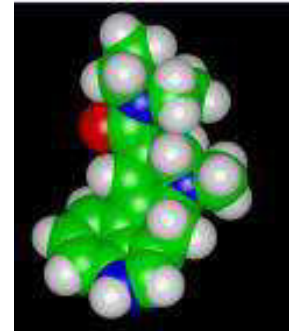


# Microbiologie BIOL 3253

## 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**

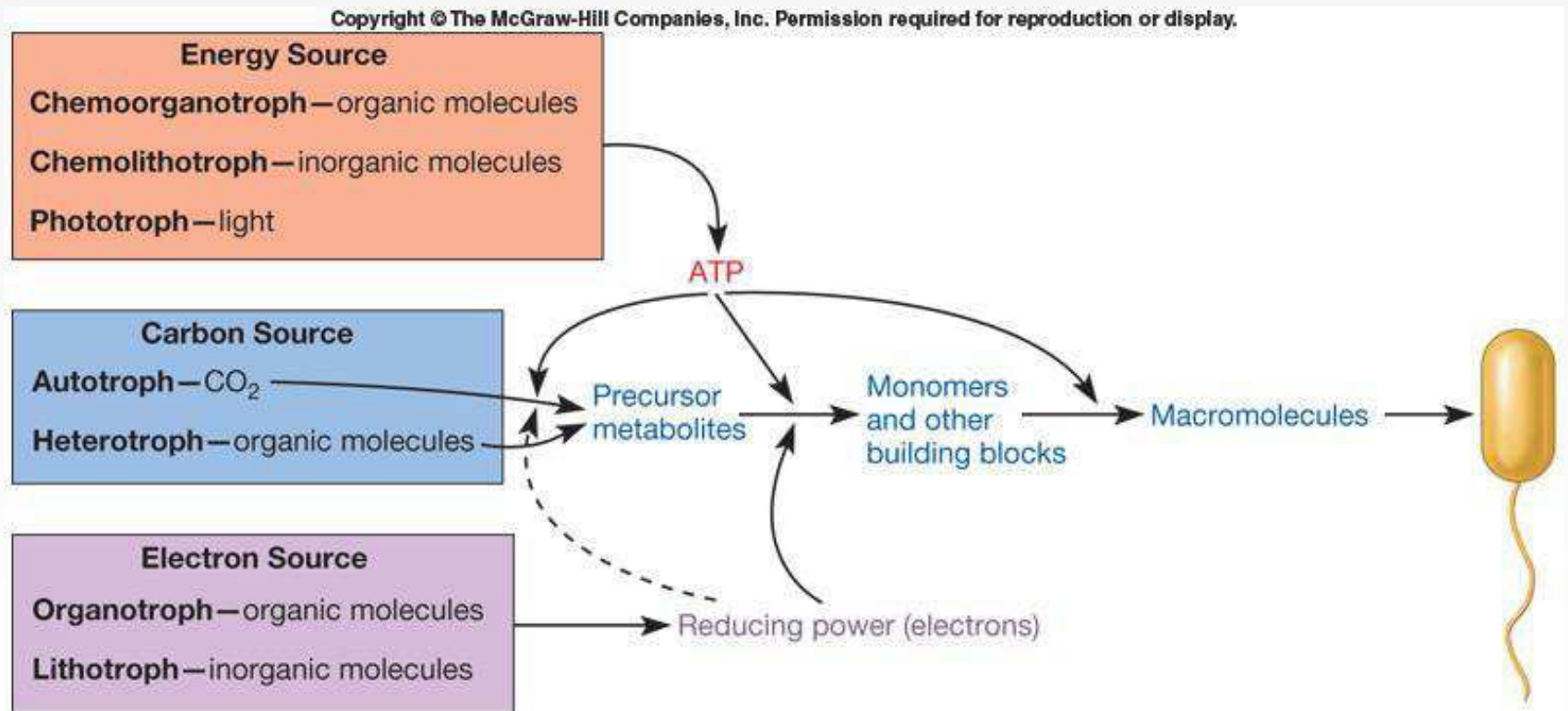
- Fragmentation de molécules plus grosses et plus complexes en molécules plus petites et plus simple avec libération d'énergie.
- Une partie de cette énergie est captée et rendue disponible pour un travail; le reste est libéré sous forme de chaleur.

- **Anabolisme**

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



# Vue d'ensemble du métabolisme

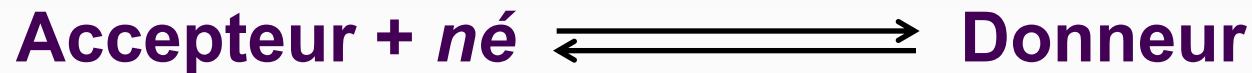


L'anabolisme a besoin d'une source d'électrons, stockés sous forme de pouvoir réducteur. Le pouvoir réducteur est nécessaire parce que l'anabolisme est un processus réducteur; il ajoute des électrons aux petites molécules qui sont utilisées pour construire les macromolécules.

# 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.

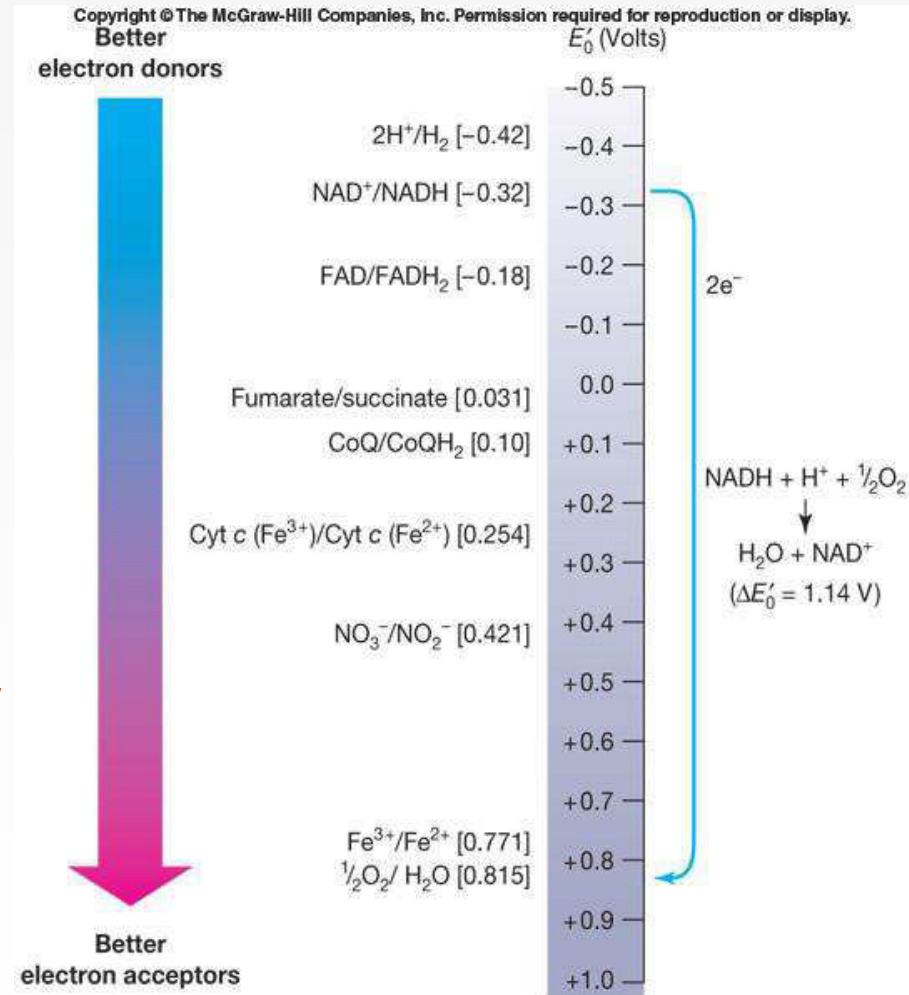
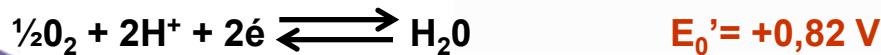


# Les réactions d'oxydo-réduction et les transporteurs d'électrons



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.

