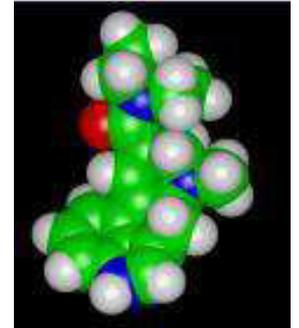


Microbiologie BIOL 3253

Le métabolisme: la libération et la conservation de l'énergie



Vue d'ensemble du métabolisme



- **Métabolisme**

- L'ensemble de toutes les réactions chimiques se déroulant dans la cellule.

- **Catabolisme**

- Fragmentation de molécules plus grosses et plus complexes en molécules plus petites et plus simple avec libération d'énergie.
- Une partie de cette énergie est captée et rendue disponible pour un travail; le reste est libéré sous forme de chaleur.

- **Anabolisme**

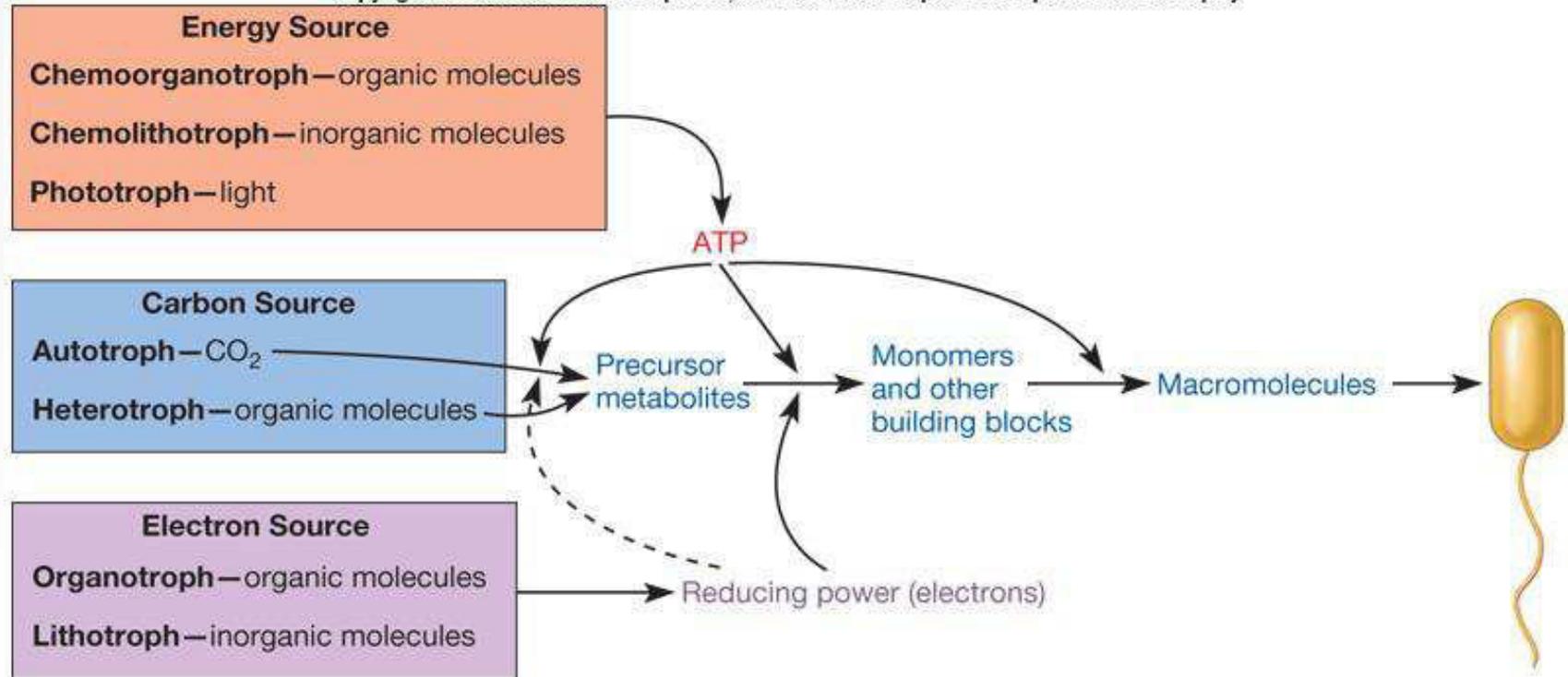
- Synthèse de molécules complexes à partir de précurseurs plus simples avec consommation d'énergie.



Vue d'ensemble du métabolisme



Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



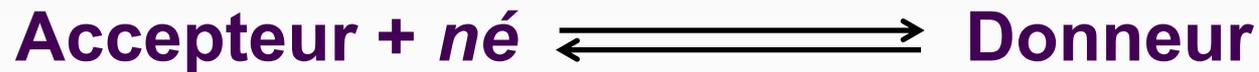
L'anabolisme a besoin d'une source d'électrons, stockés sous forme de pouvoir réducteur. Le pouvoir réducteur est nécessaire parce que l'anabolisme est un processus réducteur; il ajoute des électrons aux petites molécules qui sont utilisées pour construire les macromolécules.



Les réactions d'oxydo-réduction et les transporteurs d'électrons



- Plusieurs processus métaboliques impliquent des réactions d'oxydo-réduction (transfert d'électrons).
- Le transfert d'électrons d'un donneur à un receveur:



- Une **oxydation** est une perte d'électrons.
- Une **réduction** est un gain d'électrons.
- Peut ultimement générer une libération d'énergie, qui peut être conservée et utilisée sous la forme d'ATP.

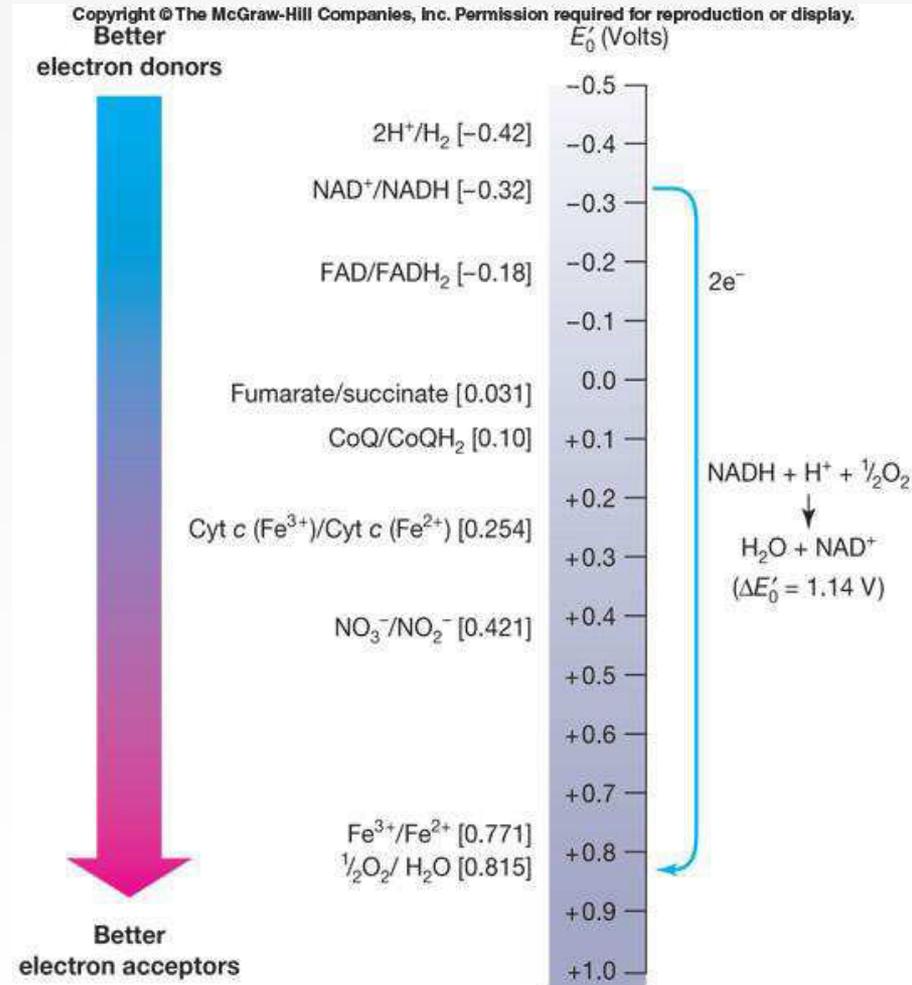
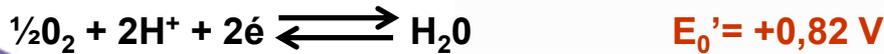


Les réactions d'oxydo-réduction et les transporteurs d'électrons



Le **potentiel de réduction standard** (E_0') mesure la tendance à perdre des électrons et se mesure en Volts. Plus cette valeur est négative et meilleure sera la capacité de donner des électrons. À l'inverse, plus la valeur est élevée et meilleure sera la capacité à recevoir des électrons.

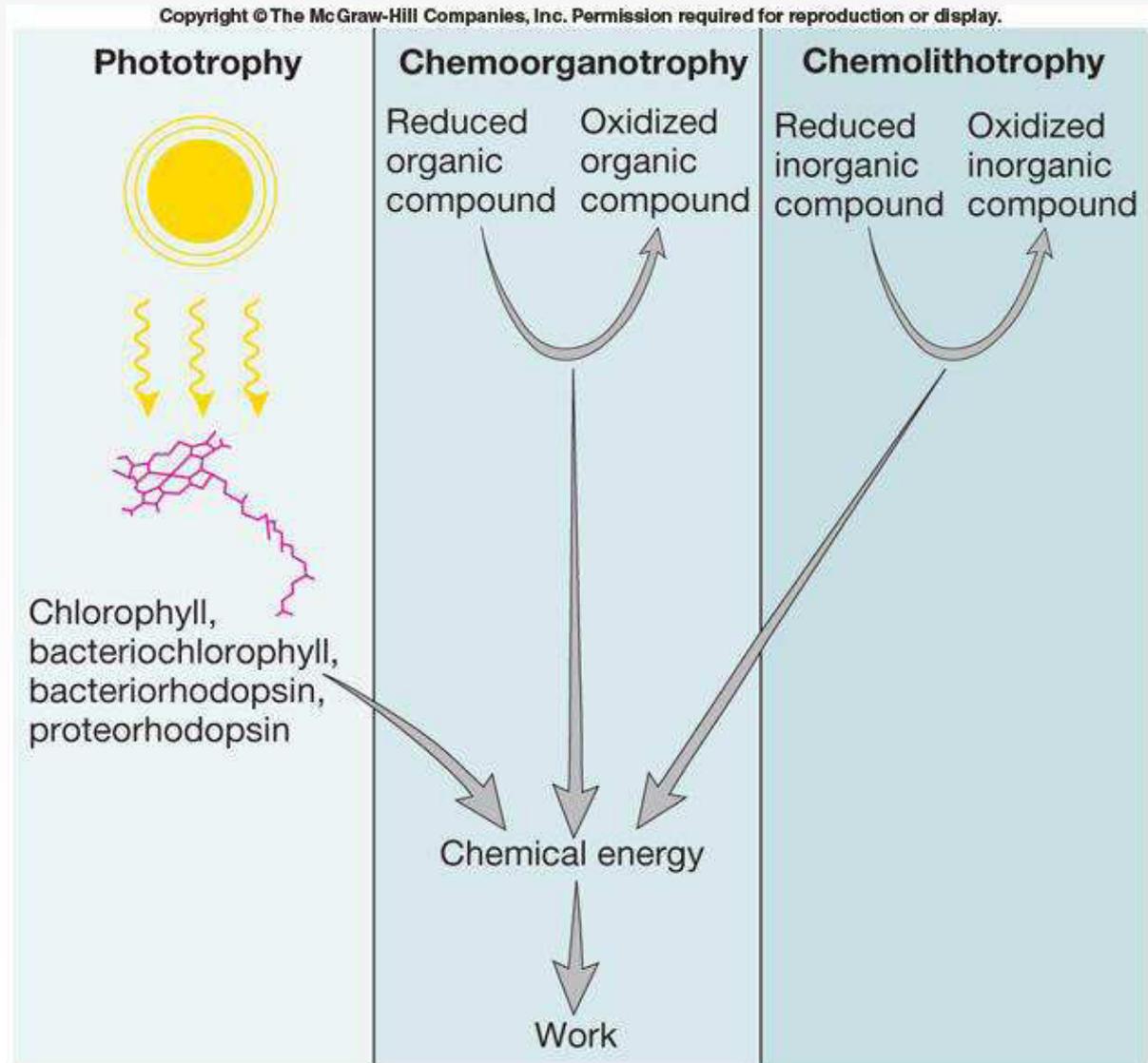
Exemple:



Les sources d'énergie des micro-organismes



Les électrons libérés lors de l'oxydation de sources d'énergie chimique doivent être acceptés par des accepteurs d'électrons.

