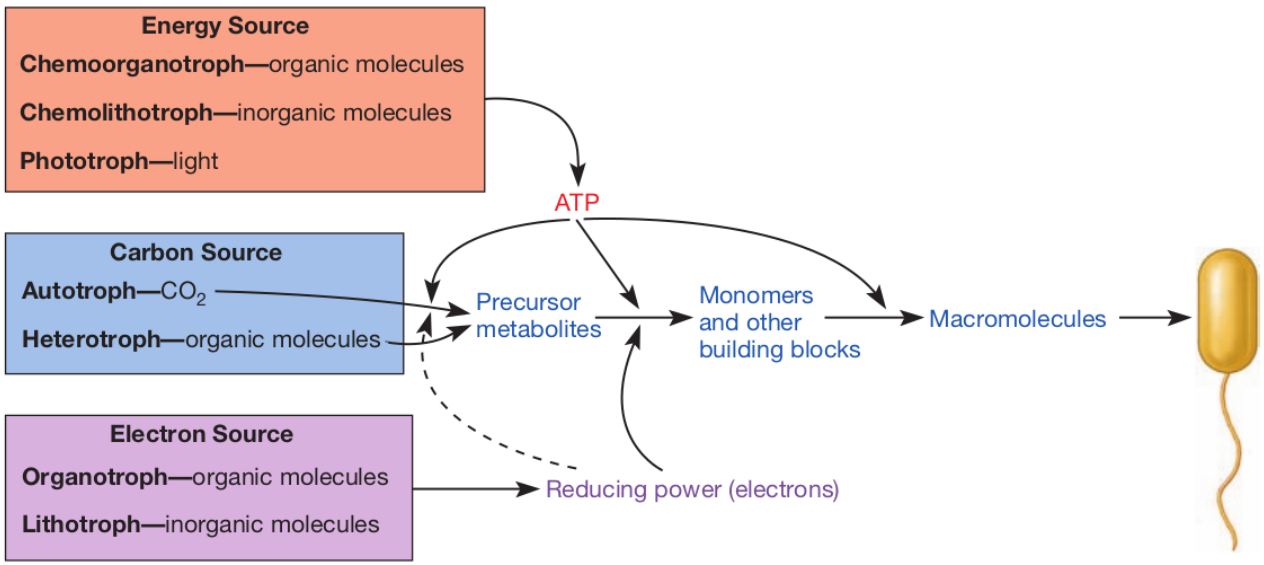
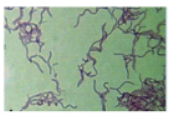
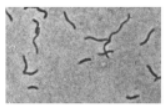
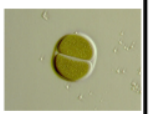
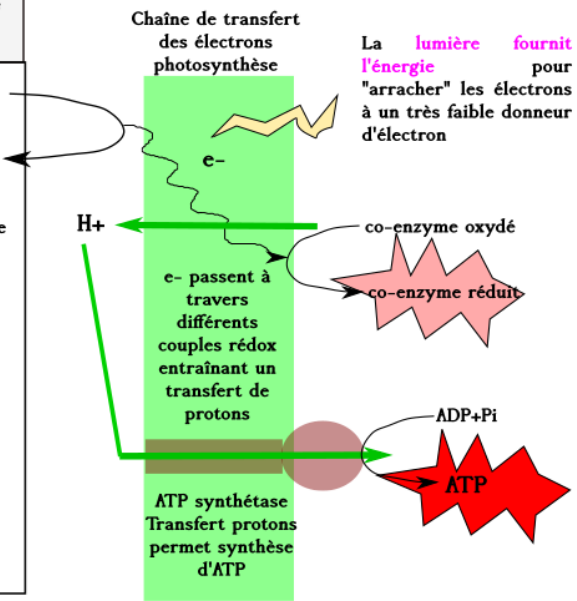


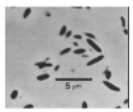
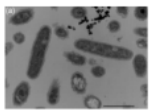
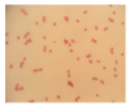
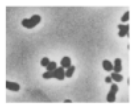
Figure – Les types trophiques chez les microorganismes (Willey et al., 2008)

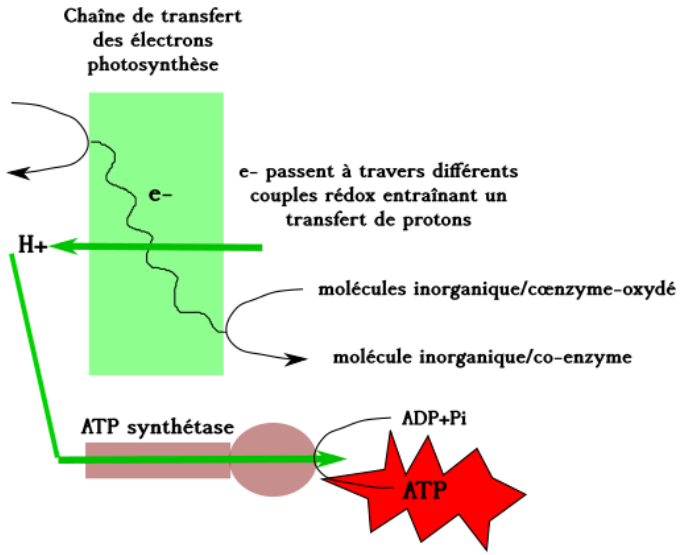
La phototrophie

PHOTOORGANOTROPHIE Donneur électron organique	PHOTOLITHOTROPHIE Donneur électron inorganique			Donneur électron "faible" Niveau énergétique trop bas pour fournir seul de l'énergie
Molécule organique réduite (SUCCINATE)	Fe (II)	H2S, S°, H2	H2O	réduit
Molécule organique réduite	Fe (III)	H2S, S°, H2	O2	oxydé
Bactéries pourpre non sulfureuses	Photoferrotrophes	Bactéries pourpre sulfureuses	Cyanobactérie	Type micro-organisme
Rhodospirilaceæ	*Chlorobium Rhodobacter*	*Thiospirillum,*	*Chroococcus*	Exemple (genre)
 *Rhodospirilum rubrum* Gram-negative, 0,8- 1 µm	 *Chlorobium ferrooxidans* Gram-negative, 0.5 x 1.0-1.5 µm	*Thiospirillum jenense* Gram-negative, 3 x 20 µm	 *Chroococcus turgidus* Gram-negative, 20 µm	Exemple (espèce)