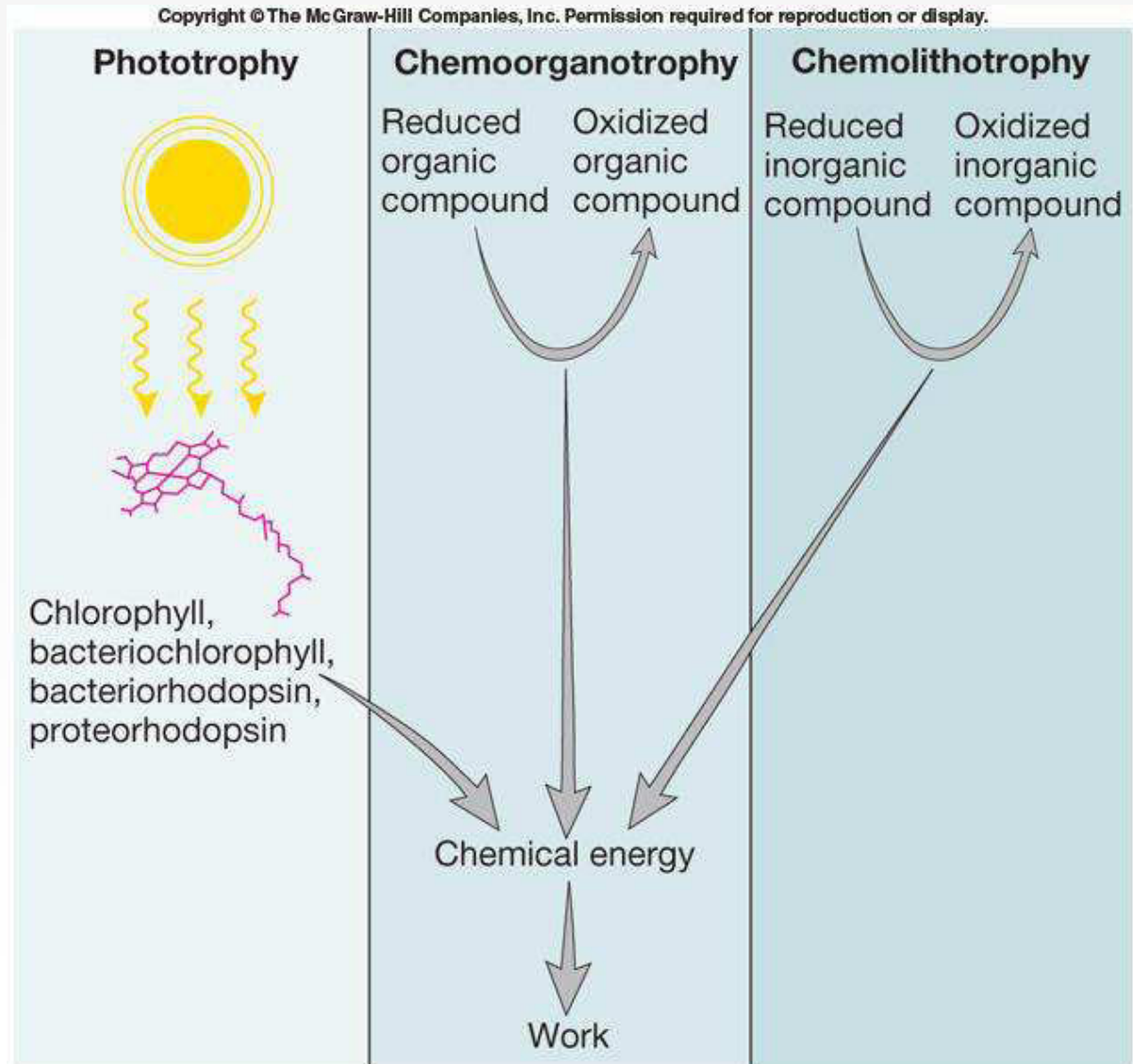
Exemple:



# 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.**

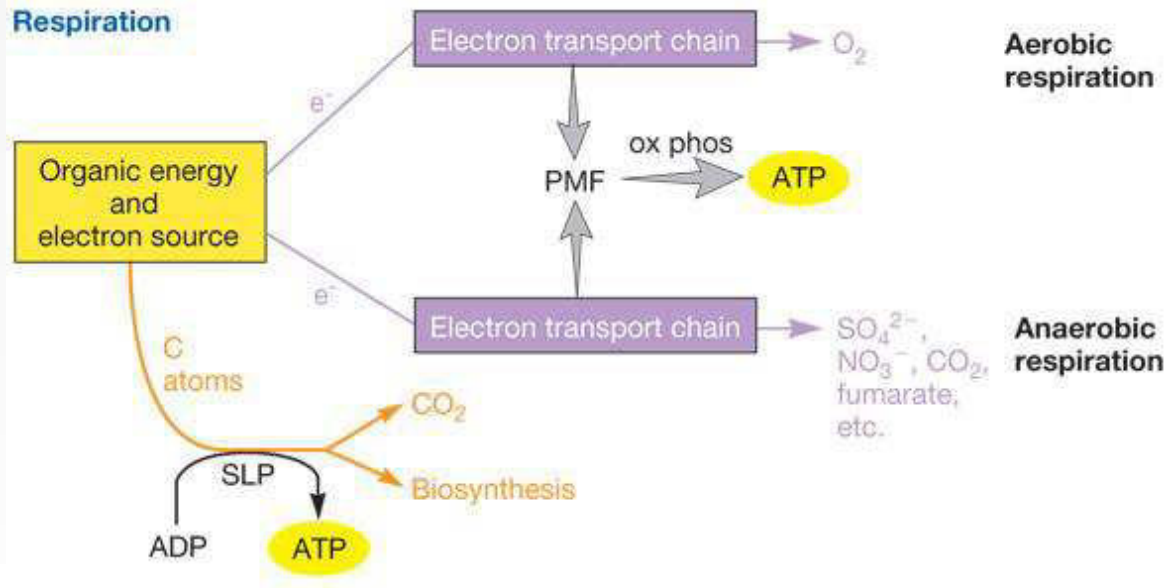


# L'énergie chez les chimio-organotrophes



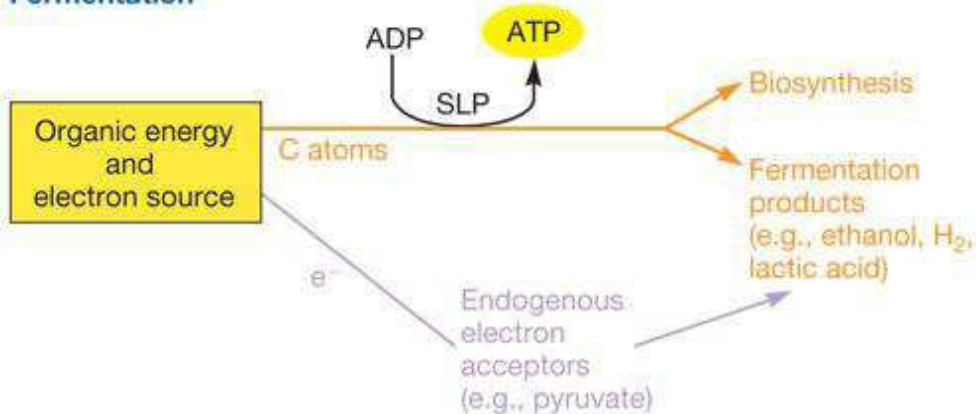
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.  
Chemoorganotrophic Fueling Processes