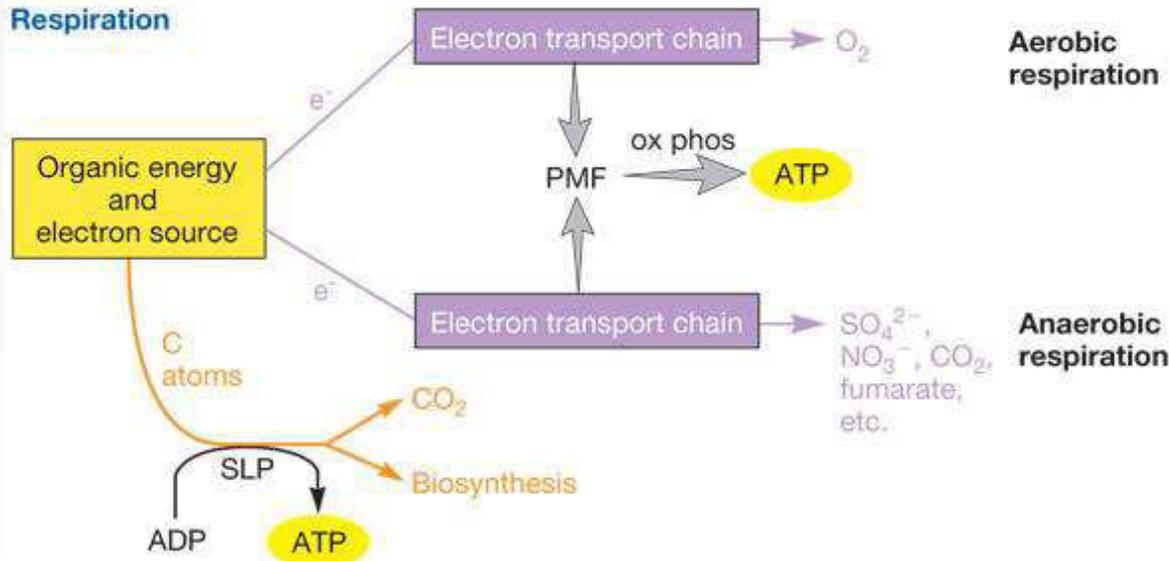




L'énergie chez les chimio-organotrophes

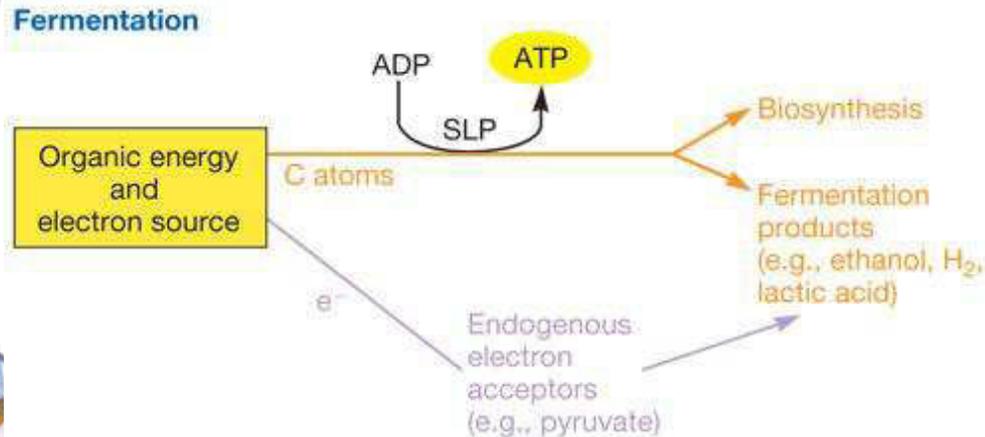
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.
Chemoorganotrophic Fueling Processes

Respiration



Respiration: Les électrons traversent un système de **transfert des électrons**. Cela génère une **force proton-motrice (FPM)** qui est utilisée pour synthétiser de l'ATP par un mécanisme appelé **phosphorylation oxydative**.

Fermentation

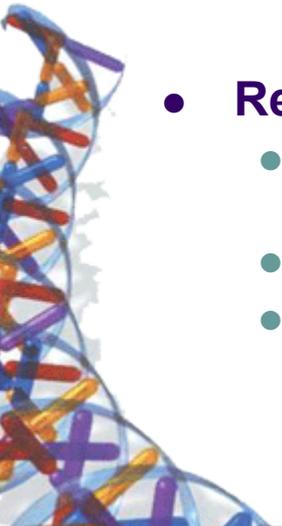


Fermentation: Des molécules endogènes agissent comme accepteurs d'électrons. Le flux d'électrons n'est pas couplé à une synthèse d'ATP, et cette dernière n'est formée que par **phosphorylation au niveau du substrat**.

Le métabolisme chez les chimio-organotrophes



- **Fermentation**
 - Le substrat énergétique est dégradé en utilisant des accepteurs d'électrons endogènes.
 - S'effectue souvent en conditions anaérobiques.
 - Une quantité d'énergie limitée est rendue disponible.
- **Respiration aérobique**
 - Le substrat énergétique est dégradé en utilisant l'oxygène comme accepteur d'électrons exogène.
 - S'effectue en conditions aérobiques.
 - Génère une grande quantité d'énergie, principalement grâce à l'activité de la chaîne de transfert d'électrons.
- **Respiration anaérobique**
 - Le substrat énergétique est dégradé en utilisant des molécules autres que l'oxygène comme accepteurs d'électrons exogènes.
 - S'effectue en conditions anaérobiques.
 - Peut produire une grande quantité d'énergie (dépendant du potentiel de réduction de la source d'énergie et des accepteurs d'électrons), principalement grâce à l'activité de la chaîne de transfert d'électrons.

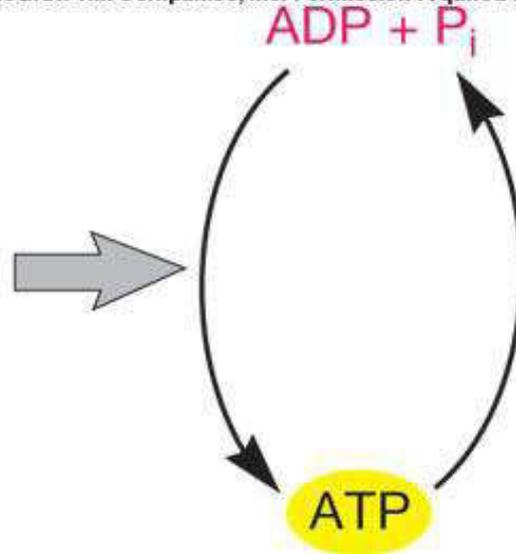


Le cycle de l'énergie cellulaire

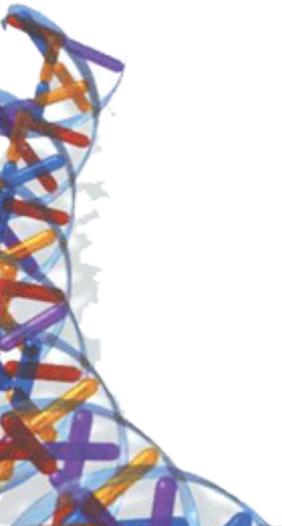


Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Aerobic respiration
Anaerobic respiration
Fermentation
Photosynthesis
Chemolithotrophy



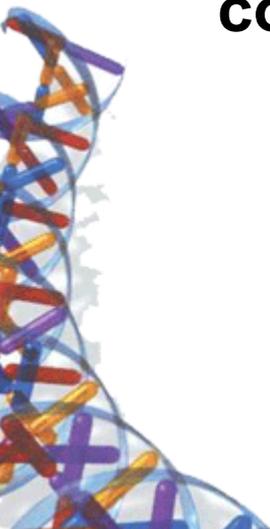
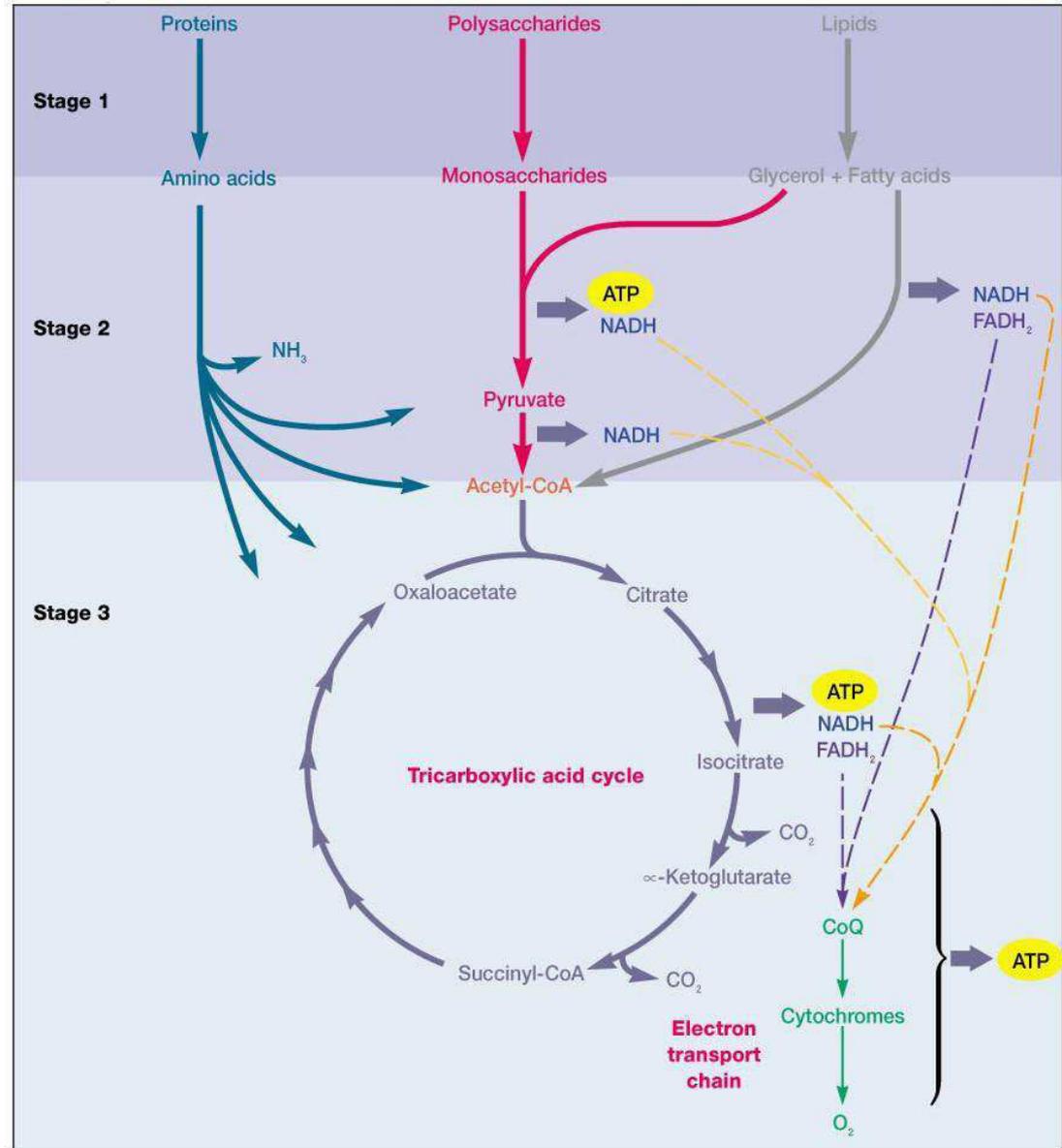
Chemical work
Transport work
Mechanical work