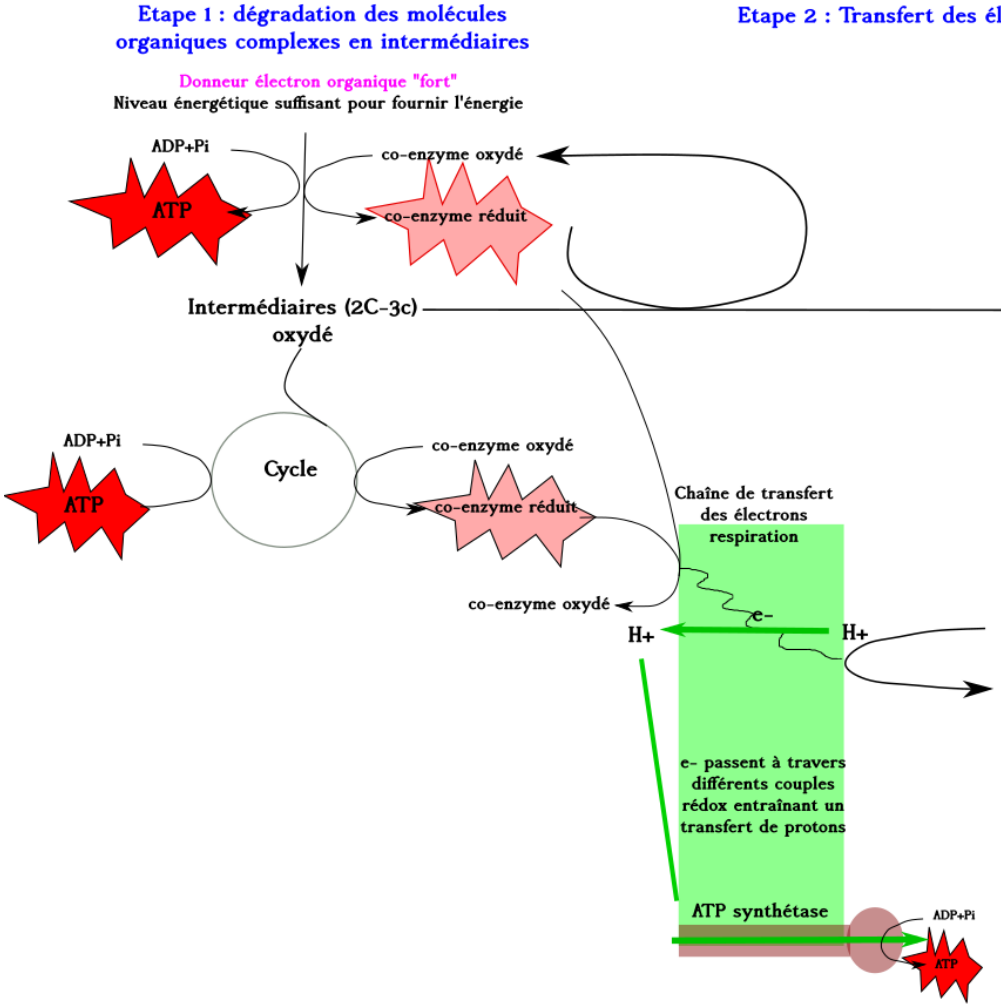


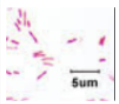
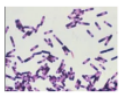
La chimiolithotrophie

Donneur électron inorganique "fort" Niveau énergétique suffisant pour fournir de l'énergie				
H2	H2S,S°, thiosulfate	NH4+	NO2-	réduit
H+	sulfate, sulfites	NO2-	NO3-	oxydé
Archæbactérie Methanogène	sulfo-bactéries	Bactéries Nitrificantes	Bactéries Nitrificantes	Type de micro-organisme
Méthanobacterium	*Thiobacillus*	*Nitrosococcus*	*Nitrobacter*	Exemple (genre)
				
Mthanobacterium thermoautotrophicum 2.5 µm	*Thiobacillus thiophilus* gram-negative 1 µm	*Nitrosococcus wardiæ* gram-negative 1 µm	*Nitrobacter agilis* gram-negative 1 µm	Exemple (espèce)



La chimioorganotrophie



Accepteur d'électron	Respiration aérobie	Exemples de Respiration anaérobie		
oxydé	O2	NO3-	SO4(2-)	CO2
réduit	H2O	NO2-	H2S	CH4
Métabolisme		Dénitrification	Bactérie sulfo-réductrices	Archæbactérie Methanogène
Exemple (genre)	*Pseudomonas* *Champignons*	*Pseudomonas*	*Clostridium*	*Methanobrevibacter*
				
		Pseudomonas æruginosa	*Clostridium difficile*	*Mathonobrevibacter smithii*
		Gram-négative 2um poumons	Gram-positive 10um Intestins	1um Intestin

La chimioorganotrophie

Exercice 3 : Comparaison du rendement énergétique de la respiration aérobie et anaérobie (Coutouly et al., s. d.)

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 : $E'_{0(NADH/NAD^+)} = -0,32V$, $E'_{0(\frac{1}{2}O_2/H_2O)} = 0,81V$, $E'_{0(NO_3^-/NO_2-)} = -0,42V$, $F = 96500C$

