

CHAPITRE II: METABOLISME ENERGETIQUE DES MICROORGANISMES

1. Sources d'énergie et types trophiques

L'énergie nécessaire aux micro-organismes est fournie par la lumière (organismes phototrophes) ou par l'oxydation de substances chimiques (organismes chimiotrophes). Dans les deux cas, l'énergie est stockée sous forme d'énergie de liaison chimique biologiquement utilisable (il s'agit de la liaison anhydride phosphorique de l'ATP). La formation d'ATP à partir de la source primaire d'énergie est plus ou moins complexe selon le type trophique ou métabolique. Les réactions de synthèse utilisent l'énergie libérée par la décomposition de l'ATP en ADP :



1.1. Définition de types trophiques

Le terme type trophique (du verbe grec *trophus*, « action de nourrir ») spécifie la manière dont un organisme vivant constitue sa propre matière organique.

Ils représentent les différentes modalités de prélèvement du carbone, du pouvoir réducteur et de l'énergie dans l'environnement. Cette variété de l'utilisation des ressources locales est en relation avec la possibilité de nombreuses espèces de se développer dans des conditions extrêmes de T, de pH ou dans des milieux que les Eucaryotes ne peuvent pas exploiter (eaux interstitielles ou eaux sursalées...).

1.2. Critères utilisés pour définir les types trophiques

La croissance (et donc l'anabolisme) d'une bactérie impose des besoins en sources de matière (nutriments) et d'énergie. Il existe à ces deux niveaux dans le monde bactérien une grande diversité que l'on gère habituellement à l'aide de trois critères:

- *La source d'énergie utilisée et la nature du donneur d'électrons ;*
- *L'accepteur final d'électrons ;*
- *La source de carbone.*

Les deux premiers critères généralement utilisés pour déterminer le type nutritionnel d'une bactérie sont empruntés au métabolisme énergétique.

1.3. Microorganismes phototrophes

Les microorganismes phototrophes peuvent capter et utiliser l'énergie lumineuse au niveau de complexes multimoléculaires, appelés photosystèmes. Un photosystème est composé de plusieurs molécules qui transmet l'énergie lumineuse à une bactériochlorophylle (capable d'expulser un électron après absorption d'un photon) et d'un "centre réactionnel" (ATP synthétase) permettant la formation d'ATP.