Les trois étapes de la respiration aérobie chez un chimio-organohétérotrophe



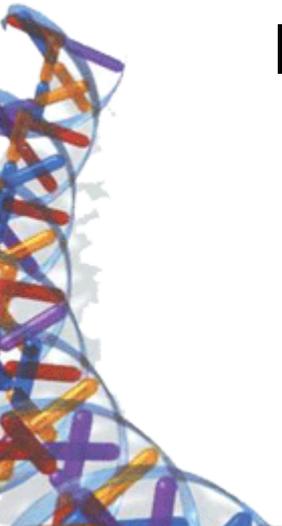
Plusieurs sources différentes d'énergie sont dirigées vers des voies cataboliques communes.



Les trois étapes de la respiration aérobie chez un chimio-organohétérotrophe



- **Grosses molécules organiques nutritives (protéines, polysaccharides et lipides) → petites molécules plus simples**
- **Les petites molécules sont dégradées en pyruvate et/ou Acétyl-CoA.**
- **Ces molécules sont oxydées et dégradées par le cycle des acides tricarboxyliques.**



Étape 1: les glucides



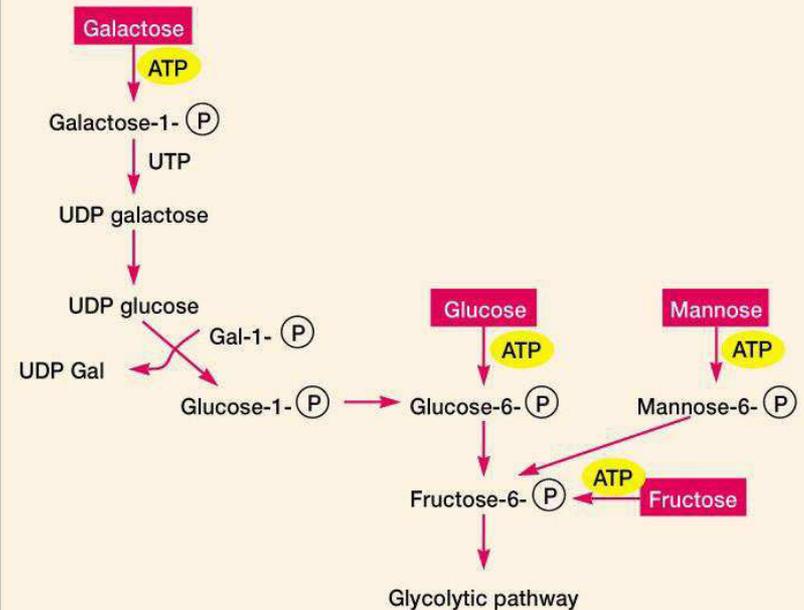
- **Monosaccharides**

- Converti en d'autres sucres (i.e. glucose, fructose, mannose) qui entrent dans la voie de glycolyse après phosphorylation par l'ATP.

- **Disaccharides et polysaccharides**

- Clivés par hydrolyse ou phosphorolyse.

Monosaccharide interconversions



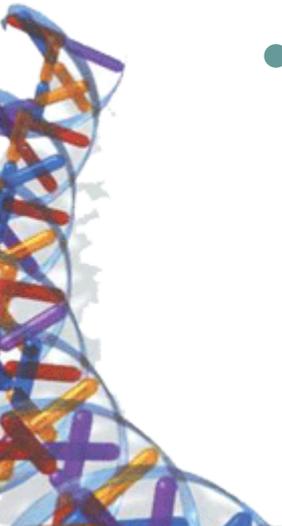
Disaccharide cleavage

1. **Maltose** + H₂O $\xrightarrow{\text{maltase}}$ 2 glucose
Maltose + P_i $\xrightarrow{\text{maltose phosphorylase}}$ β-D-glucose-1-(P) + glucose
2. **Cellobiose** + P_i $\xrightarrow{\text{cellobiose phosphorylase}}$ α-D-glucose-1-(P) + glucose
3. **Sucrose** + H₂O $\xrightarrow{\text{sucrase}}$ glucose + fructose
Sucrose + P_i $\xrightarrow{\text{sucrose phosphorylase}}$ α-D-glucose-1-(P) + fructose
4. **Lactose** + H₂O $\xrightarrow{\beta\text{-galactosidase}}$ galactose + glucose

Étape 1: les polymères de réserve



- **Utilisés comme source d'énergie en absence de nutriments externes.**
 - **Glycogène et amidon.**
 - **Clivés par phosphorolyse.**
$$(\text{glucose})_n + P_i \rightarrow (\text{glucose})_{n-1} + \text{glucose-1-P}$$
 - **Le glucose-1-P peut entrer dans le cycle de la glycolyse.**
 - **Poly- β -hydroxybutyrate (PHB).**
 - **Oxydation en acétoacétate.**
 - **L'acétoacétate est converti en acétyl-CoA qui peut être oxydé dans le cycle des acides tricarboxyliques.**

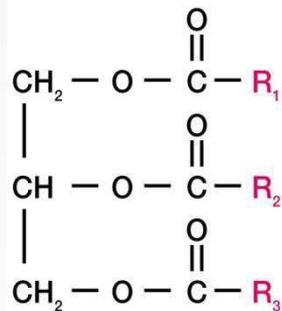


Étape 1: les lipides



- Triglycérides

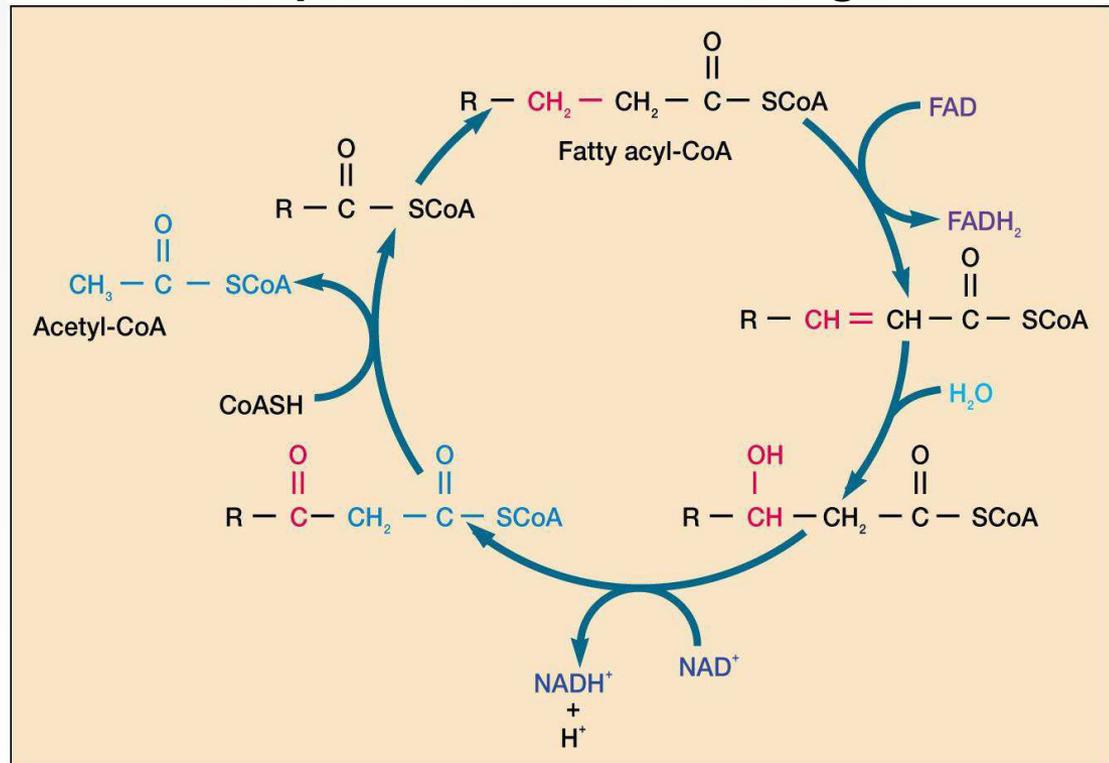
- Source d'énergie courante.



- Hydrolysée en glycérol et acides gras par des lipases.

- Le glycérol est dégradé par la glycolyse.
- Les acides gras sont souvent oxydés dans la voie de la β -oxydation.

La β -oxydation des acides gras



Étape 1: les protéines et acides aminés

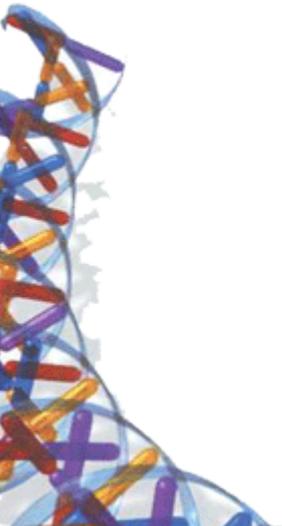


- **Protéases**

- Hydrolyzation des protéines et acides aminés.