Auto ou hétérotrophie

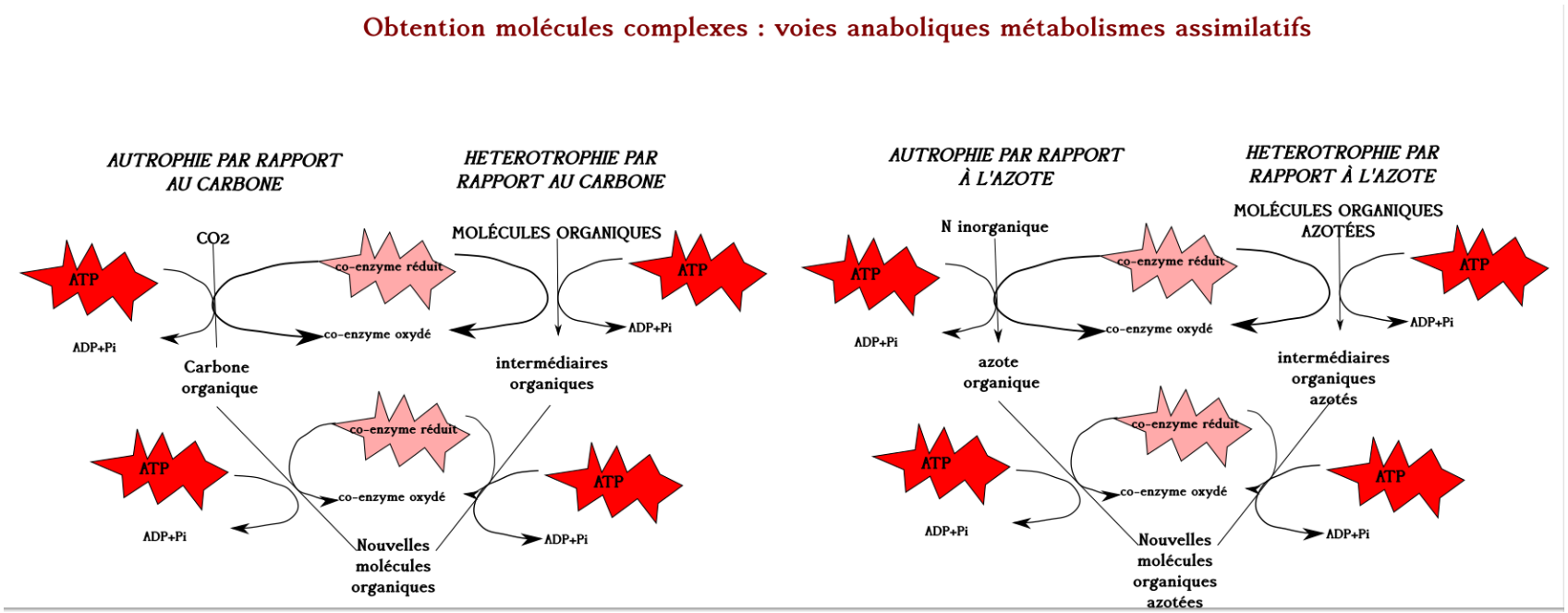


Schéma bilan

Schéma bilan 2 : Les types trophiques

Faites un schéma bilan sur les types trophiques

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 biofilms	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 biofilms	Sédimentation de plateforme continentale	jusqu'à aujourd'hui	

Disponibilité des macro-élément dans l'environnement

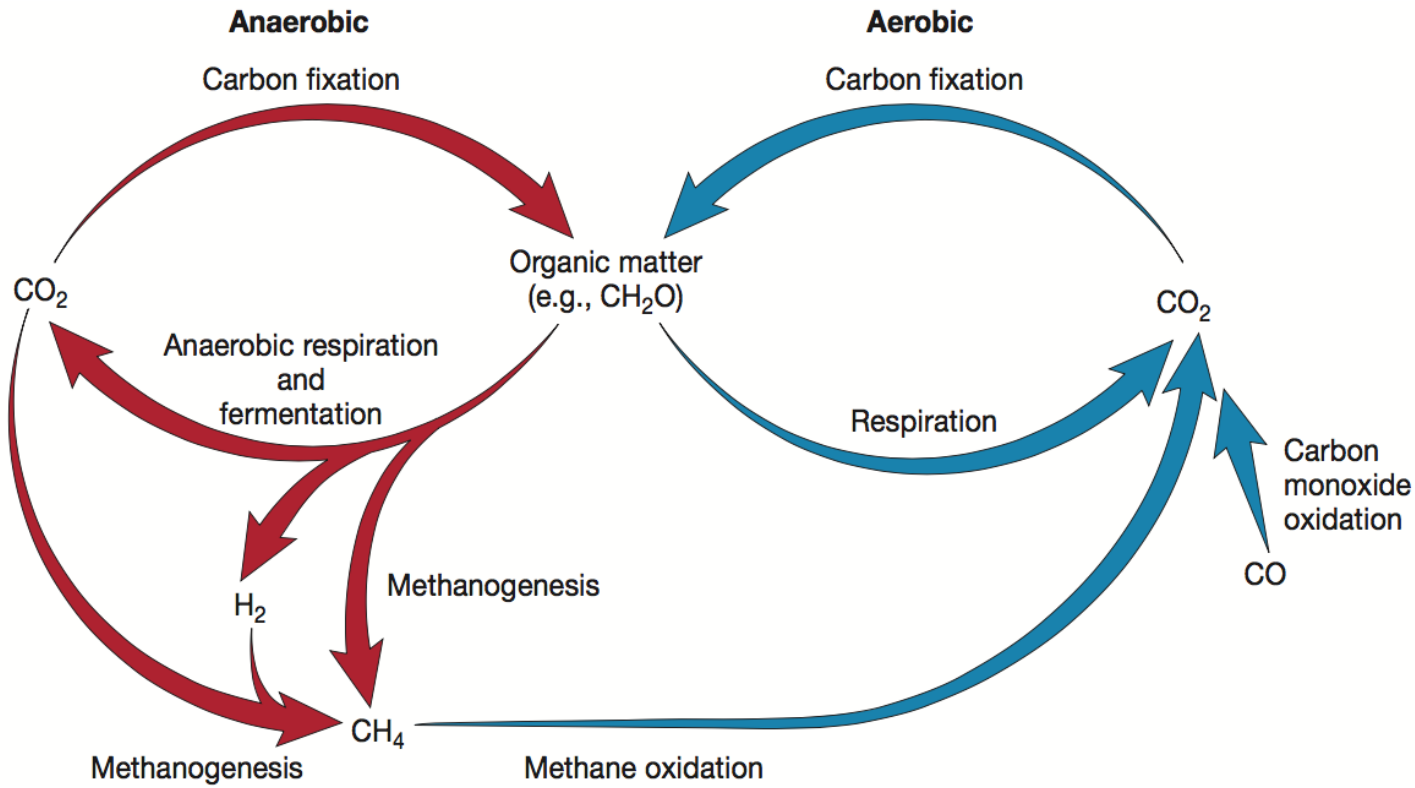
Table 27.1 The Major Forms of Carbon, Nitrogen, Sulfur, and Iron Important in Biogeochemical Cycling

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_2O (+1)	Nitrite: NO_2^- (+3)	Nitrate: NO_3^- (+5)
S	Yes	Hydrogen sulfide: H_2S, SH groups in organic matter (−2)	Elemental sulfur: S^0 (0)	Thiosulfate: $S_2O_3^{2-}$ (+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-élements selon leur degré d'oxydation (Willey et al., 2008)

cycle du carbone



(Willey et al., 2008)