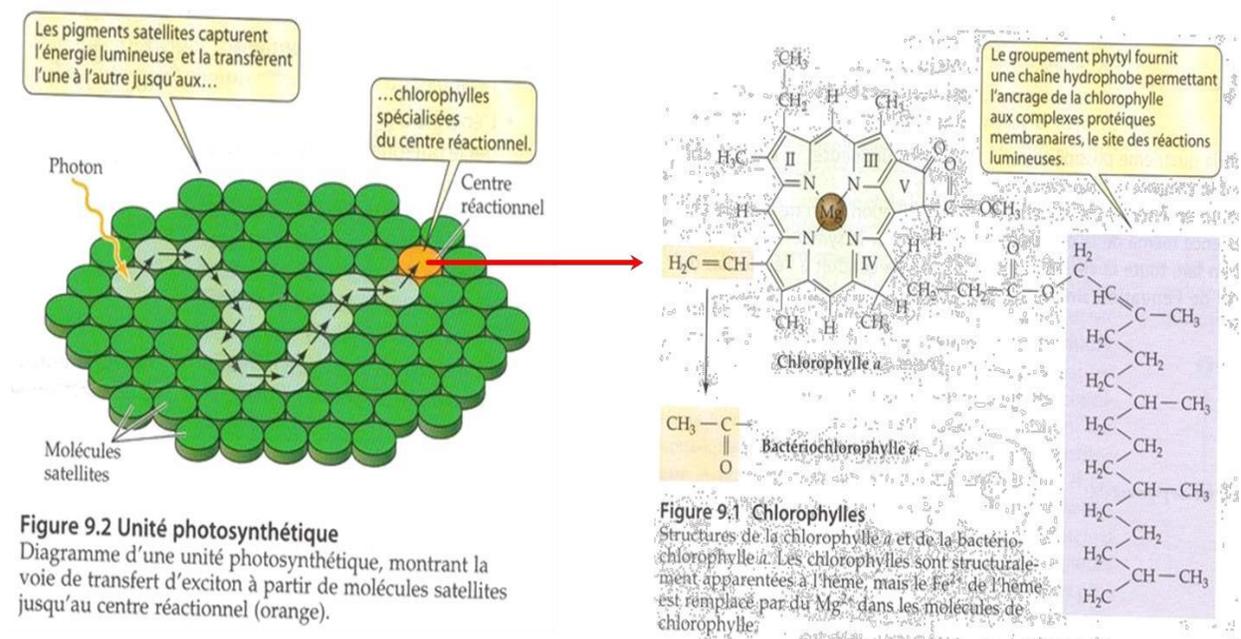


Figure 03: Exemple d'unité photosynthétique et la structure chimique de la chlorophylle a et bactériochlorophylle a

Le processus de photosynthèse comprend deux étapes; phase lumineuse et phase obscure.

- La phase lumineuse (photophosphorylation) : aboutit à la formation d'ATP, c'est une réaction génératrice d'énergie utilisable par la cellule. Cette phase nécessite la présence de pigments de type chlorophylle, la nature des pigments varie selon la nature de l'organisme phototrophe.

Chez les **bactéries** il n'y a jamais libération d'O₂ (H₂O ne peut être donneur). Le donneur d'électrons et de protons peut être un composé minéral comme H₂S chez les *Thiorhodaceae* et les *Chlorobacteriaceae* (organismes photolithotrophes ou photoautotrophes), ou un composé organique comme l'acide succinique chez les *Athiorhodaceae* (photoorganotrophes ou photohétérotrophes).

La plupart des **bactéries photosynthétiques** peuvent aussi utiliser l'hydrogène moléculaire. L'accepteur d'électrons et de protons est le NADP⁺, qui après réduction donne la forme NADPH, H⁺.

Le Bilan de la phase lumineuse se résume par la formule suivante :