## 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**

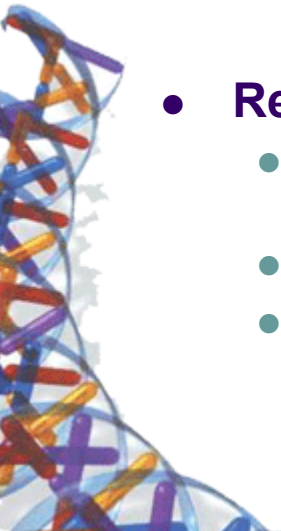
- Le substrat énergétique est dégradé en utilisant des accepteurs d'électrons endogènes.
- S'effectue souvent en conditions anaérobiques.
- Une quantité d'énergie limitée est rendue disponible.

- **Respiration aérobie**

- 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 anaérobie**

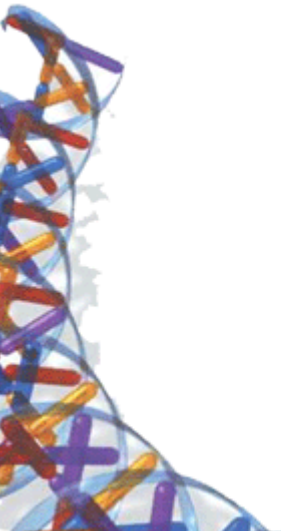
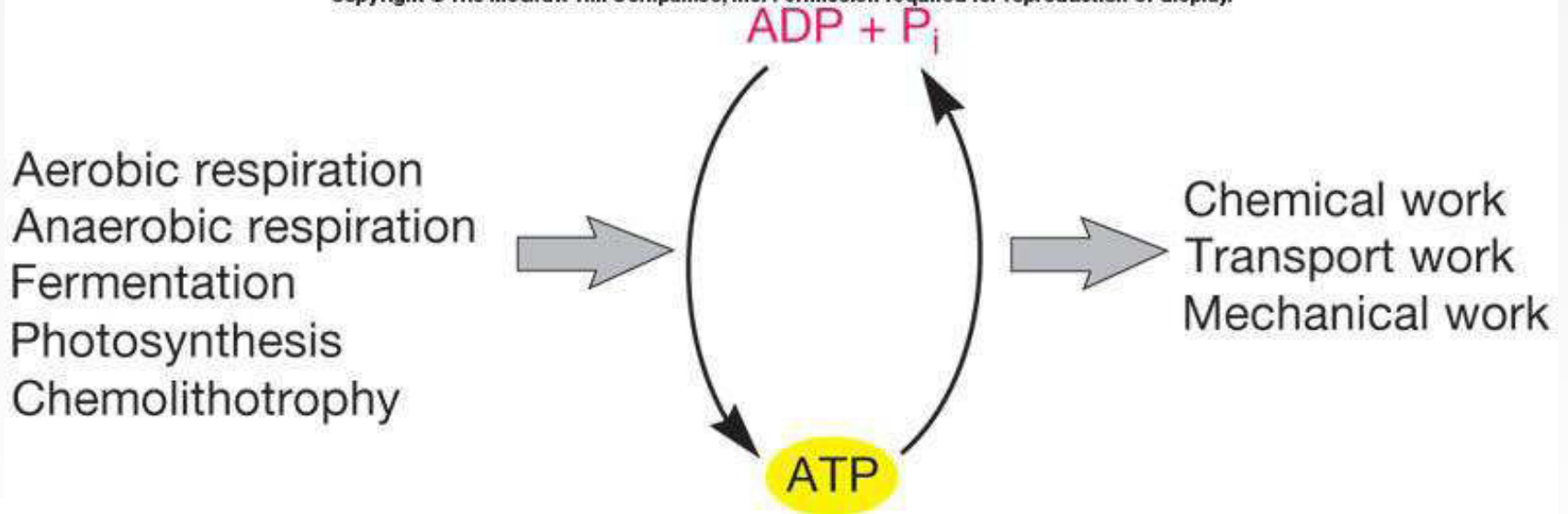
- Le substrat énergétique est dégradé en utilisant des molécules autres que l'oxygène comme accepteurs d'électrons exogènes.
- S'effectue en conditions anaérobiques.
- Peut produire une grande quantité d'énergie (dépendant du potentiel de réduction de la source d'énergie et des accepteurs d'électrons), principalement grâce à l'activité de la chaîne de transfert d'électrons.



# Le cycle de l'énergie cellulaire



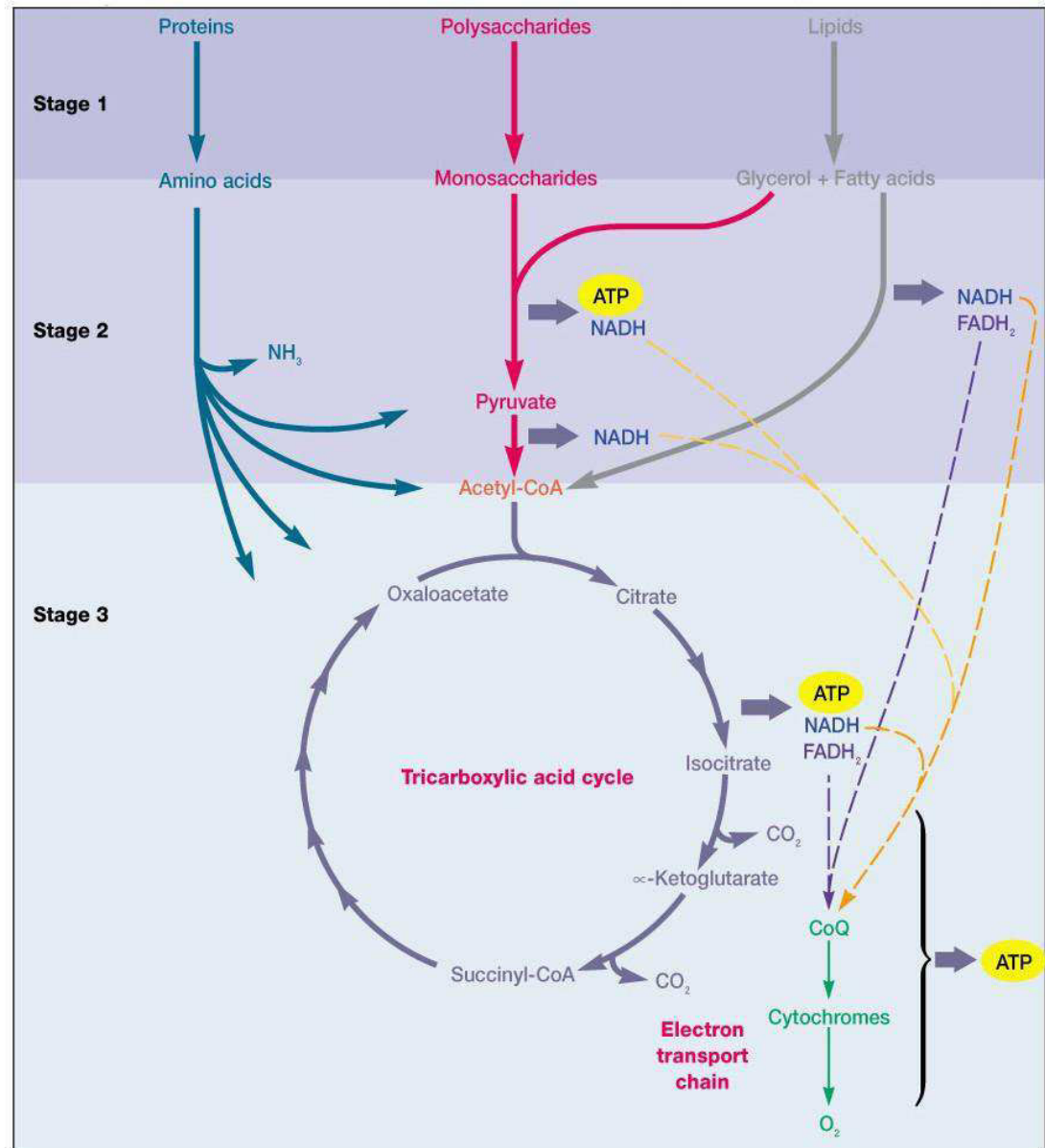
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