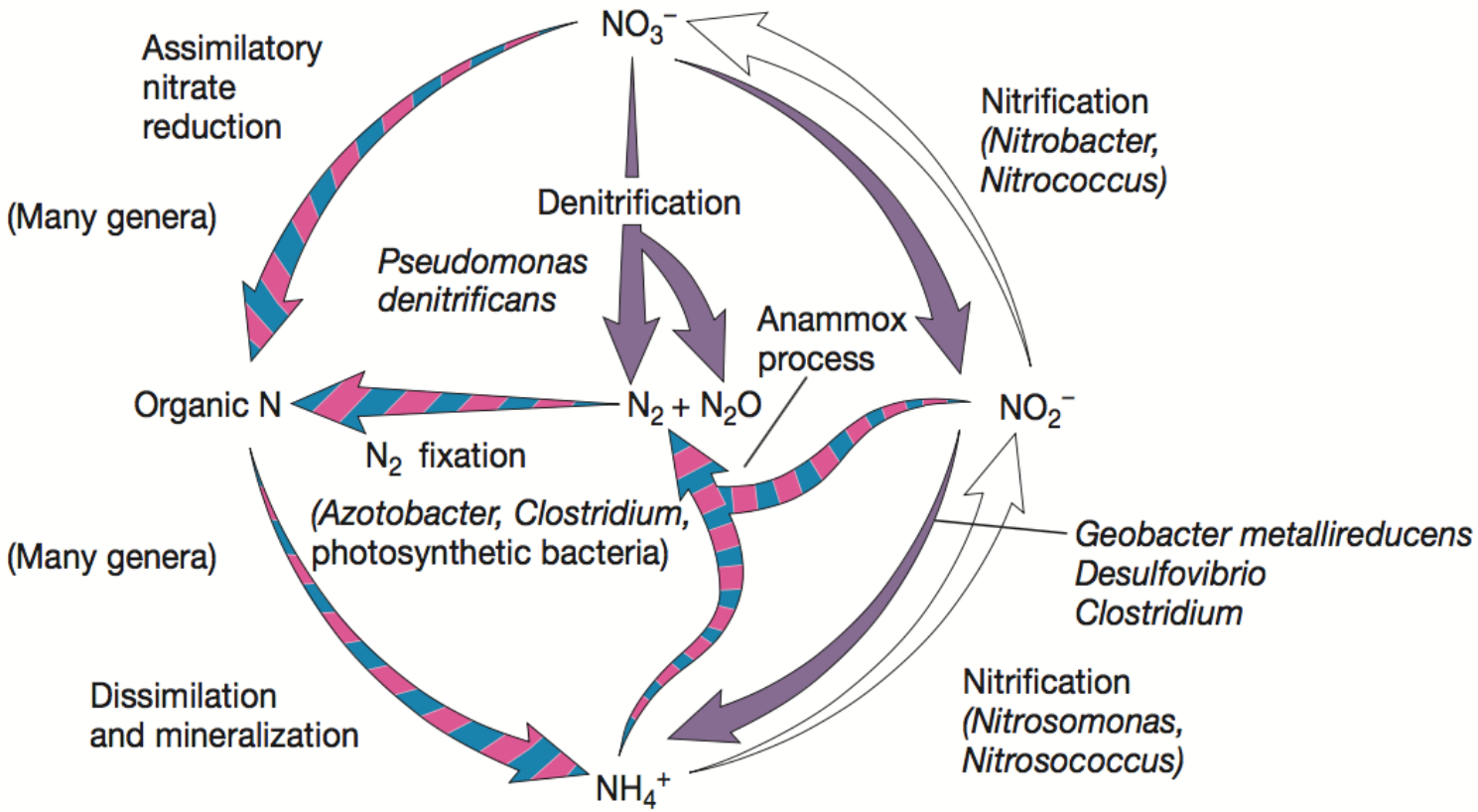
Décomposition de la matière organique

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	α(1→4) α(1→6)	+	+	+	−	−	+	+
Cellulose	Glucose	β(1→4)	+	+	+	−	−	+	+
Hemicellulose	C6 and C5 monosaccharides	β(1→4), β(1→3), β(1→6)	+	+	+	−	−	+	+
Lignin	Phenylpropene	C−C, C−O bonds	+	+	+	−	−	+	−
Chitin	*N*-acetylglucosamine	β(1→4)	+	+	+	+	−	+	+
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 *N*-glycosidic bonds	+	+	+	+	+	+	+

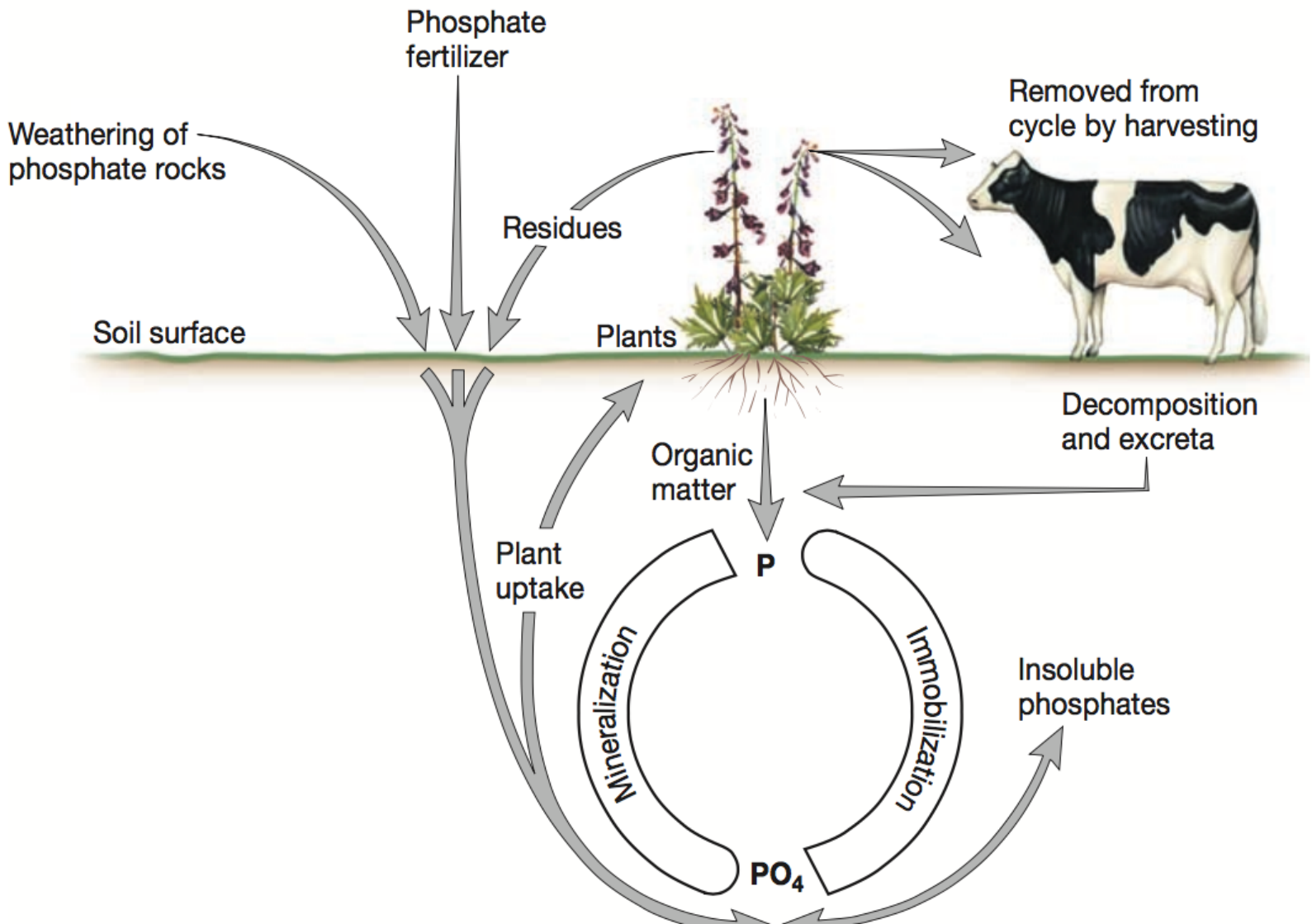
(Willey et al., 2008)