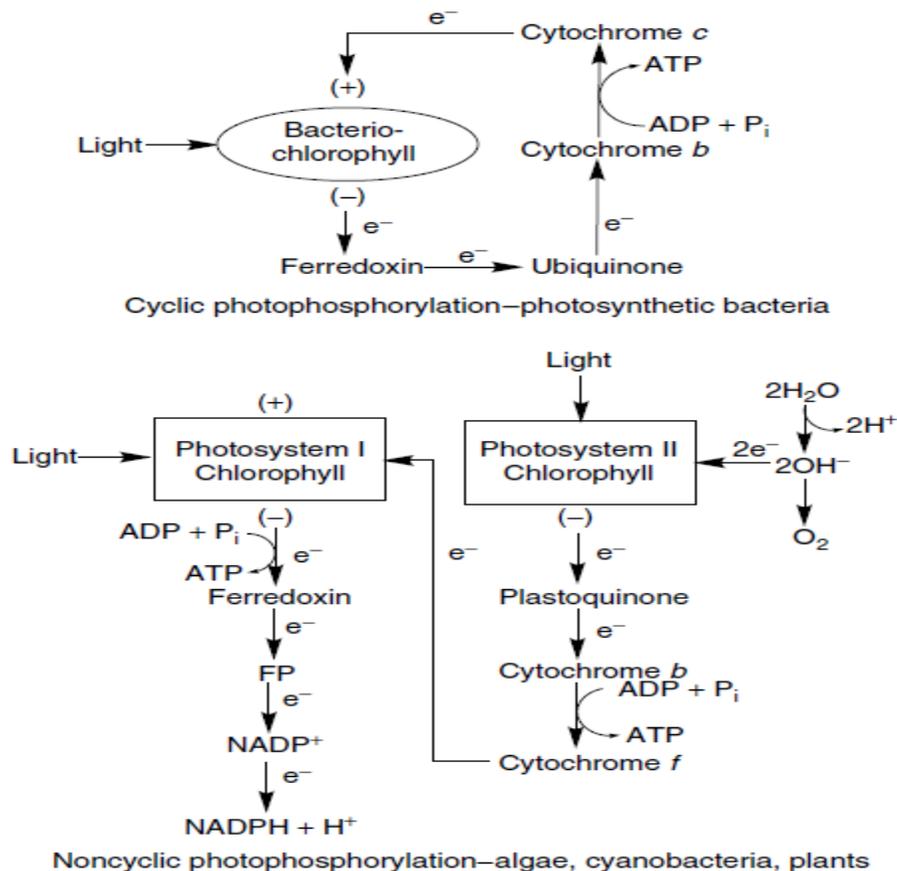


Figure 05: Comparaison entre la photophosphorylation cyclique et non-cyclique.

Dans la photophosphorylation cyclique, l'ATP est produite, mais aucun pouvoir réducteur n'est généré.

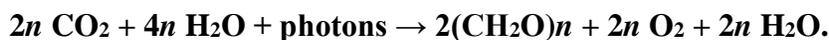
Dans la voie non cyclique, deux molécules d'ATP sont produites, une NADP réduite est générée et l'oxygène est produit par photolyse de l'eau.

- **Phase obscure** : correspond à une phase de synthèse de composés organiques, elle aboutit à la formation de réserves de nature glucidique en utilisant du CO₂ ainsi que le pouvoir réducteur et l'ATP formés au cours de la phase lumineuse. Cette synthèse s'effectue par une suite de réactions ou cycle de *Calvin* dont le bilan se résume par la formule :



RESUME: Les types de photosynthèses chez les microorganismes.

Il y a deux principaux types de photosynthèse : **oxygénique** (le genre qui génère O₂) et **anoxygénique** (le genre qui ne génère pas O₂). La photosynthèse **oxygénique** est utilisée par les **cyanobactéries**, les **algues** et les plantes. Dans la **photosynthèse oxygénique**, l'eau est le donneur d'électrons, dont la dissociation libère de l'oxygène tandis que de l'eau est reformée à partir d'un atome d'oxygène du dioxyde de carbone :

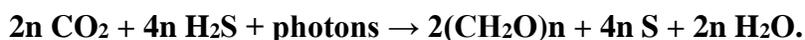


On simplifie généralement l'équation en éliminant 2n H₂O dans les deux termes, ce qui donne :



La **photosynthèse anoxygénique** utilise d'autres composés que l'eau comme donneur d'électrons. Elle s'effectue sans production d'O₂ et est pratiquée en **anaérobiose**. Elle est principalement utilisée par les bactéries pourpres sulfureuses, les bactéries vertes sulfureuses et non sulfureuses, les Héliobactéries et les Acidobactéries.

Ainsi, les bactéries pourpres sulfureuses utilisent le sulfure d'hydrogène **H₂S** :



Les bactéries sulfureuses vertes sont par exemple capables d'utiliser le sulfure d'hydrogène H₂S (ex. *Chlorobium*), le thiosulfate S₂O₃²⁻ et le soufre élémentaire S⁰ comme donneurs d'électrons, tandis que les bactéries vertes non sulfureuses peuvent utiliser l'hydrogène H₂ (ex. *Chloronema*).

D'une manière générale, **chez les procaryotes**, le donneur d'électrons (RH₂) **n'est pas de l'eau**, comme c'est le cas chez les plantes.