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



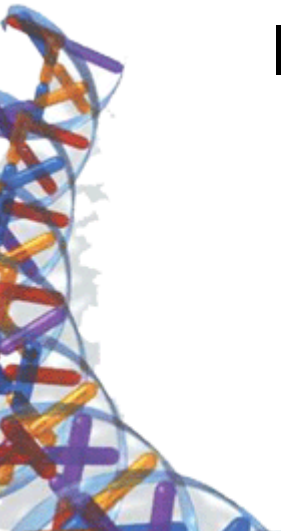
Plusieurs sources différentes d'énergie sont dirigées vers des voies cataboliques communes.



# 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



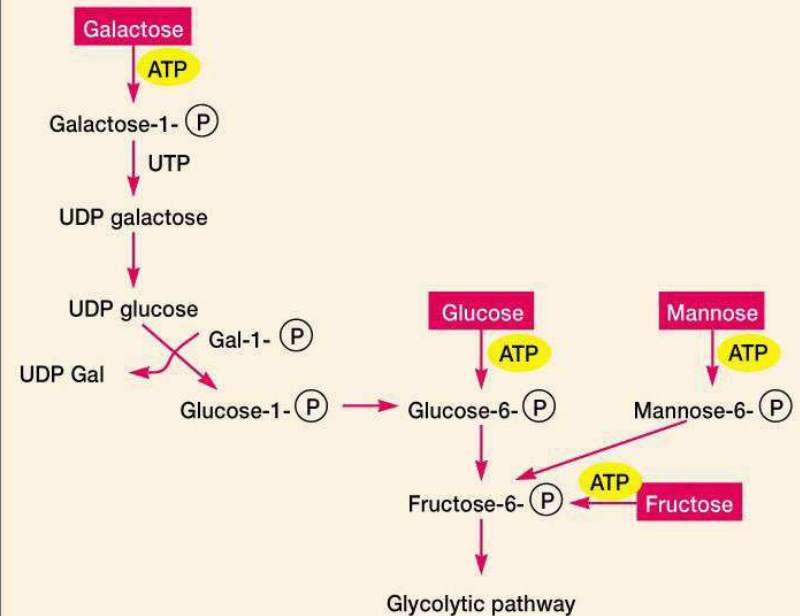
- **Monosaccharides**

- 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



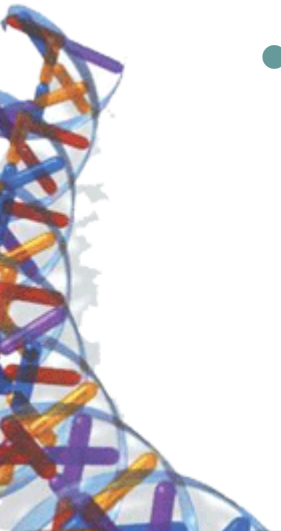
## Disaccharide cleavage

1. **Maltose** + H<sub>2</sub>O  $\xrightarrow{\text{maltase}}$  2 glucose  
**Maltose** + P<sub>i</sub>  $\xrightarrow{\text{maltose phosphorylase}}$   $\beta$ -D-glucose-1-(P) + glucose
2. **Cellobiose** + P<sub>i</sub>  $\xrightarrow{\text{cellobiose phosphorylase}}$   $\alpha$ -D-glucose-1-(P) + glucose
3. **Sucrose** + H<sub>2</sub>O  $\xrightarrow{\text{sucrase}}$  glucose + fructose  
**Sucrose** + P<sub>i</sub>  $\xrightarrow{\text{sucrose phosphorylase}}$   $\alpha$ -D-glucose-1-(P) + fructose
4. **Lactose** + H<sub>2</sub>O  $\xrightarrow{\beta\text{-galactosidase}}$  galactose + glucose

# Étape 1: les polymères de réserve



- **Utilisés comme source d'énergie en absence de nutriments externes.**
  - **Glycogène et amidon.**
    - **Clivés par phosphorolyse.**
$$(\text{glucose})_n + \text{P}_i \rightarrow (\text{glucose})_{n-1} + \text{glucose-1-P}$$
    - **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.**