cycle de l'azote

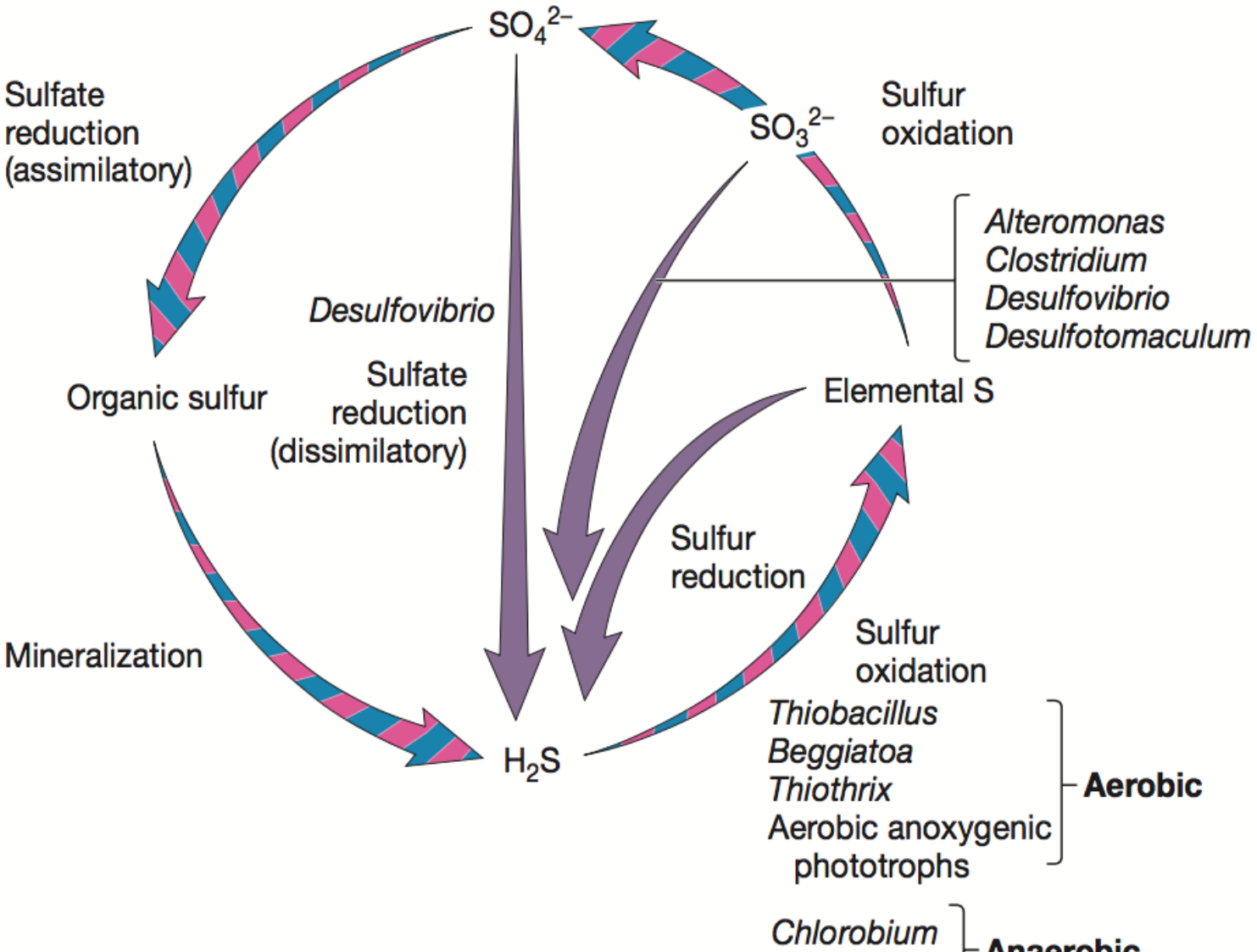


(Willey et al., 2008)