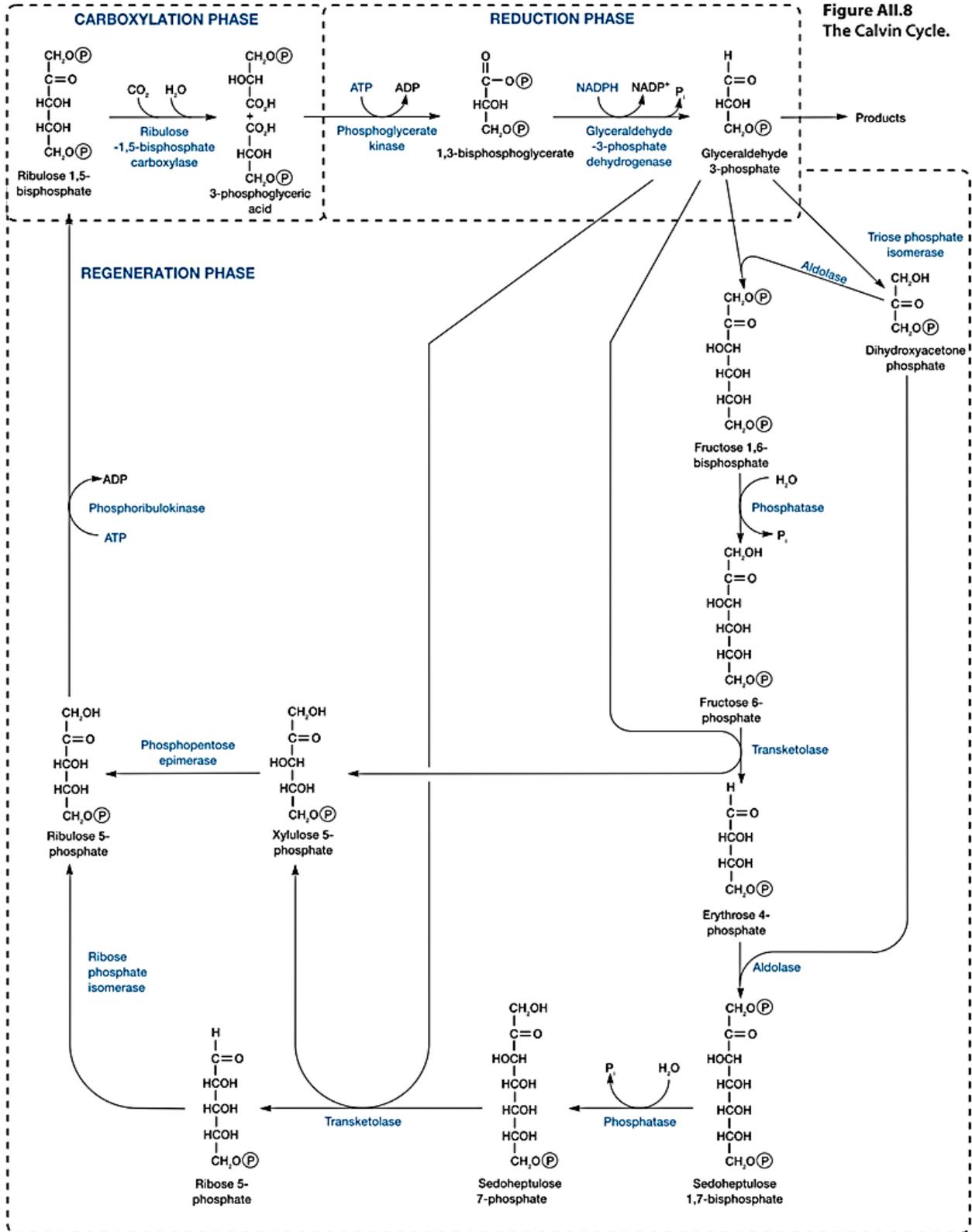


Figure 06: Cycle de Calvin

Tableau 01: Exemples des microorganismes photosynthétiques.