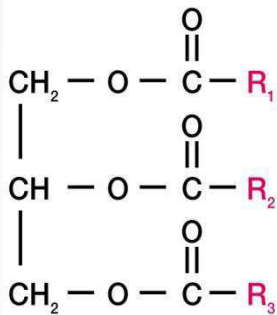


# Étape 1: les lipides



- **Triglycérides**

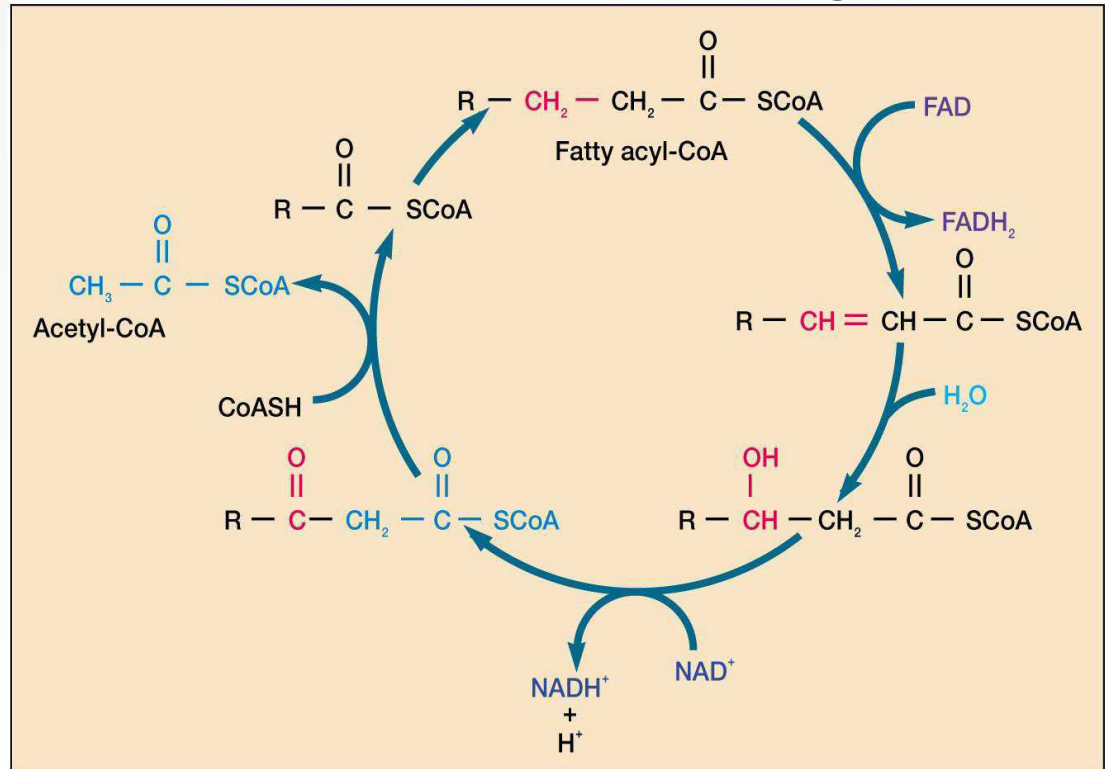
- Source d'énergie courante.



- 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-oxidation**.

## La β-oxidation des acides gras



# Étape 1: les protéines et acides aminés

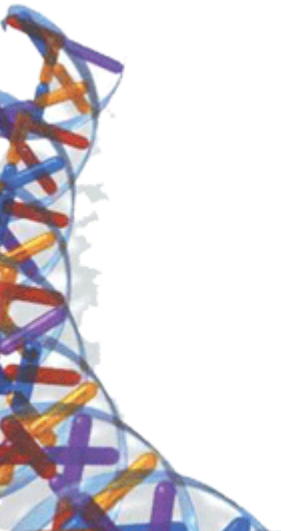


- **Protéases**

- Hydrolyzation des protéines et acides aminés.

- **Désamination**

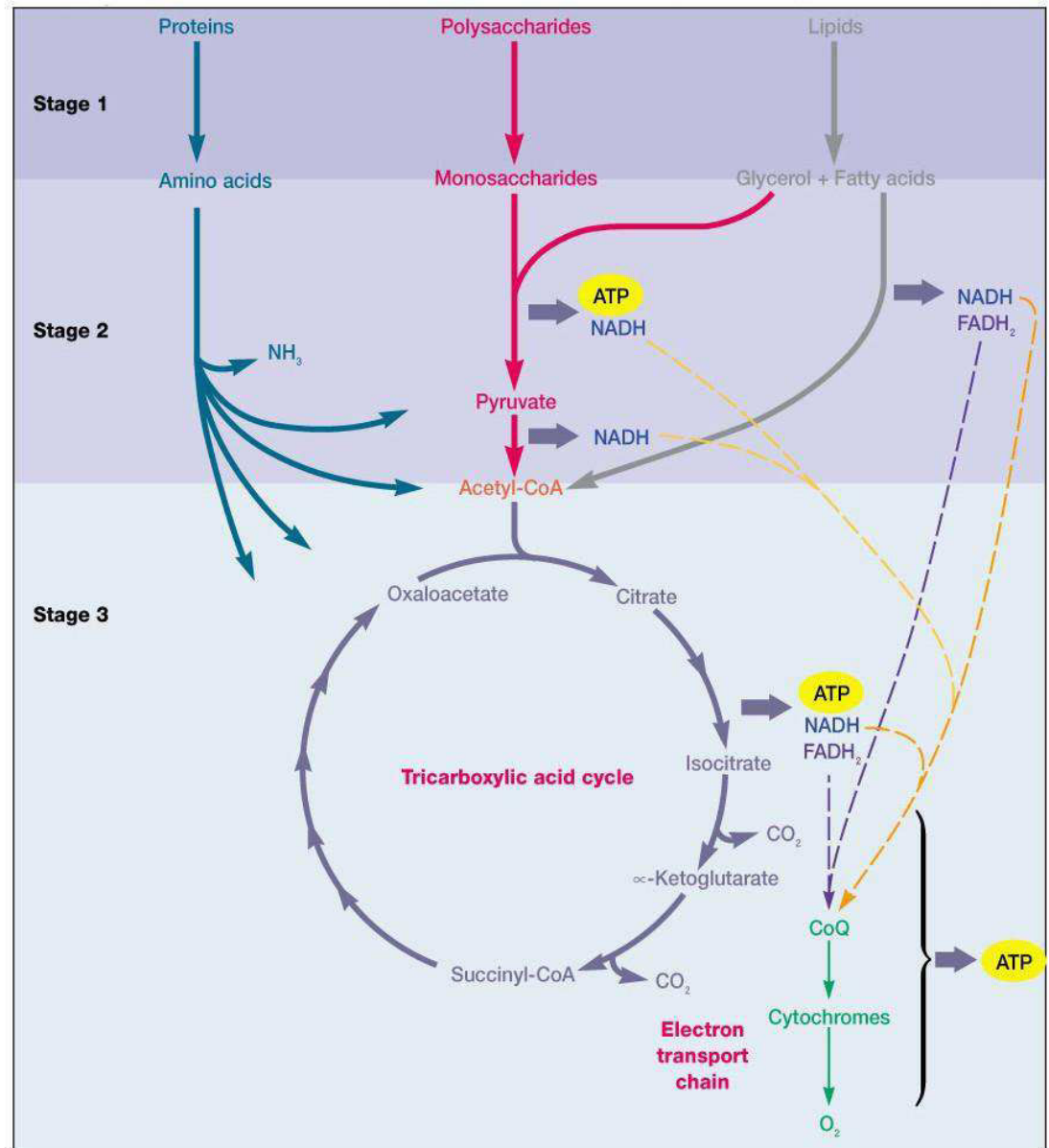
- Retire le groupe aminé d'un acide aminé.
- L'acide organique résultant de la désamination peut être converti en pyruvate, en acétyl-CoA ou en un intermédiaire du cycle des acides tricarboxyliques.
  - Peut être oxydé pour libérer de l'énergie.



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



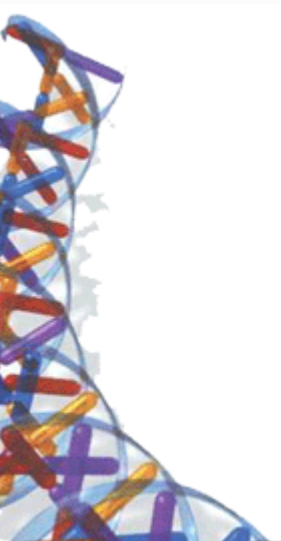
Plusieurs sources différentes d'énergie sont dirigées vers des voies cataboliques communes.