- **Désamination**

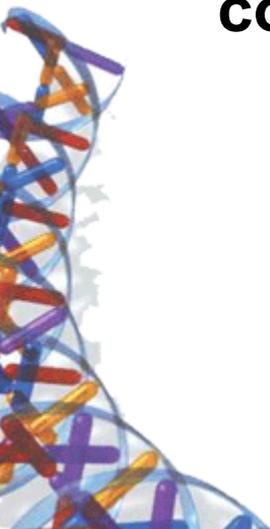
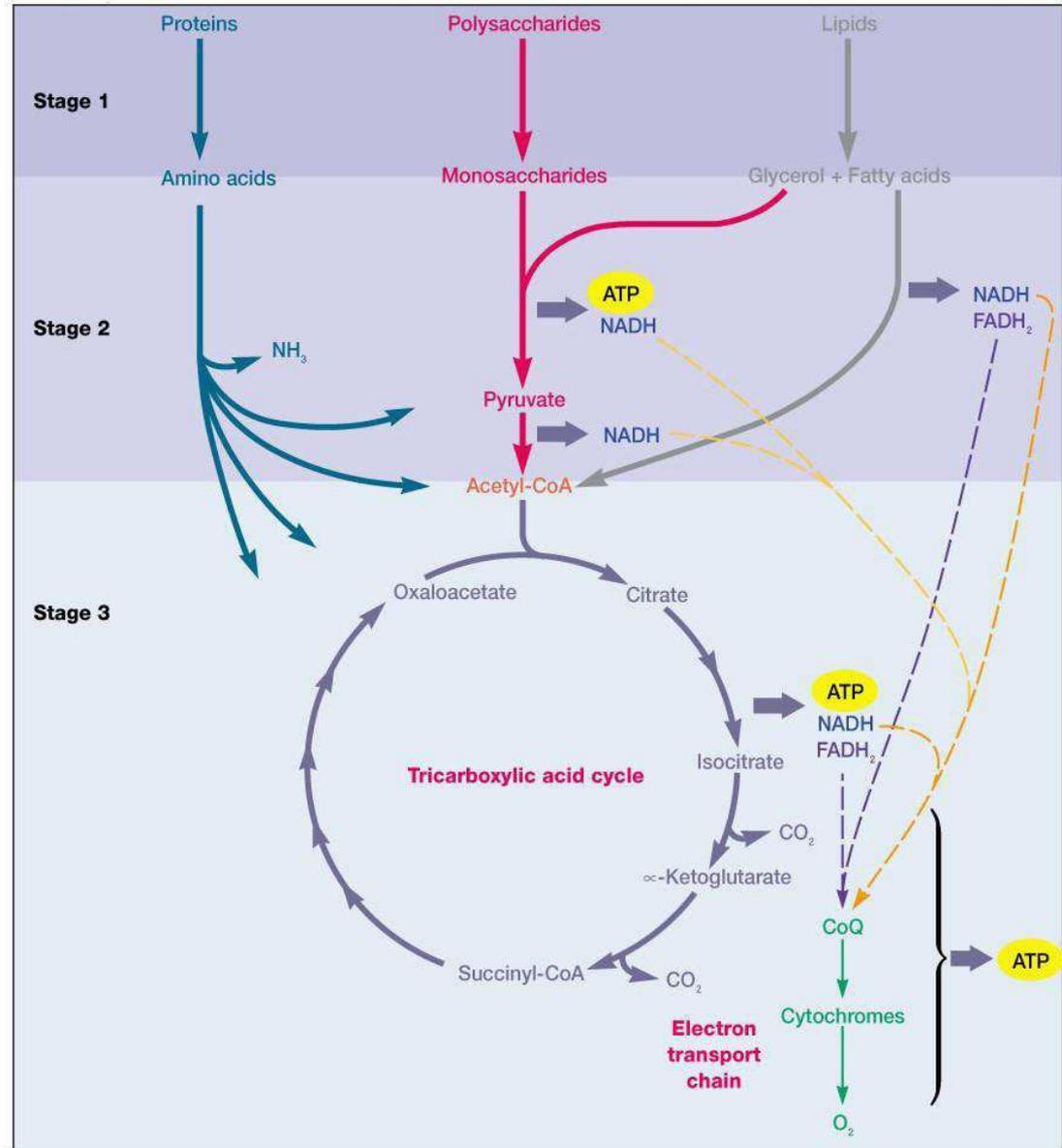
- Retire le groupe aminé d'un acide aminé.
- L'acide organique résultant de la désamination peut être converti en pyruvate, en acétyl-CoA ou en un intermédiaire du cycle des acides tricarboxyliques.
 - Peut être oxydé pour libérer de l'énergie.



Les trois étapes de la respiration aérobie chez un chimio-organohétérotrophe



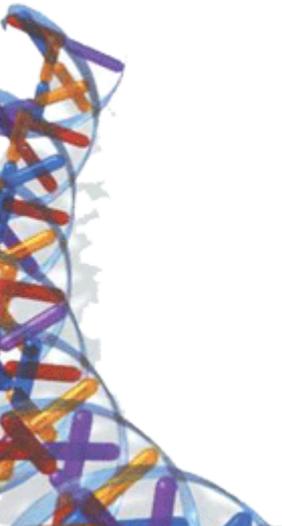
Plusieurs sources différentes d'énergie sont dirigées vers des voies cataboliques communes.



Étape 2 avec l'exemple du glucose: sa dégradation en pyruvate



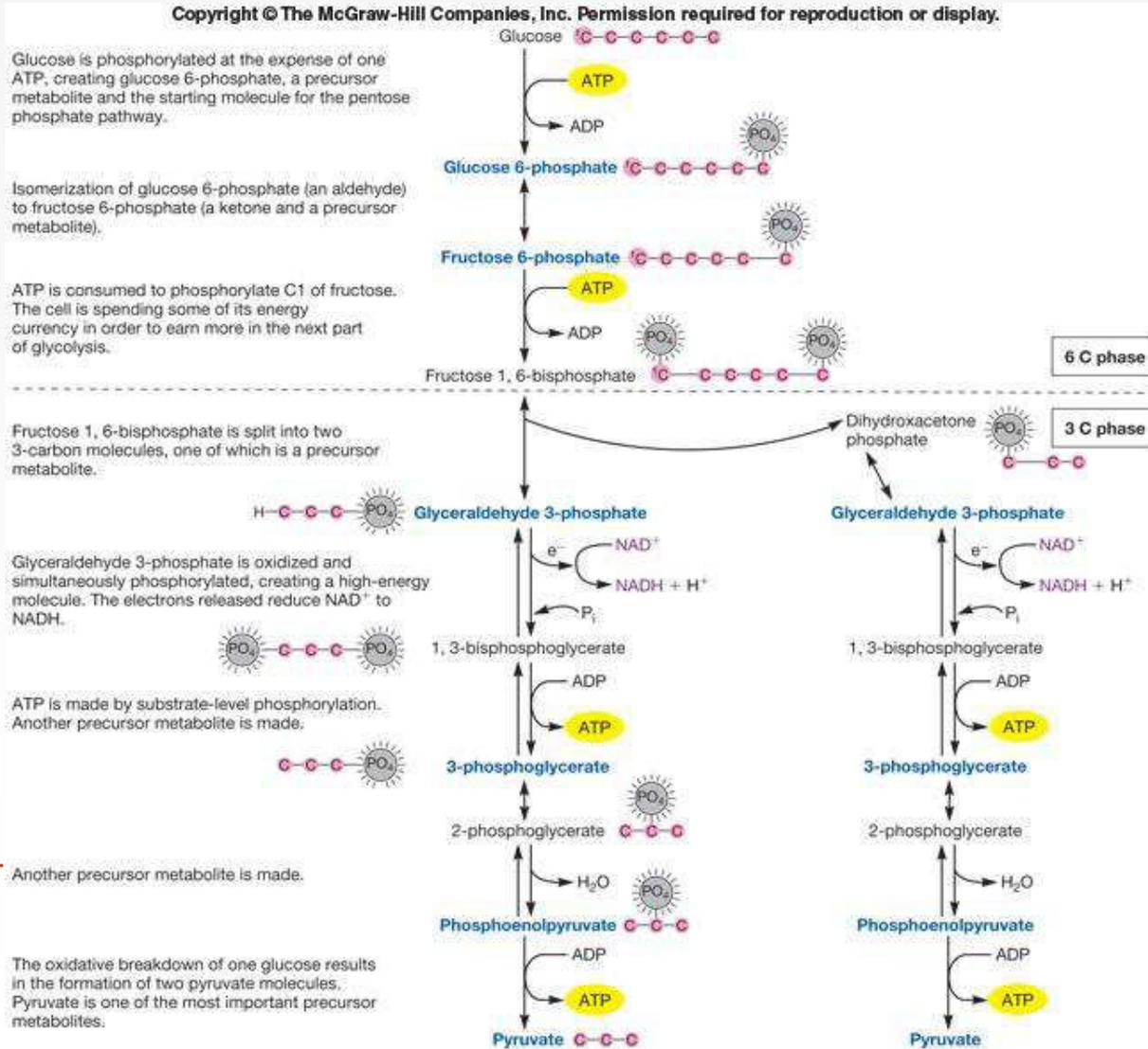
- **Trois voies métaboliques:**
 - **Voie d'Embden-Meyerhof (glycolyse)**
 - **Voie des pentoses phosphates**
 - **Voie d'Entner-Doudoroff**



Étape 2: voie d'Embden-Meyerhof



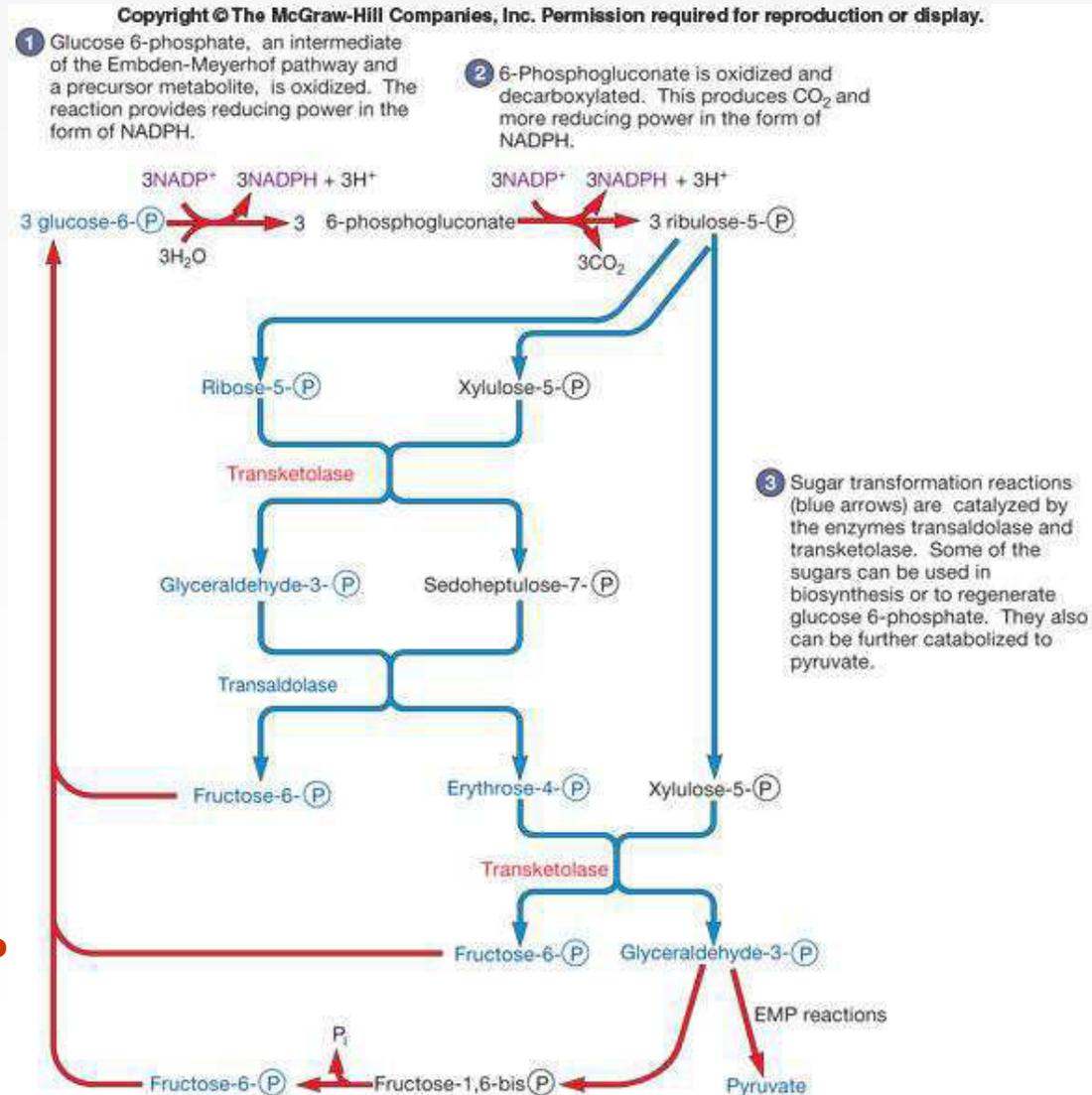
- Aussi appelée glycolyse.
- Localisée dans le cytoplasme des procaryotes et des eucaryotes.
- Opère en aérobiose ou anaérobiose.
- Résumé de la réaction:



Étape 2: la voie des pentoses phosphates



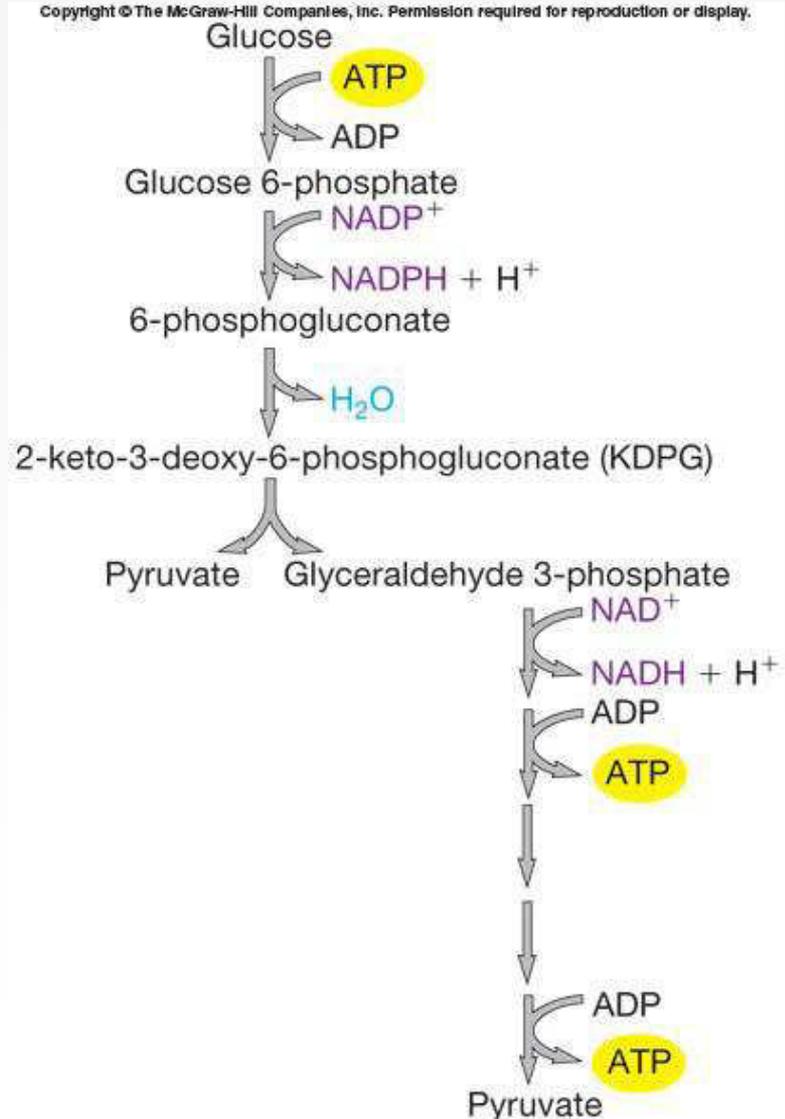
- Aussi appelée **voie des hexoses monophosphates**.
- Peut être utilisée en même temps que la glycolyse.
- Opère en aérobiose ou anaérobiose.
- **Résumé de la réaction:**



Étape 2: la voie d'Entner-Doudoroff



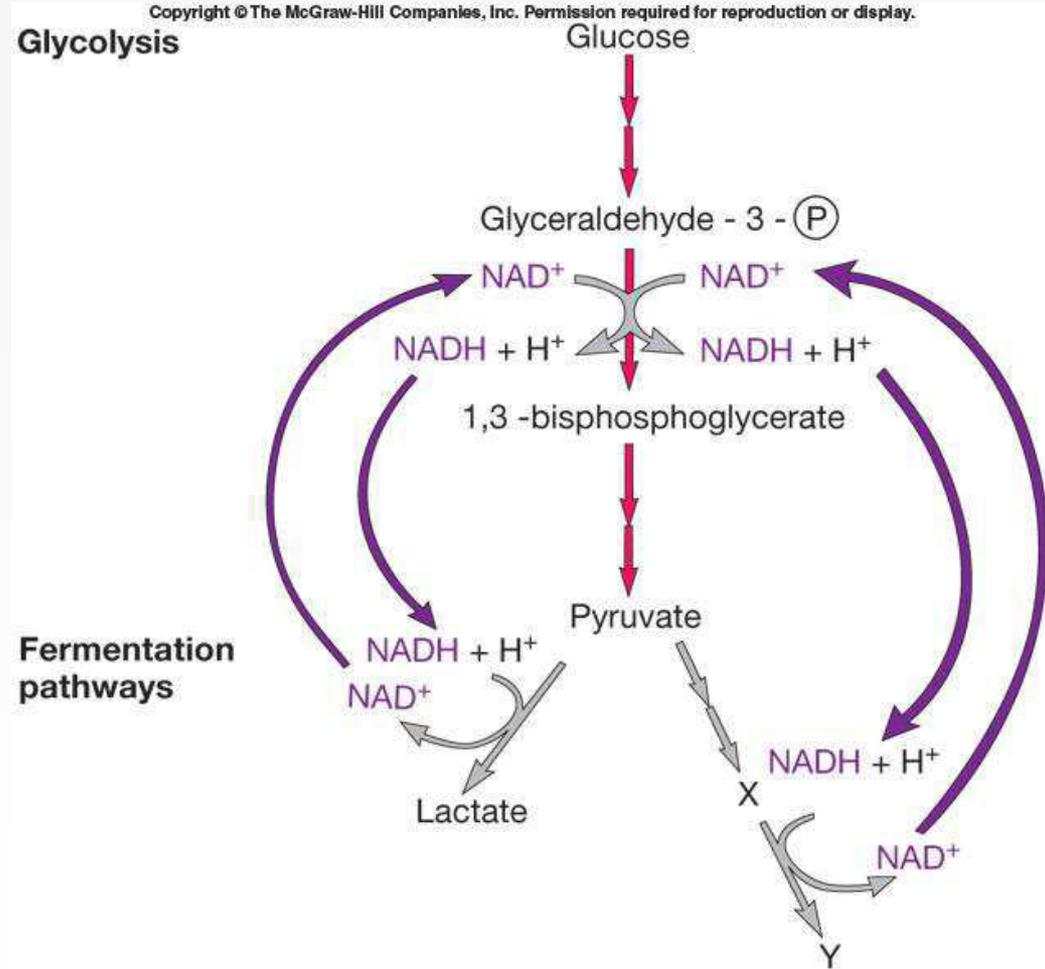
- Cette voie dégrade le glucose en pyruvate en produisant (par molécule de glucose):
 - 1 ATP
 - 1 NADPH
 - 1 NADH
- Les bactéries pour la plupart, possèdent les voies de la glycolyse et des pentoses phosphates, mais quelques-unes utilisent la voie d'Entner-Doudoroff au lieu de la glycolyse.
- On trouve la voie d'Entner-Doudoroff chez *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Agrobacterium* et quelques autres bactéries Gram-négatives.



Étape 2: les fermentations



- Le NADH produit lors de la glycolyse n'est généralement pas oxydé par la chaîne de transfert d'électrons en absence de respiration aérobie ou anaérobie. Si le NAD^+ n'est pas régénéré, la glycolyse s'arrêtera.
- De nombreux micro-organismes résolvent ce problème en utilisant du pyruvate ou de ses dérivés comme accepteurs d'électrons endogènes.
- De l'ATP est formée par phosphorylation au niveau du substrat, et l'oxygène n'est pas nécessaire.



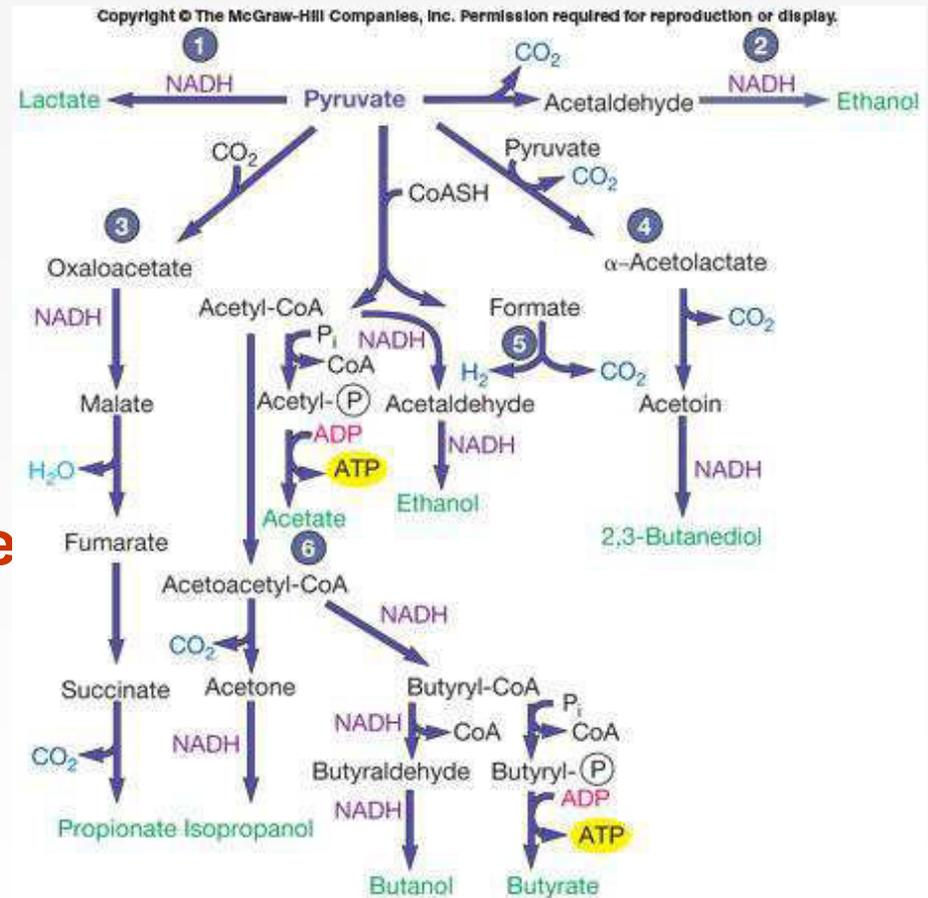
Quelques fermentations microbiennes courantes



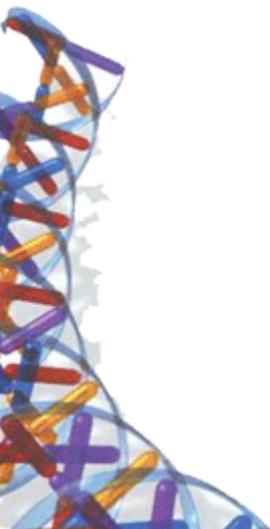
Fermentation alcoolique
sucres \rightarrow éthanol + CO_2