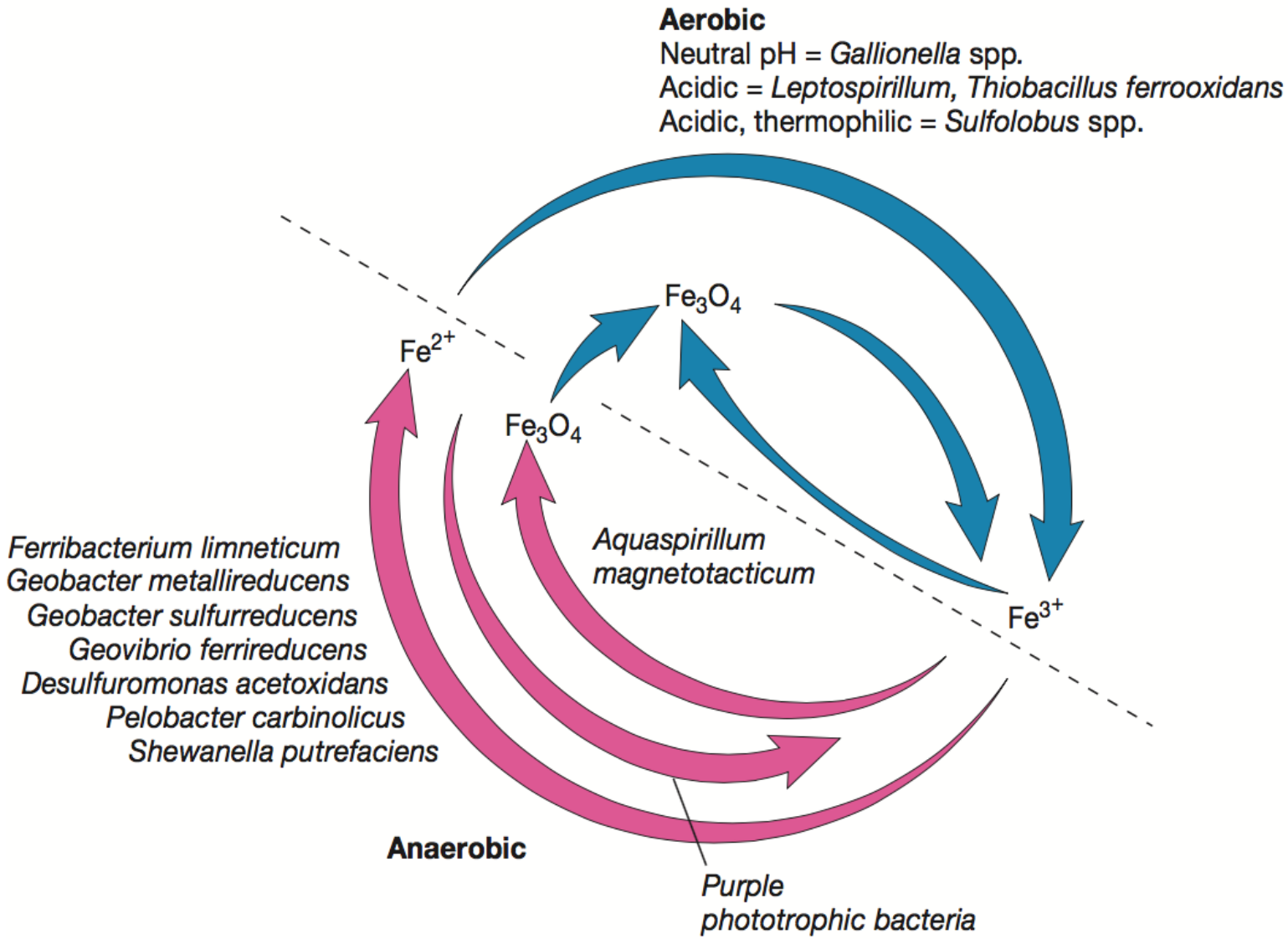
le cycle du phosphate



le cycle du souffre



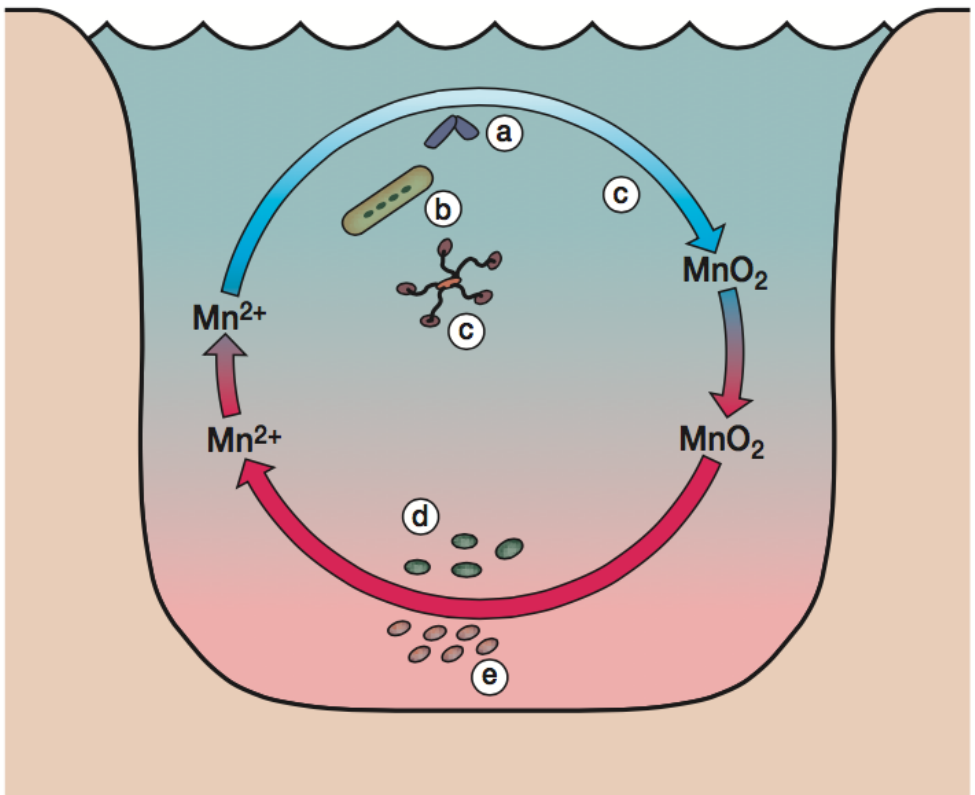
le cycle du Fer



le cycle du Manganèse

Aerobic
- *Arthrobacter* (a)
- *Leptothrix discophora* (b)
- *Pedomicrobium* (c)

Anaerobic
- *Geobacter* (d)
- *Shewanella* (e)