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



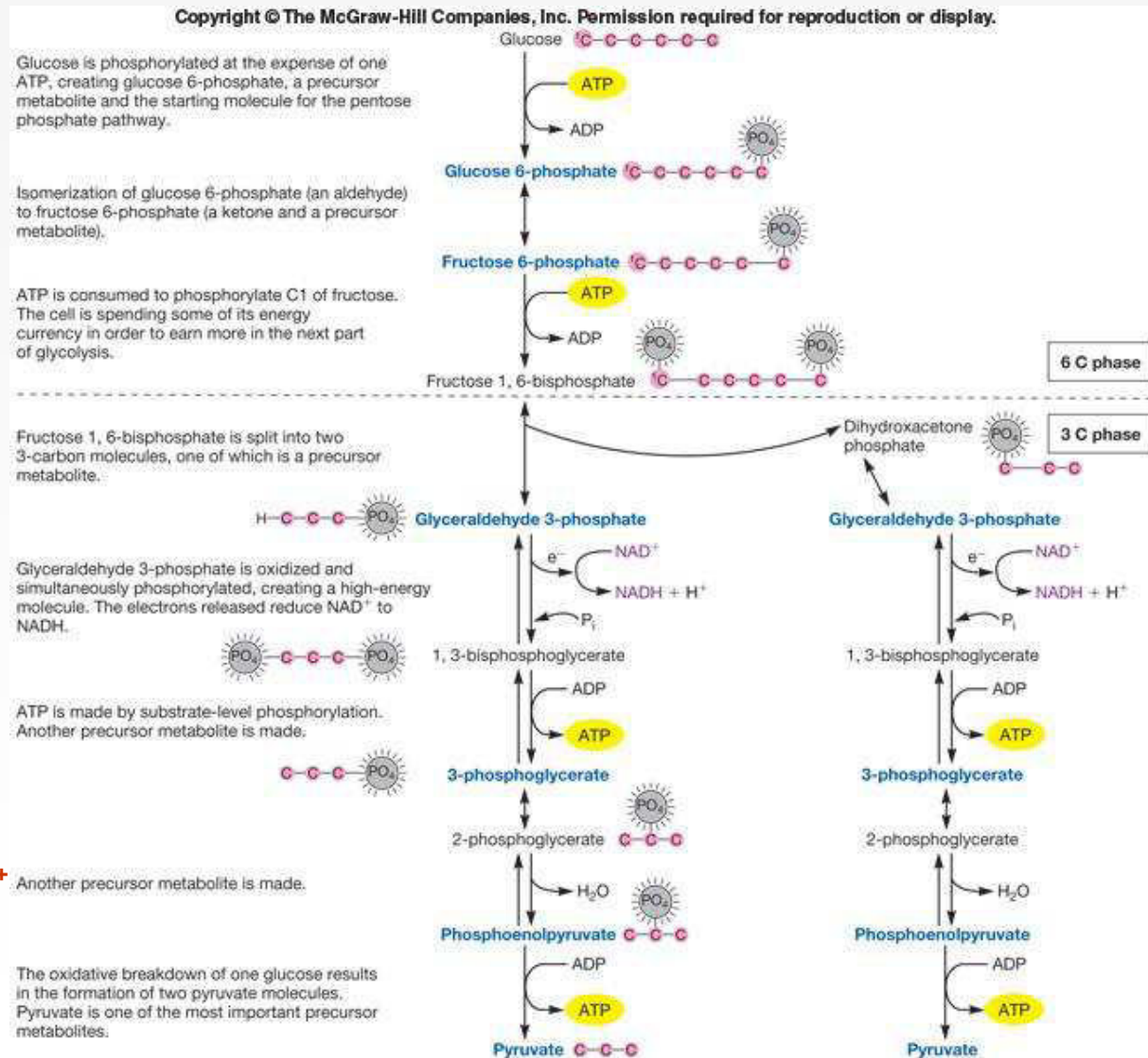
- **Trois voies métaboliques:**
  - **Voie d'Embden-Meyerhof (glycolyse)**
  - **Voie des pentoses phosphates**
  - **Voie d'Entner-Doudoroff**



# Étape 2: voie d'Embden-Meyerhof



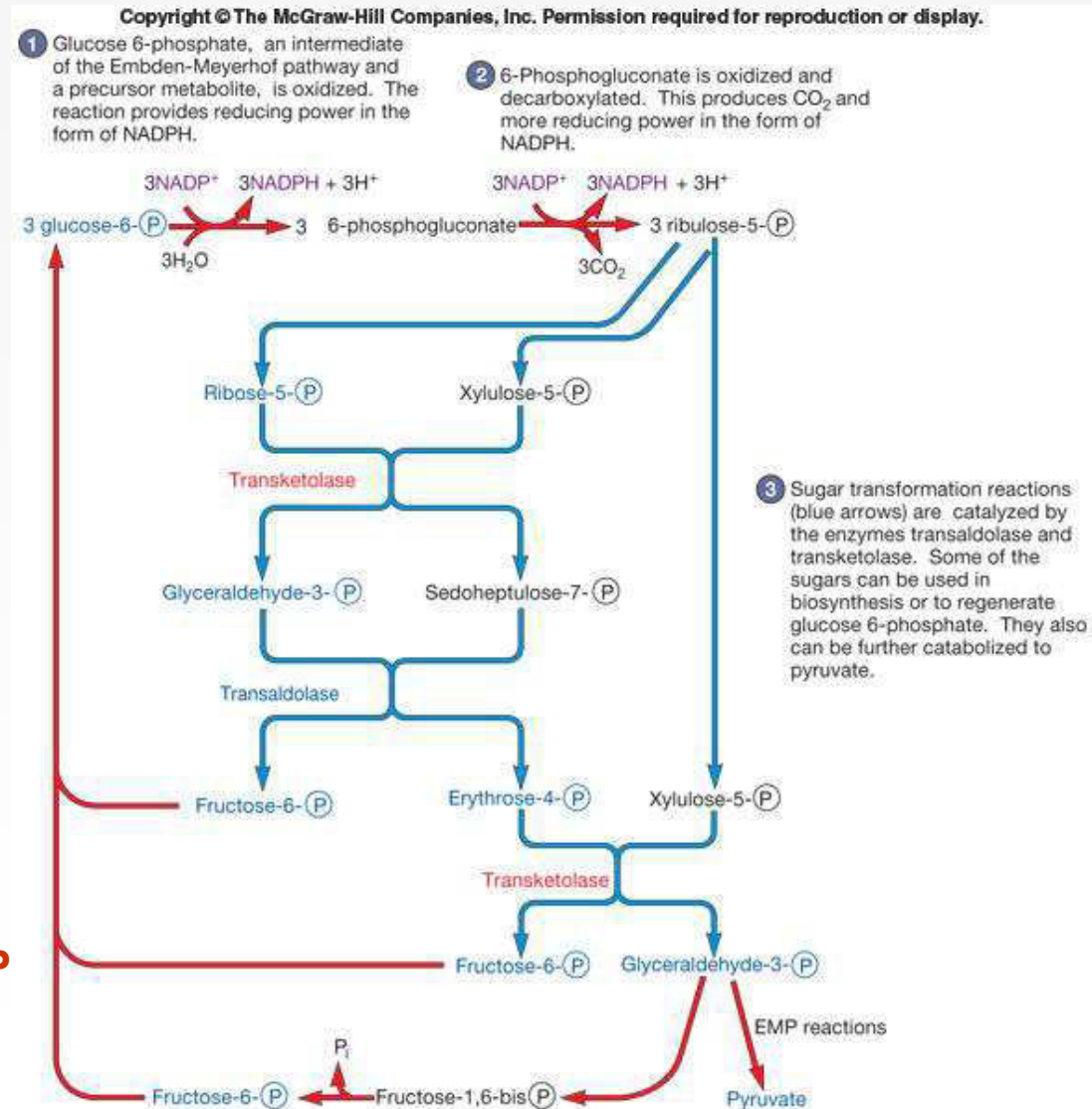
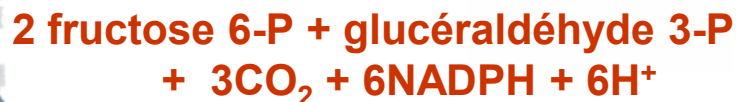
- Aussi appelée glycolyse.
- Localisée dans le cytoplasme des procaryotes et des eucaryotes.
- Opère en aérobiose ou anaérobiose.
- Résumé de la réaction:



# Étape 2: la voie des pentoses phosphates



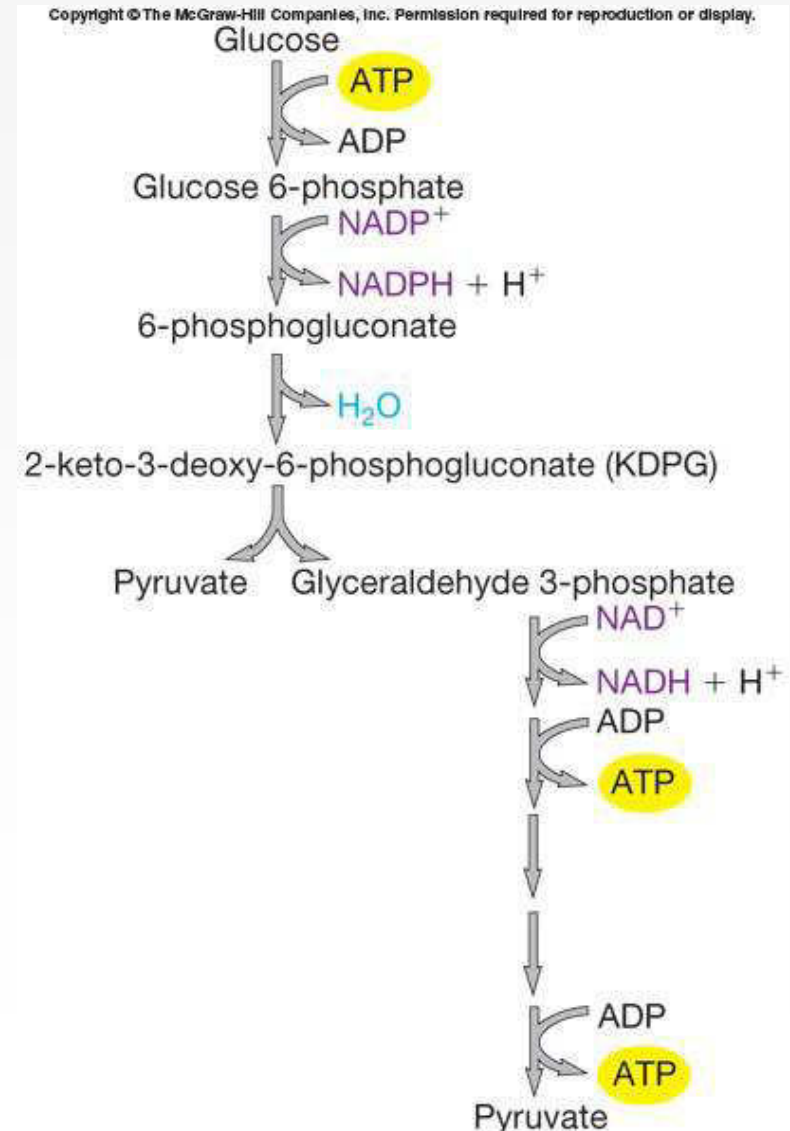
- Aussi appelée **voie des hexoses monophosphates**.
- Peut être utilisée en même temps que la glycolyse.
- Opère en aérobiose ou anaérobiose.
- Résumé de la réaction:



# Étape 2: la voie d'Entner-Doudoroff



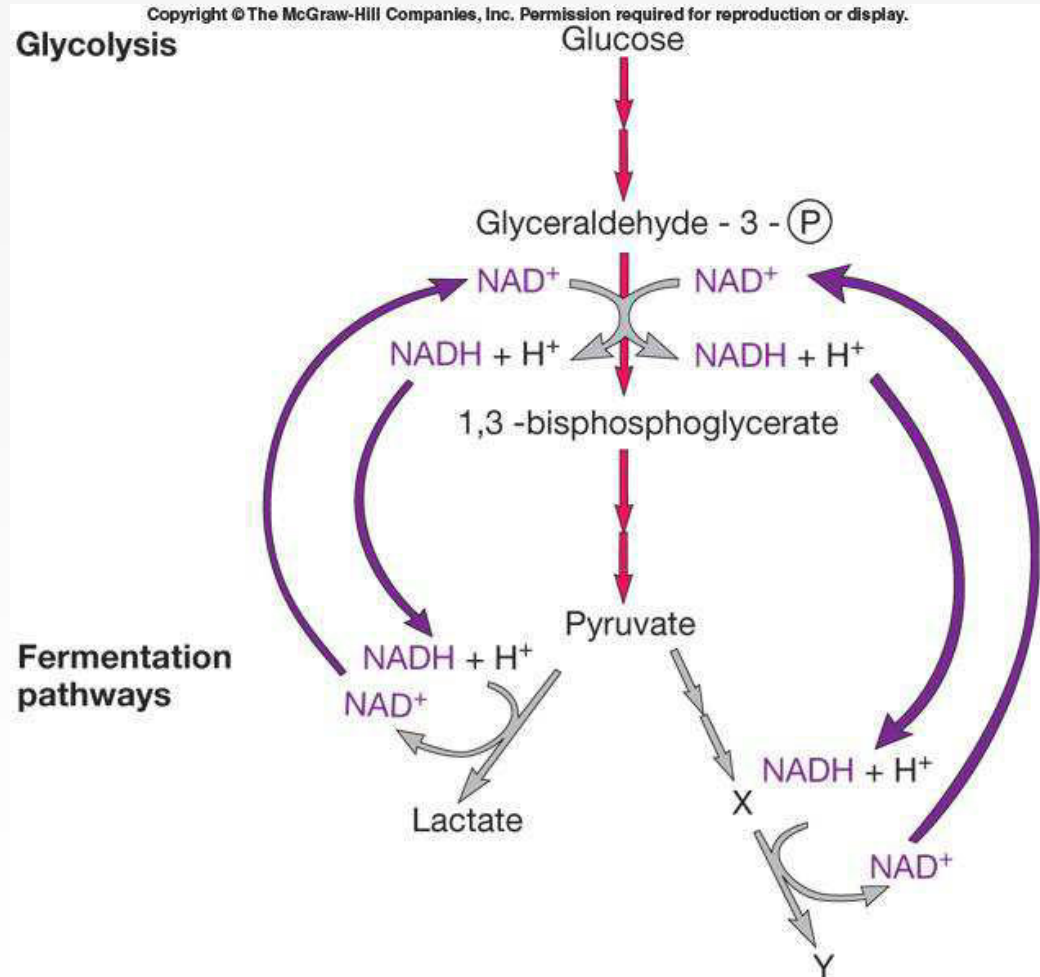
- Cette voie dégrade le glucose en pyruvate en produisant (par molécule de glucose):
  - 1 ATP
  - 1 NADPH
  - 1 NADH
- Les bactéries pour la plupart, possèdent les voies de la glycolyse et des pentoses phosphates, mais quelques-unes utilisent la voie d'Entner-Doudoroff au lieu de la glycolyse.
- On 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  $\text{NAD}^+$  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.