Fermentation lactique
pyruvate \rightarrow lactate

Fermentation butanediolique
pyruvate \rightarrow 2,3-butenediol



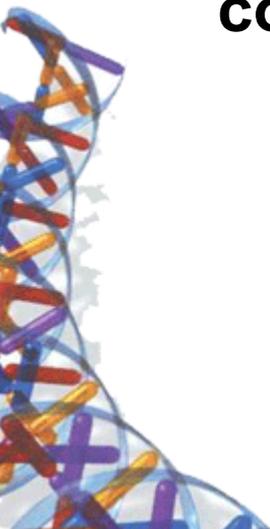
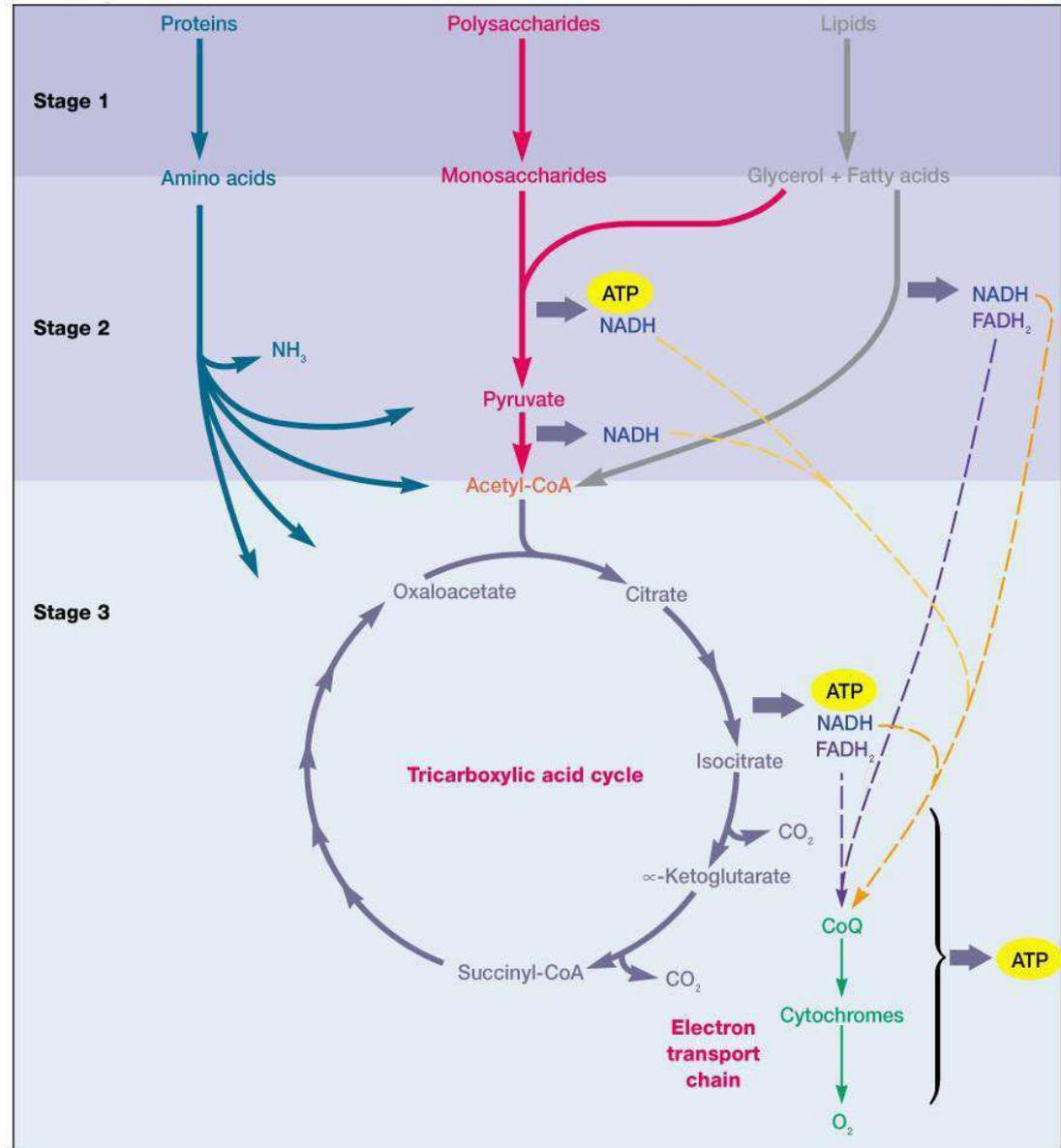
1. Lactic acid bacteria (*Streptococcus*, *Lactobacillus*), *Bacillus*
2. Yeast, *Zymomonas*
3. Propionic acid bacteria (*Propionibacterium*)
4. *Enterobacter*, *Serratia*, *Bacillus*
5. Enteric bacteria (*Escherichia*, *Enterobacter*, *Salmonella*, *Proteus*)
6. *Clostridium*



Les trois étapes de la respiration aérobie chez un chimio-organohétérotrophe



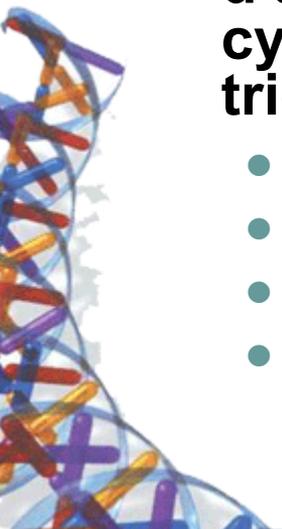
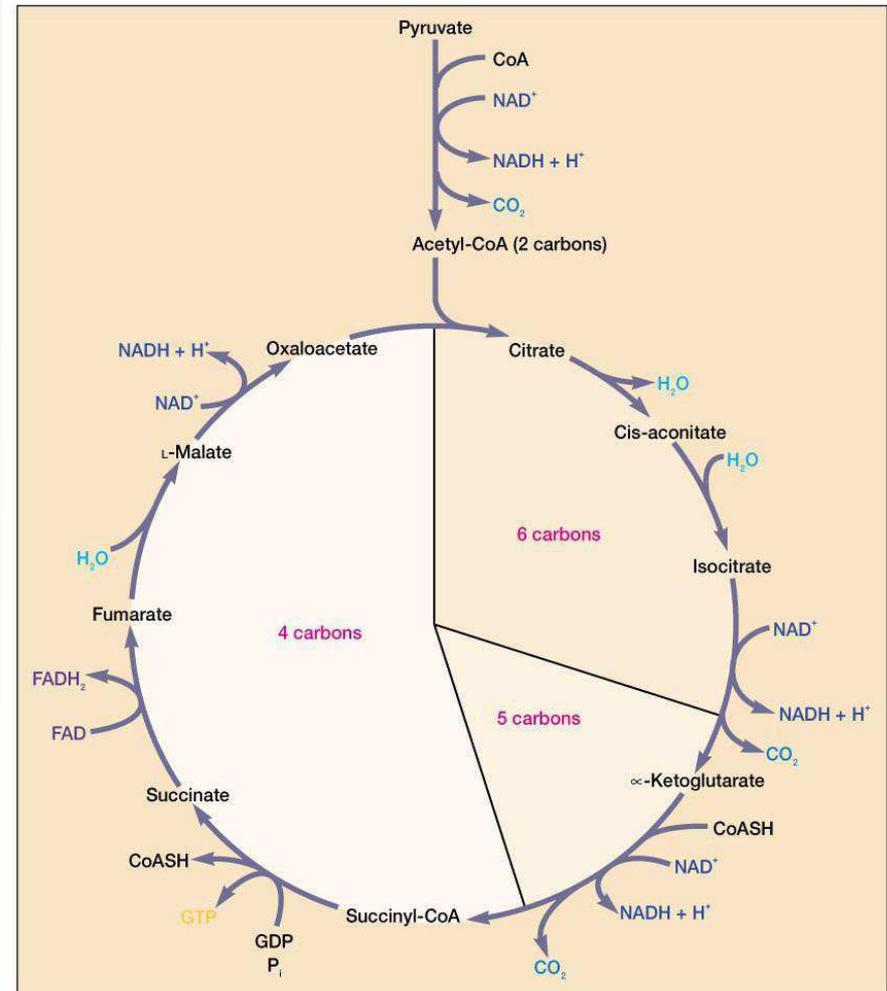
Plusieurs sources différentes d'énergie sont dirigées vers des voies cataboliques communes.



Étape 3: le cycle des acides tricarboxyliques



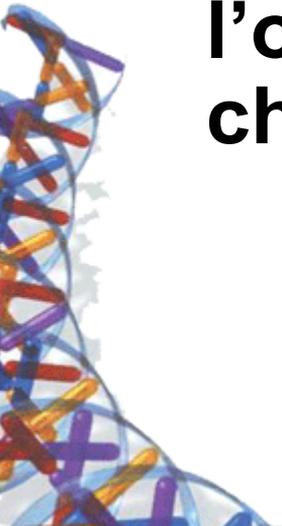
- Aussi appelé **cycle du citrate** ou **cycle de Krebs**.
- Oxydation et dégradation complètes du glucose et d'autres molécules.
- Commun chez les bactéries aérobiques, les protozoaires libres, les champignons.
- Pour chaque molécule d'acetyl-CoA oxydée, le cycle des acides tricarboxyliques produit:
 - 2 molécules de CO_2
 - 3 molécules de NADH
 - 1 FADH_2
 - 1 GTP



Étape 3: le transfert des électrons et la phosphorylation oxydative



- Peu de molécules d'ATP provenant de l'oxydation du glucose en 6 molécules de CO_2 ont été synthétisées directement au cours de la glycolyse et du cycle des acides tricarboxyliques.
- La plus grande partie de l'ATP provient de l'oxydation du NADH et du FADH_2 dans la chaîne de transfert des électrons.



Étape 3: la chaîne de transfert des électrons



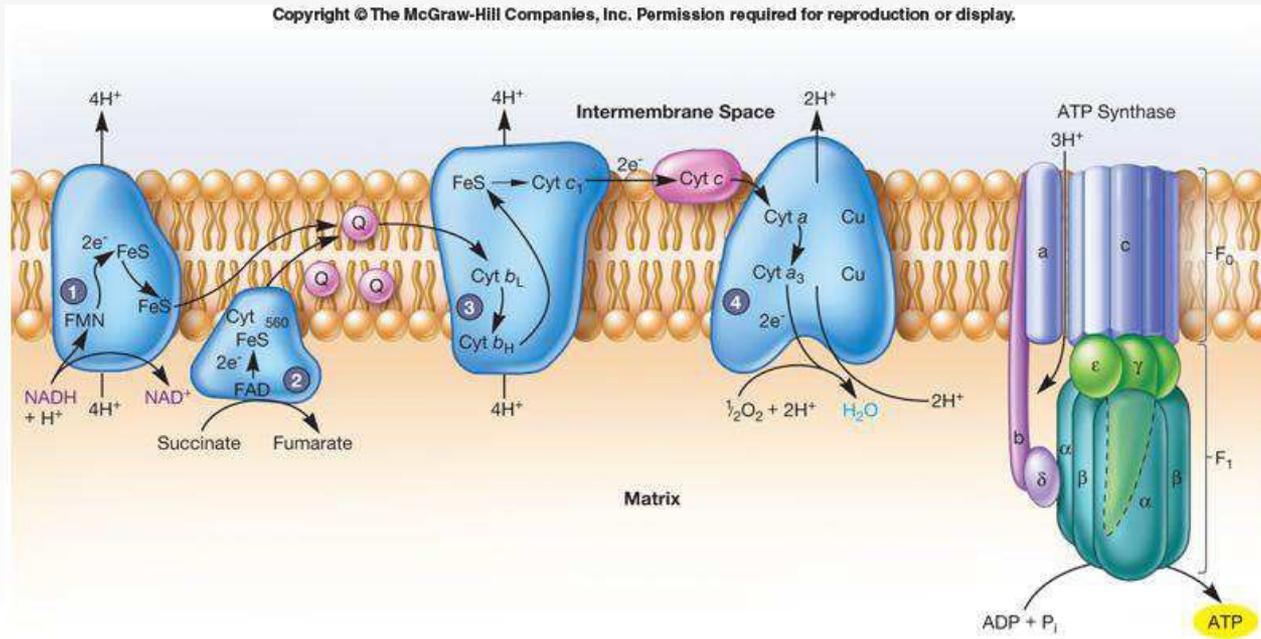
- Série de transporteurs d'électrons qui agissent ensemble pour transférer les électrons de donneurs tels que le NADH ou le FADH_2 aux accepteurs tels que l' O_2 .
- Les électrons sont transférés de transporteurs dont le potentiel de réduction est plus négatif vers ceux dont le potentiel est plus positif et enfin se combinent à l' O_2 et H^+ pour former de l'eau.
- Au fur et à mesure que les électrons sont transférés, de l'énergie est libérée.
- Une partie de l'énergie libérée est utilisée pour produire de l'ATP par un processus nommé **phosphorylation oxydative**.
 - Jusqu'à 3 molécules d'ATP sont produites par molécule de NADH en utilisant l'oxygène comme accepteur d'électron.
 - Le quotient phosphore/oxygène (P/O) = 3
 - Pour le FADH_2 , le quotient P/O = 2
 - i.e., 2 molécules d'ATP sont produites.