	photosynthèse anoxygénique					photosynthèse oxygénique
Groupe	Bactéries Pourpres			Bactéries Vertes		
Famille	Pourpres sulfureuses		Pourpres non sulfureuses	Bactéries vertes sulfureuses	Bactériesvertes filamenteuses multicellulaire (non sulfureuse)	cyanobactéries
	Chromatiaccae	Ectothiorhodospiraccae				
Genre	Chromatium Thiocystis Thiospirillum Thiocaspa Lamprobacter Lamprocystis Thiodictyon Amocbobacter Thiopedia	Ectothiorhodospira	Rhodospirillum Rhodopil Rhodobacter Rhodopseudomonas Rhodomicrobium Rhodocyclus	Chlorobium Prosthecochloris Pelodictyon Ancalochloris Chloroherpeton	Chloroflexus Heliobacterium Oscillochloris Chloronema	Anabaena Oscillatoria Microcystis

1.3.1. Microorganismes photolithotrophes

Les microorganismes **photolithotrophes** utilisent l'énergie rayonnante d'origine solaire comme source d'énergie, le CO₂ atmosphérique comme source de C et un composé minéral comme source de H⁺ et d'électrons (les sulfures, ou H₂). Chez les Thiobactériales = **Bactéries vertes sulfureuses** (*Chlorobium*) ou **non sulfureuses** (*Chloronema*), le donneur de H⁺ et d'électrons est le sulfure d'hydrogène (hydrogène sulfuré) **H₂S** dans le premier cas, le dihydrogène atmosphérique **H₂** dans le second cas. La photosynthèse s'effectue sans production d'O₂ (photosynthèse anoxygénique). Les **Bactéries photosynthétiques pourpres** vivant dans les eaux ou les boues sulfureuses (Thiorhodobactériales = **Bactéries pourpres sulfureuses**: *Thiospirillum*) ou **non sulfureuses** (*Rhodobacter*) pratiquent une photosynthèse *anoxygénique* (ni oxydation de l'eau, ni production d'O₂). Ces cellules contiennent, en plus des **bactériochlorophylles**, des **caroténoïdes** qui masquent la couleur verte et confère une couleur pourpre aux cellules. Les pigments assimilateurs sont localisés dans un système membranaire dépendant de la membrane plasmique.

1.3.2. Microorganismes photoorganotrophie

Les microorganismes **photo-organotrophes** utilisent l'énergie rayonnante d'origine solaire comme source d'énergie, le CO₂ comme source de C et un composé organique (alcool, acide...) préexistant comme source de H⁺ et d'électrons.

Il n'y a pas d'organismes strictement photoorganotrophes; ce métabolisme est toujours pratiqué de manière transitoire par des organismes d'un autre type trophique lors d'exigences fortes.

Ex. *Rhodospseudomonas viridis* Bactérie pourpre non sulfureuse, Rhodospirillaceae.

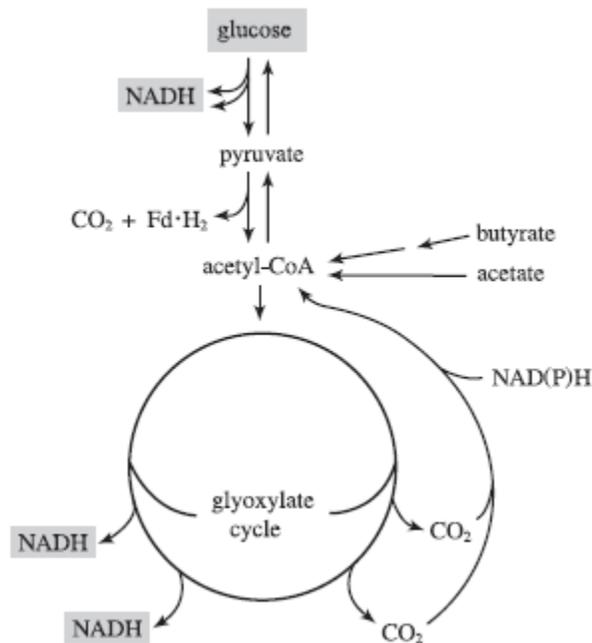


Figure 07: Métabolisme photo-organotrophe chez les bactéries pourpres.