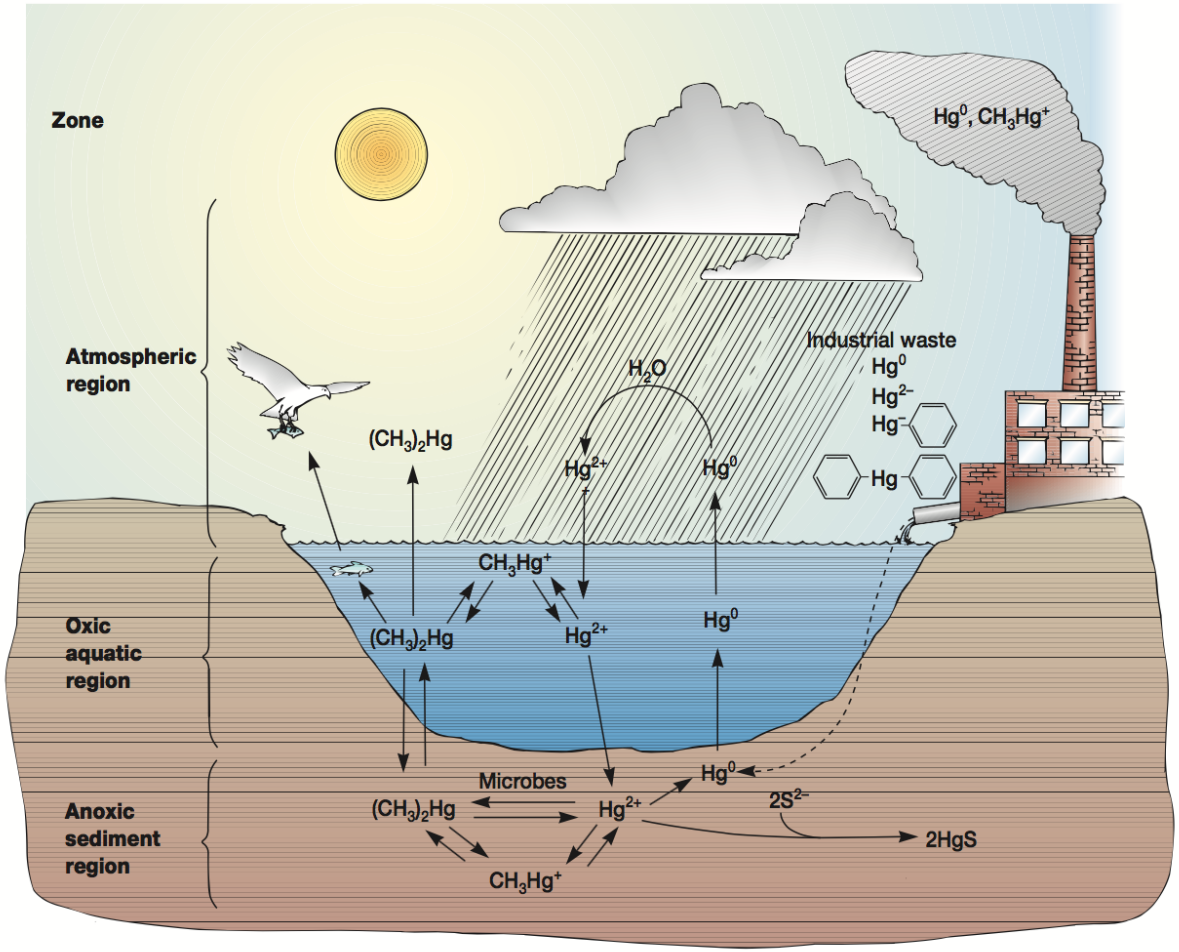
Toxicité des métaux

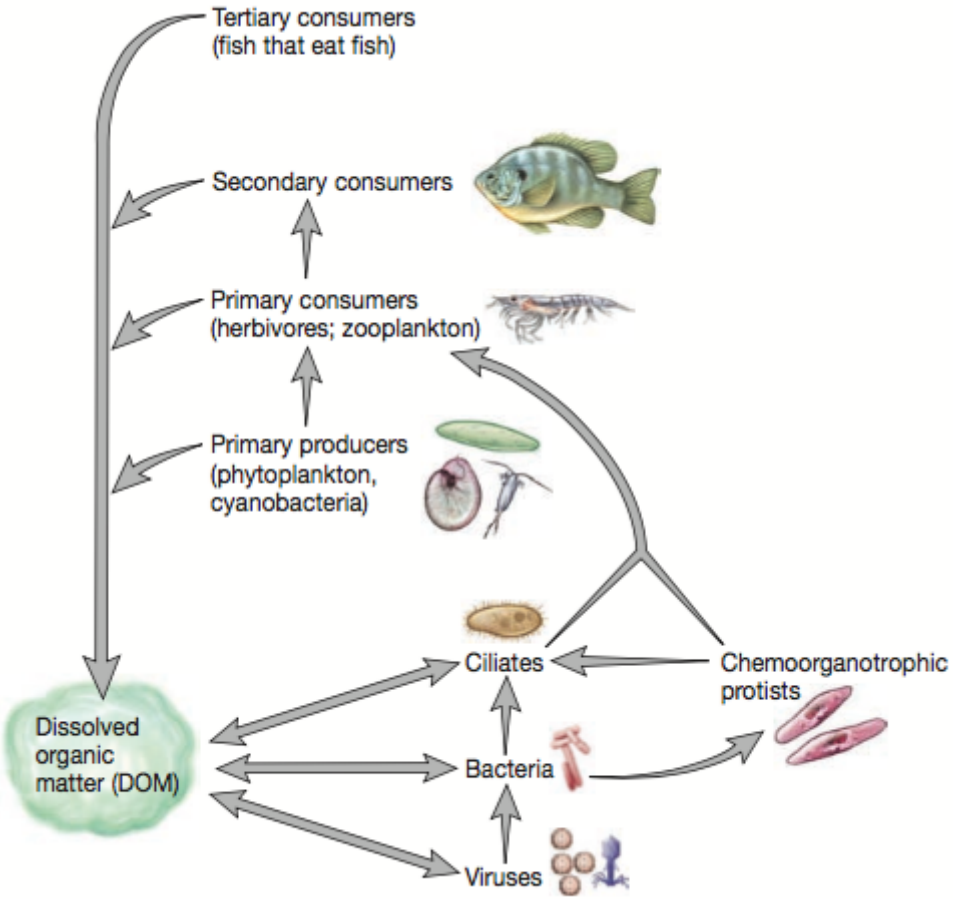
Table 27.3 Examples of Microorganism-Metal Interactions and Relations to Effects on Microorganisms and Homeothermic Animals

			Interactions and Transformations	
Metal Group	**Metal**		**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.