Étape 3: la chaîne de transfert des électrons

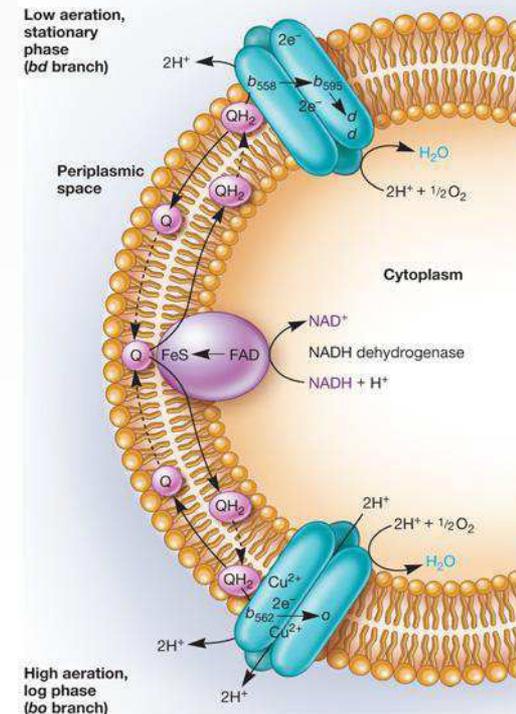


Chaîne de transfert des électrons chez les eucaryotes (mitochondries):



Chaîne de transfert des électrons chez les procaryotes (membrane plasmique):

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

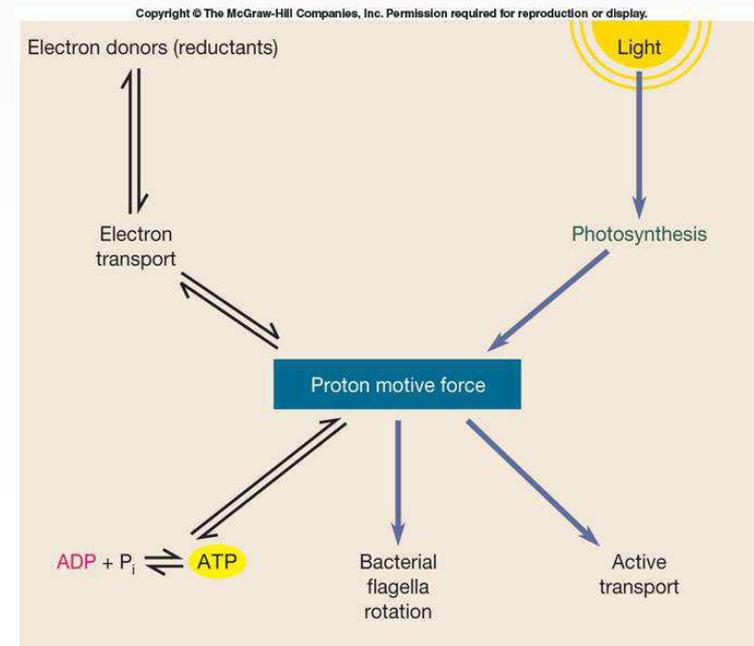
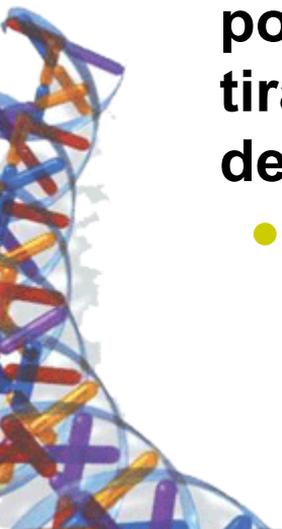


Étape 3: la phosphorylation oxydative



● Hypothèse chimiosmotique

- Hypothèse la plus largement acceptée pour expliquer la phosphorylation oxydative.
- Postule que la chaîne de transfert des électrons est organisée de sorte que les protons soient transférés à l'extérieur de la matrice et les électrons transportés à l'intérieur. Le mouvement des protons pourrait résulter soit de boucles de transporteurs (en circuit) soit de l'action de pompes à protons particulières tirant leur énergie du transfert des électrons.
 - Il en résulte une **force proton-motrice**.



Étape 3: la force proton-motrice synthétise de l'ATP

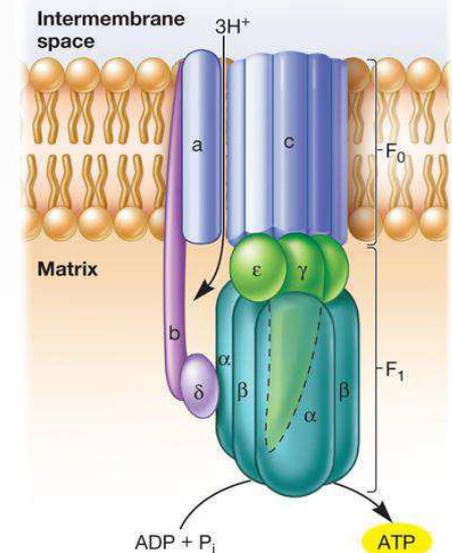


- Lorsque les protons retournent dans la matrice, mûs par la force proton-motrice, de l'ATP est synthétisé dans une réaction inverse de celle de l'hydrolyse de l'ATP.

- **ATP synthétase**

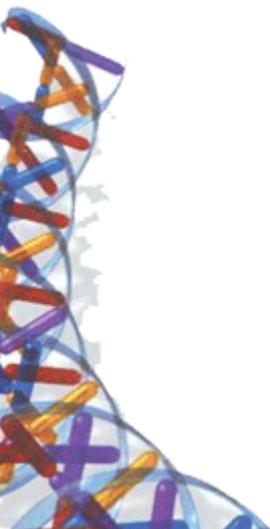
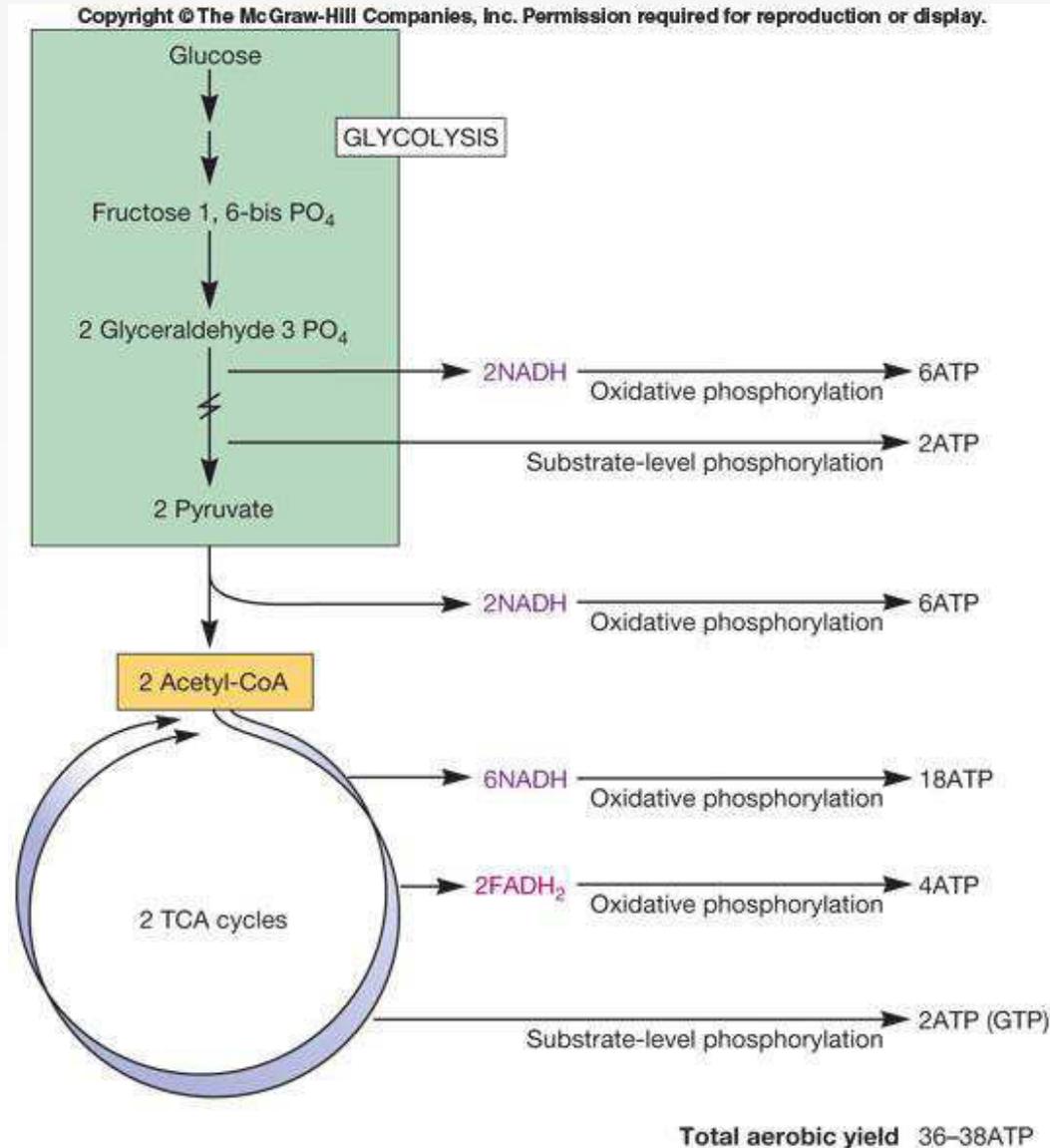
- Enzyme qui utilise le mouvement des protons pour catalyser la synthèse de l'ATP.