1.4. Microorganismes chimiotrophes (La chimiotrophie): mécanismes et donneurs d'électrons.

Les bactéries **chimiotrophes** utilisent l'**énergie chimique** (énergie "contenue" dans les liaisons entre atomes) libérées lors de **réactions d'oxydations de substrats réduits** (RH₂) que l'on appelle substrats énergétiques ou sources d'énergie.

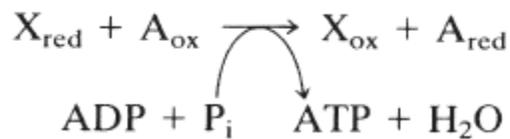
Les levures, les moisissures et la plupart des bactéries, sont incapables d'effectuer la photosynthèse. Ces microorganismes utilisent l'énergie libérée au cours des réactions chimiques.

Les réactions d'oxydation s'effectuent de plusieurs façons :

- Perte d'électron $Fe^{++} \rightarrow Fe^{+++} + e^{-} + \text{énergie}$	- Déshydrogénation $R-CH_2OH \rightarrow R-CHO + 2H^{+} + 2e^{-} + \text{énergie}$
- Hydratation-déshydrogénation $R-CHO + H_2O \rightarrow R-COOH + 2H^{+} + 2e^{-} + \text{énergie}$	- Déshydrogénation couplée à une décarboxylation $R-CO-COOH + H_2O \rightarrow R-COOH + CO_2 + 2H^{+} + 2e^{-} + \text{énergie}$

Dans la cellule, la réaction d'oxydation d'un composé réduit est toujours accompagnée de la **réduction** d'une autre molécule **oxydée** qui joue le rôle d'accepteur d'électrons transitoire ou final. Les accepteurs transitoires d'électrons, qualifiés de transporteurs d'électrons, sont souvent des **coenzymes** qui passent de l'état oxydé à l'état réduit, puis de l'état réduit à l'état oxydé au cours de réactions d'oxydoréductions successives jusqu'à la fixation des électrons sur un accepteur final.

La réoxydation d'une molécule qui vient d'être réduite permet la libération d'énergie qui pourra participer à la formation de liaisons chimiques à hauts potentiels d'hydrolyse, comme les liaisons anhydride phosphorique de l'ATP.



Comme pour les bactéries phototrophes, on distingue au sein des bactéries **chimiotrophes** les:

1.4.1. Microorganismes chimio-lithotrophes

Les Bactéries chimiolithotrophes tirent leur énergie de l'oxydation de composés minéraux, utilisent le CO_2 comme source de C, des composés minéraux variés comme source de pouvoir réducteur, H^{+} et d'électrons (substrat à oxyder = *carburant*), des accepteurs d'électrons variés (accepteur à réduire = *carburant*). Le pouvoir réducteur des ions inorganiques étant trop faible pour être utilisé pour la réduction du CO_2 , toutes ces bactéries possèdent des enzymes membranaires telles que la **NADH déshydrogénase**.

Le flux des électrons cédés par les ions inorganiques provoque le pompage de H^{+} hors de la cellule (**création d'une force protomotrice**); leur retour dans la cellule active à la fois l'**ATP-synthase** et la **NADH-DHase** (réduction de NAD^{+} ou $NADP^{+}$ grâce aux électrons issus du flux

inverse activé par le gradient de H⁺). L'accepteur final est le plus souvent le O₂ (espèces aérobies) mais aussi les NO₃⁻ dans le cas d'espèces **anaérobies** (*Thiobacillus denitrificans*, *Pseudomonas*): on parle de « *respiration nitrate* ».