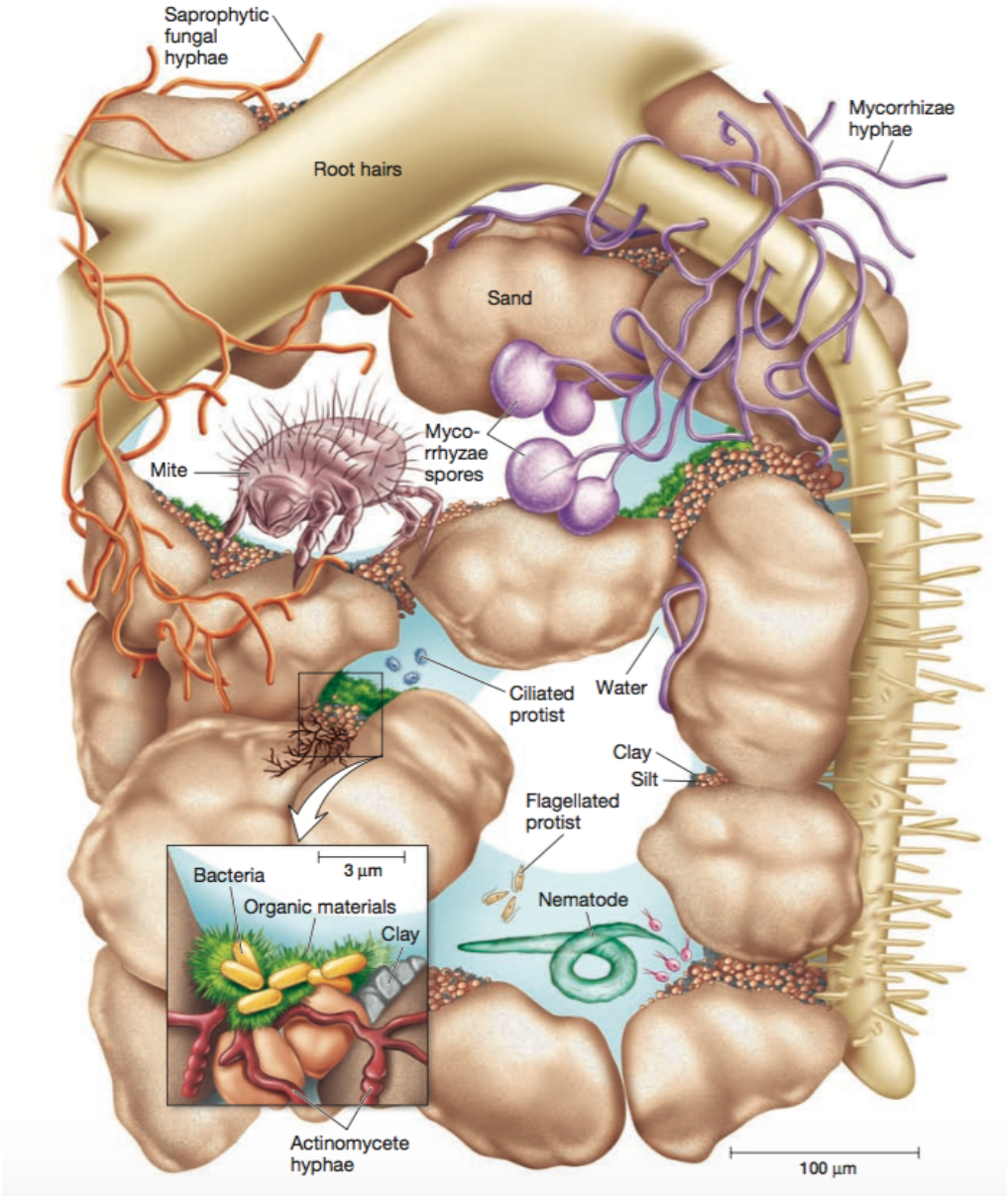
Réseaux trophiques

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.




Tertiary consumers
(fish that eat fish)
Secondary consumers
Primary consumers
(herbivores; zooplankton)
Primary producers
(phytoplankton,
cyanobacteria)
Ciliates
Chemoorganotrophic
protists
Dissolved
organic
matter (DOM)
Bacteria
Viruses

- 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.


Saprophytic fungal hyphae
Root hairs
Mycorrhizae hyphae
Sand
Myco-rrhyzae spores
Mite
Ciliated protist
Water
Clay
Silt
Flagellated protist
Nematode
Bacteria
3 µm
Organic materials
Clay
Actinomycete hyphae
100 µm

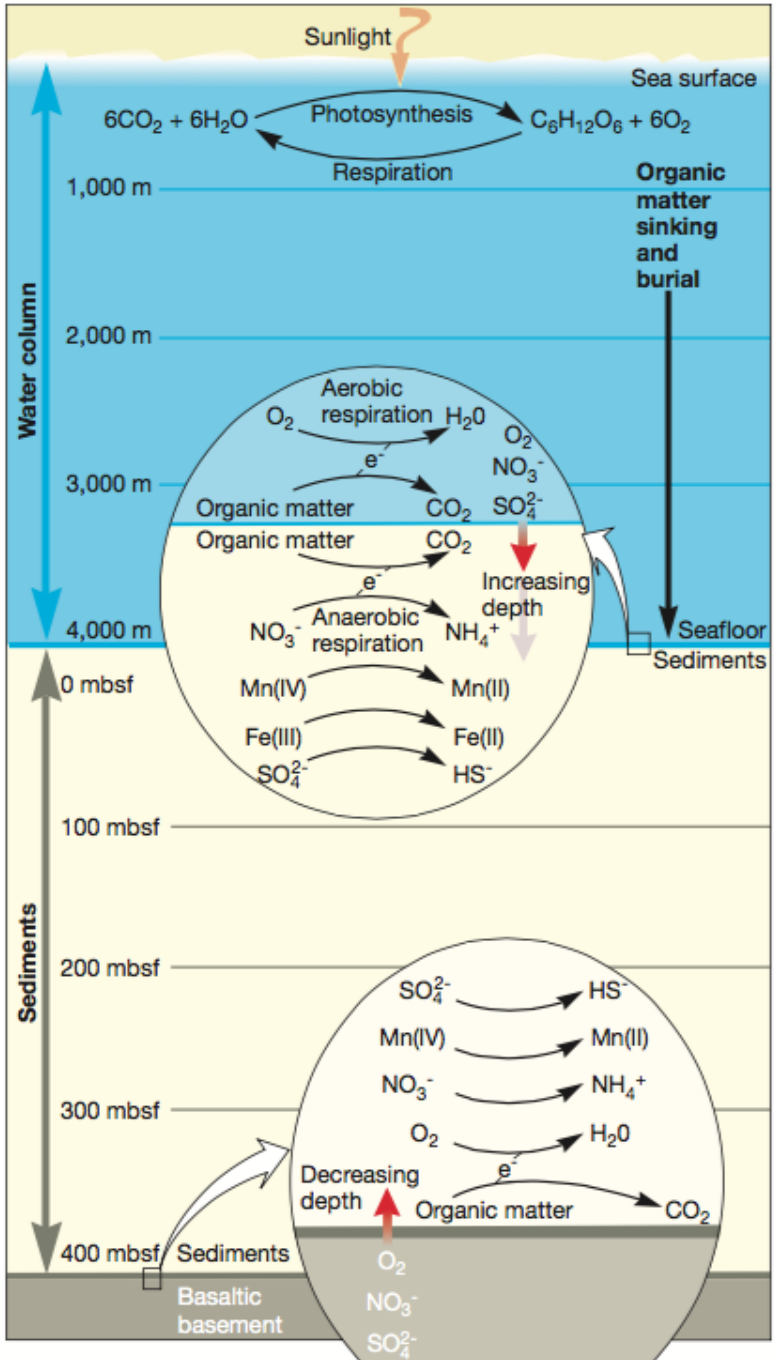

Sunlight
Sea surface
$6CO_2 + 6H_2O$
Photosynthesis
$C_6H_{12}O_6 + 6O_2$
Respiration
Organic matter sinking and burial
1,000 m
2,000 m
3,000 m
4,000 m
Water column
Aerobic respiration
O_2
H_2O
e^-
Organic matter
CO_2
NO_3^-
SO_4^{2-}
Increasing depth
Anaerobic respiration
NH_4^+
Seafloor
Sediments
0 mbsf
Mn(IV)
Mn(II)
Fe(III)
Fe(II)
HS^-
100 mbsf
200 mbsf
300 mbsf
400 mbsf
Sediments
Decreasing depth
Basaltic basement

Table 27.4 Characteristics of Extreme Environments in Which Microorganisms Grow

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

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

- Coutouly, G et al. (s. d.). *Travaux dirigés de biochimie, biologie moléculaire et bioinformatique*. fre. 4e éd. Biosciences et techniques. Rueil-Malmaison : Doin. ISBN : 978-2-7040-1354-8.
- 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.