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



(a)

Rendement maximum théorique en ATP de la respiration aérobie



La chimioorganotrophie et la respiration anaérobie



- **Accepteurs d'électrons exogènes autres que l'O₂.**
- **La respiration anaérobie n'est pas aussi efficace que la respiration aérobie (il y a moins d'ATP produit lors de la phosphorylation oxydative lorsque l'accepteur final est le nitrate, le sulfate ou le CO₂).**

Table 9.3 Some Electron Acceptors Used in Respiration

	Electron Acceptor	Reduced Products	Examples of Microorganisms
Aerobic	O ₂	H ₂ O	All aerobic bacteria, fungi, protozoa, and algae
Anaerobic	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Enteric bacteria
	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻ , N ₂ O, N ₂	<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , and <i>Paracoccus</i>
	SO ₄ ²⁻	H ₂ S	<i>Desulfovibrio</i> and <i>Desulfotomaculum</i>
	CO ₂	CH ₄	All methanogens
	S ⁰	H ₂ S	<i>Desulfuromonas</i> and <i>Thermoproteus</i>
	Fe ³⁺	Fe ²⁺	<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , and <i>Geobacter</i>
	HAsO ₄ ²⁻	HAsO ₂	<i>Bacillus</i> , <i>Desulfotomaculum</i> , <i>Sulfurospirillum</i>
SeO ₄ ²⁻	Se, HSeO ₃ ⁻	<i>Aeromonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Thauera</i>	
	Fumarate	Succinate	<i>Wolinella</i>

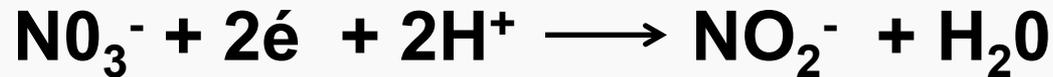


Des exemples de respiration anaérobie



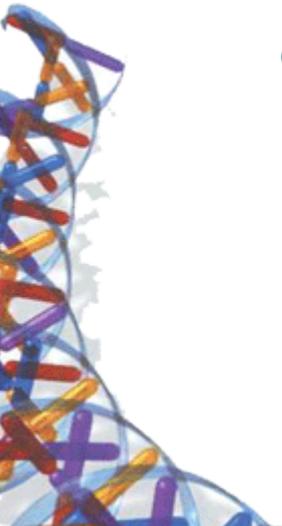
- **Réduction catabolique du nitrate**

- Utilisation du nitrate comme accepteur final d'électrons.



- **Dénitrification**

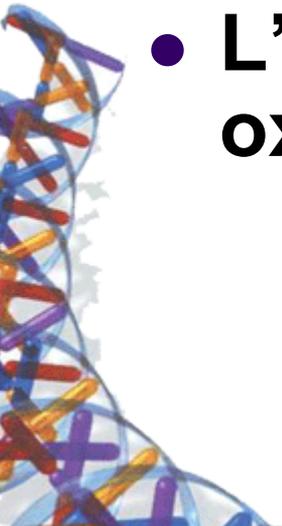
- Réduction du nitrate en azote gazeux.
- Dans le sol, engendre une perte de la fertilité.



Oxydation des molécules inorganiques



- Limitée à un petit groupe de bactéries appelées **chimolithotrophes**.
- Les électrons sont libérés de la source d'énergie.
 - Transférés à un accepteur d'électron terminal via la chaîne de transfert des électrons.
- L'ATP est synthétisé par phosphorylation oxydative.



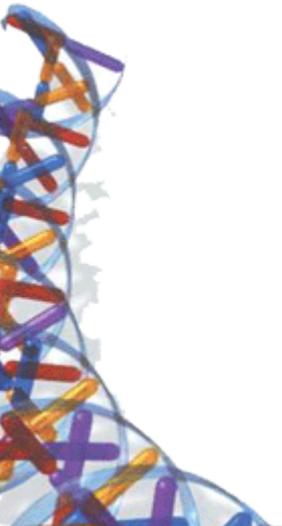
Chimiolithotrophes représentatifs et leurs sources d'énergie



Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Table 9.3 Representative Chemolithotrophs and Their Energy Sources

Bacteria	Electron Donor	Electron Acceptor	Products
<i>Alcaligenes</i> , <i>Hydrogenophaga</i> , and <i>Pseudomonas</i> spp.	H ₂	O ₂	H ₂ O
<i>Nitrobacter</i>	NO ₂ ⁻	O ₂	NO ₃ ⁻ , H ₂ O
<i>Nitrosomonas</i>	NH ₄ ⁺	O ₂	NO ₂ ⁻ , H ₂ O
<i>Thiobacillus denitrificans</i>	S ⁰ , H ₂ S	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻ , N ₂
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	Fe ²⁺ , S ⁰ , H ₂ S	O ₂	Fe ³⁺ , H ₂ O, H ₂ SO ₄



Les bactéries nitrifiantes



- L'oxydation de l'ammoniac en nitrate dépend de l'activité d'au moins deux groupes différents:

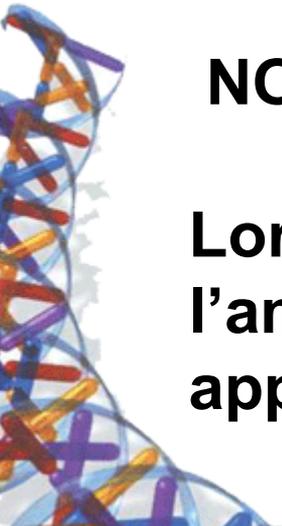
1) *Nitrosomonas* sp. et *Nitrosophira* sp.:



2) *Nitrobacter* sp. et *Nitrococcus* sp.:



Lorsque ces deux groupes travaillent ensemble, l'ammoniac du sol est oxydé en nitrate, un processus appelé la **nitrification**.



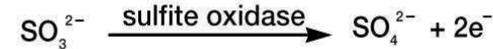
Les bactéries sulfuro-oxydantes



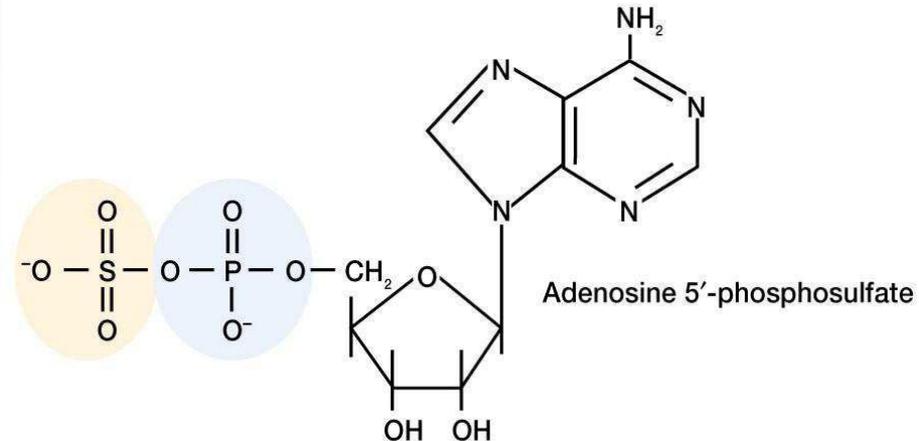
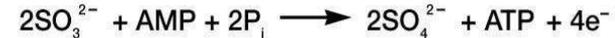
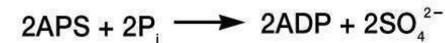
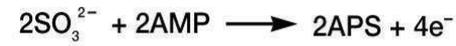
- Ces bactéries oxydent en acide sulfurique (H_2SO_4), le soufre (S), le sulfure d'hydrogène (H_2S), les thiosulfates ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) et d'autres composés soufrés réduits.

- Elles produisent de l'ATP à la fois par phosphorylation oxydative et phosphorylation au niveau du substrat.

Direct oxidation of sulfite



Formation of adenosine 5'-phosphosulfate



La photosynthèse



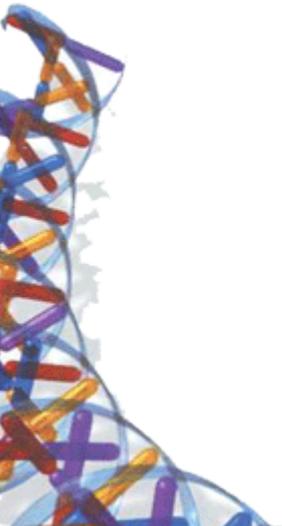
- **Processus au cours duquel l'énergie lumineuse est captée et convertie en énergie chimique.**
 - **La photosynthèse est le processus métabolique le plus important sur terre car presque toute énergie provient de l'énergie solaire.**
 - **Elle fournit aux organismes photosynthétiques l'ATP et le pouvoir réducteur nécessaires à la synthèse des matières organiques requises pour leur croissance.**

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Table 9.5

Diversity of Phototrophic Organisms

Eucaryotic Organisms	Procaryotic Organisms
Plants	Cyanobacteria
Multicellular green, brown, and red algae	Green sulfur bacteria Green nonsulfur bacteria
Unicellular protists (e.g., euglenoids, dinoflagellates, diatoms)	<i>Halobacterium</i> (archaeon) Purple sulfur bacteria Purple nonsulfur bacteria <i>Prochloron</i>



La photosynthèse



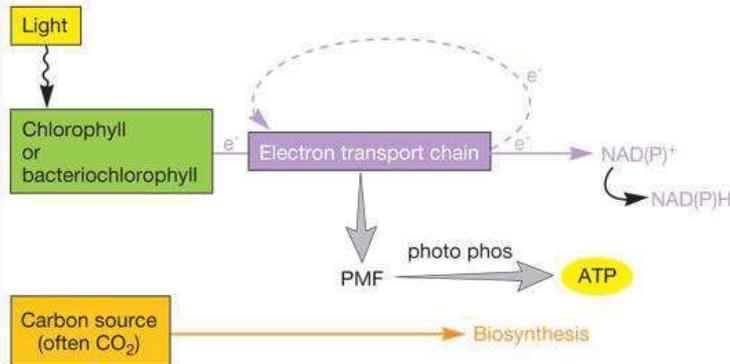
- **Phase claire**
 - L'énergie lumineuse est captée et convertie en énergie chimique.
- **Phase obscure**
 - Cette énergie chimique est alors utilisée pour réduire ou fixer le CO_2 et synthétiser les constituants cellulaires.
- Il existe principalement trois types de phototrophie: **photosynthèse oxygénique**; **photosynthèse anoxygénique**; **phototrophie basée sur la rhodopsine**.



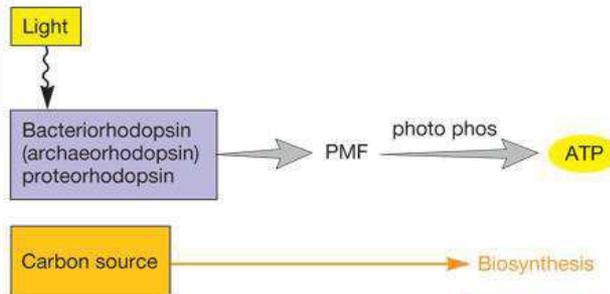
La photosynthèse



Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.
Chlorophyll-based phototrophy



Rhodopsin-based phototrophy



Les phototrophes utilisent la lumière pour générer une force proton-motrice, qui sert ensuite à la synthèse d'ATP par un processus appelé **photophosphorylation**.

La photosynthèse basée sur la **chlorophylle** ou la **bactériochlorophylle** déclenche un flux d'électrons dans une chaîne de transfert d'électrons, flux accompagné de pompage de protons à travers une membrane.

La **photosynthèse basée sur la rhodopsine** génère directement une FPM.

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Table 9.6 Properties of Chlorophyll-Based Photosynthetic Systems

Property	Eucaryotes	Cyanobacteria	Green Bacteria, Purple Bacteria, and Heliobacteria
Photosynthetic pigment	Chlorophyll <i>a</i>	Chlorophyll <i>a</i>	Bacteriochlorophyll
Photosystem II	Present	Present	Absent
Photosynthetic electron donors	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ , H ₂ S, S, organic matter
O ₂ production pattern	Oxygenic	Oxygenic ^a	Anoxygenic
Primary products of energy conversion	ATP + NADPH	ATP + NADPH	ATP
Carbon source	CO ₂	CO ₂	Organic and/or CO ₂

^aSome cyanobacteria can function anoxygenically under certain conditions. For example, *Oscillatoria* can use H₂S as an electron donor instead of H₂O.