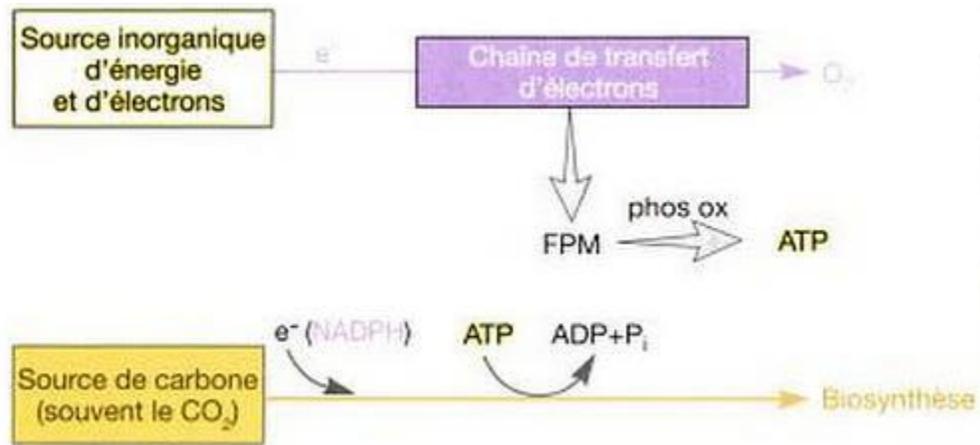


Figure 8: Processus de fourniture d'énergie chez les chimiolithotrophes.

Les bactéries chimiolithotrophes et Archaeées oxydent des molécules inorganiques (p.ex., H₂S et NH₃), qui servent de sources d'énergie et d'électrons. Les électrons libérés passent à travers un système de transfert d'électrons, générant une force proton motrice (FPM). L'ATP est synthétisée par phosphorylation oxydative (Phos-Ox). La plupart des chimiolithotrophes utilisent l'O₂ comme accepteur final d'électrons. Certains d'entre eux, cependant, peuvent utiliser d'autres molécules exogènes comme accepteur final. Notez qu'une molécule autre que la source d'énergie fournit le carbone pour la biosynthèse. Beaucoup de chimiolithotrophes sont autotrophe.

Exemples de quelques chimio-lithotrophes:

- Les **Bactéries nitrifiantes** utilisent différents composés **azotés**; elles participent à la minéralisation des protéines qui se réalise par étapes dans le sol. Elles possèdent la capacité d'utiliser l'ammonium ou le nitrite comme seule source d'énergie et d'effectuer la fixation autotrophe du CO₂ via le cycle de Calvin. Toutes les bactéries nitrifiantes appartiennent à un des genres suivants : *Nitrobacter*, *Nitromonas*, *Nitrococcus*, *Nitrospina* et *Nitrospira*.

- Les **Sulfobactéries**, libres ou symbiotiques, utilisent les composés **soufrés** et produisent des **sulfates** (Bactéries sulfo-oxydantes ou sulfo-bactéries) :





- Les **Sidérobactéries** appelées aussi bactéries ferrugineuses ou ferrobactéries constituent une partie de la microflore normale des eaux souterraines. Elles utilisent les composés *ferreux*, FeII (Fe²⁺):



- Les **Hydrogenomonas** utilisent le dihydrogène atmosphérique :



1.4.2 Microorganismes chimio-organotrophes

Les micro-organismes chimio-organotrophes utilisent la matière organique préexistante à la fois comme source d'énergie, de C et de pouvoir réducteur. Les Bactéries de ce type sont les plus nombreuses et diffèrent par leurs rapports avec le dioxygène et par l'origine de la matière organique qu'elles utilisent.

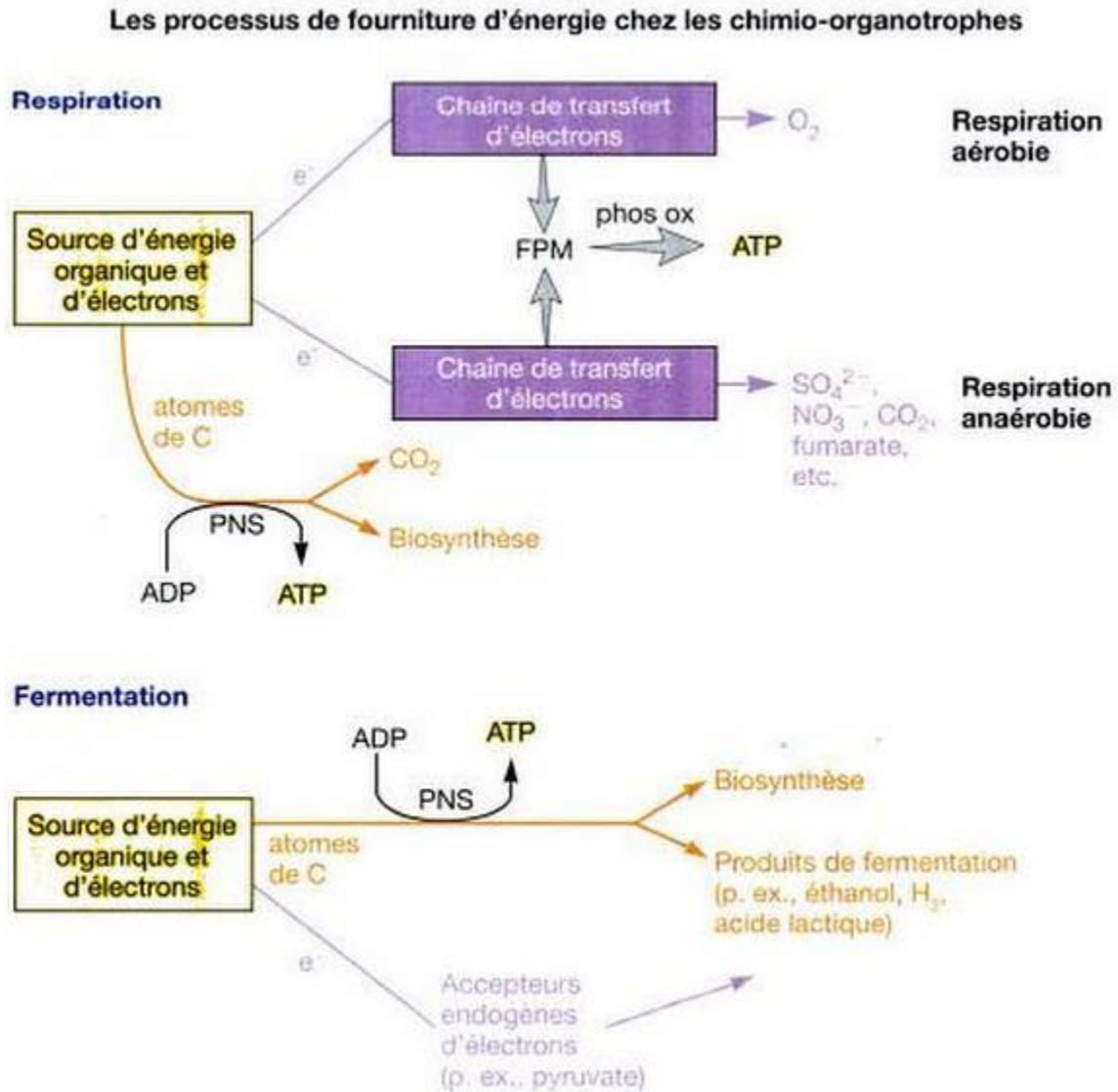


Figure 09: Processus de fourniture d'énergie chez les chimio-organotrophes

Des molécules organiques servent de sources d'énergie et d'électrons pour les trois processus de fourniture d'énergie employés par les chimio-organotrophes. Dans les respirations aérobie et anaérobie, les électrons traversent un système de transfert d'électrons. Cela génère une force proton motrice (FPM) qui est utilisée pour synthétiser la plupart de l'ATP cellulaire, par un mécanisme appelé phosphorylation au niveau du substrat (PNS). Dans la respiration aérobie, l' O_2 joue rôle d'un accepteur final des électrons. Au cours de la fermentation, des molécules organiques endogènes agissent comme accepteurs d'électrons, le flux d'électron n'est pas couplé à une synthétase d'ATP, et celle-ci n'est formée que par phosphorylation au niveau du substrat.