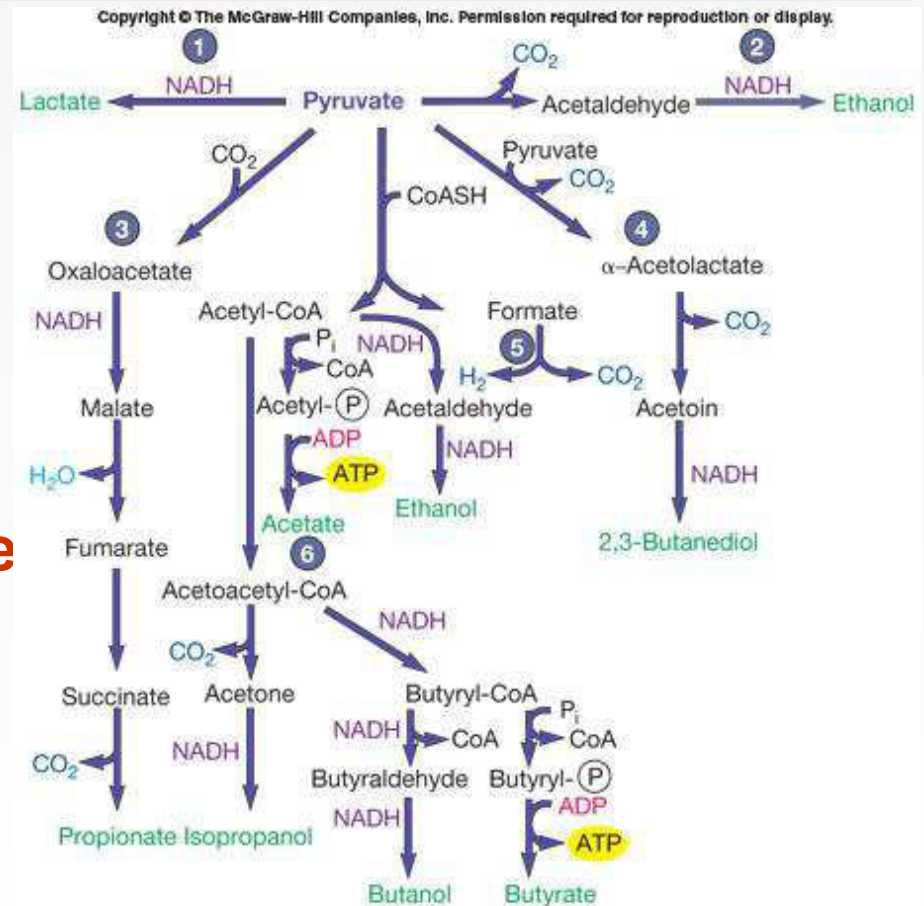
# Quelques fermentations microbiennes courantes



**Fermentation alcoolique**  
sucres  $\rightarrow$  éthanol +  $\text{CO}_2$

**Fermentation lactique**  
pyruvate  $\rightarrow$  lactate

**Fermentation butanediolique**  
pyruvate  $\rightarrow$  2,3-butanediol

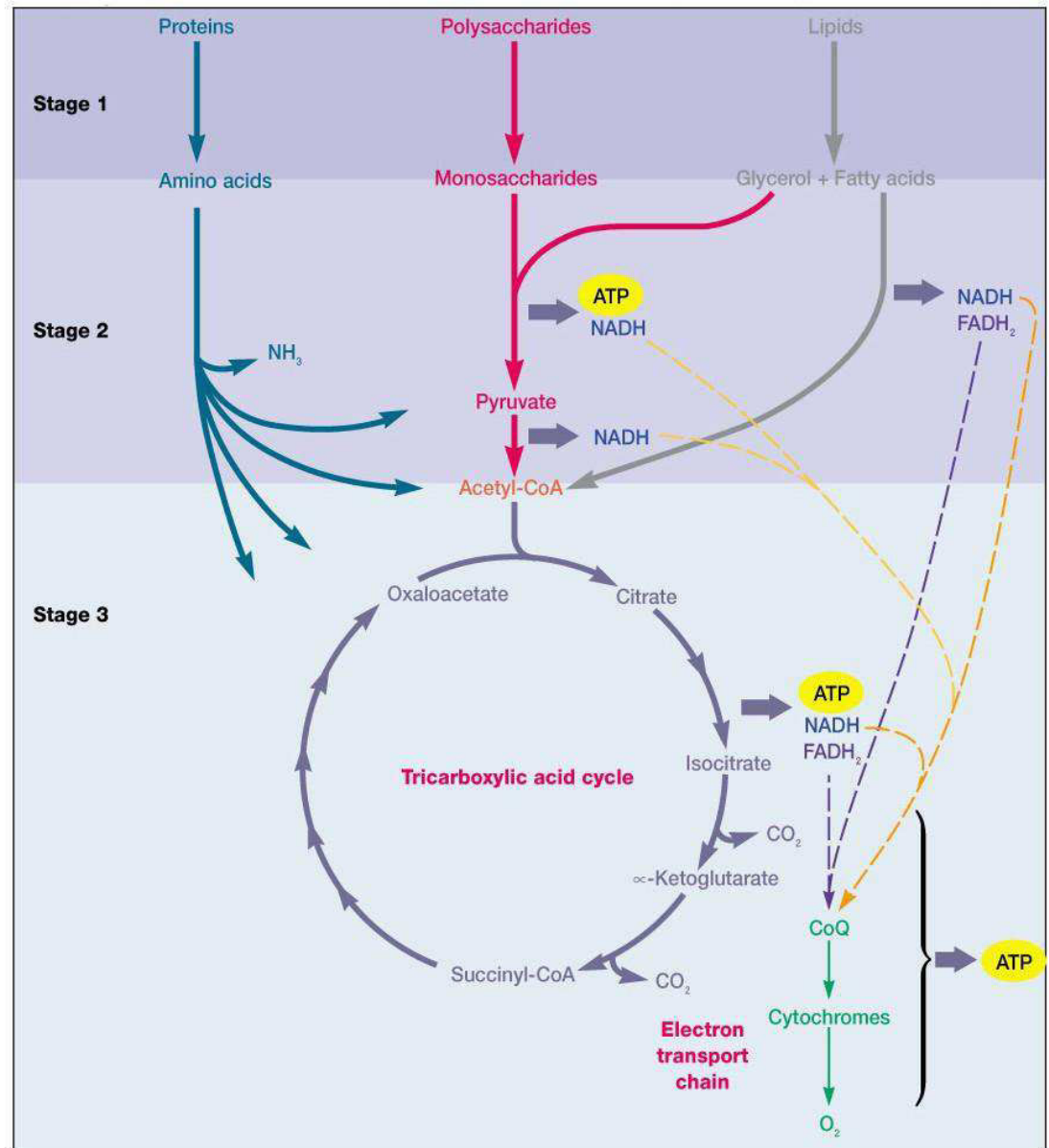


1. Lactic acid bacteria (*Streptococcus*, *Lactobacillus*), *Bacillus*
2. Yeast, *Zymomonas*
3. Propionic acid bacteria (*Propionibacterium*)
4. *Enterobacter*, *Serratia*, *Bacillus*
5. Enteric bacteria (*Escherichia*, *Enterobacter*, *Salmonella*, *Proteus*)
6. *Clostridium*

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



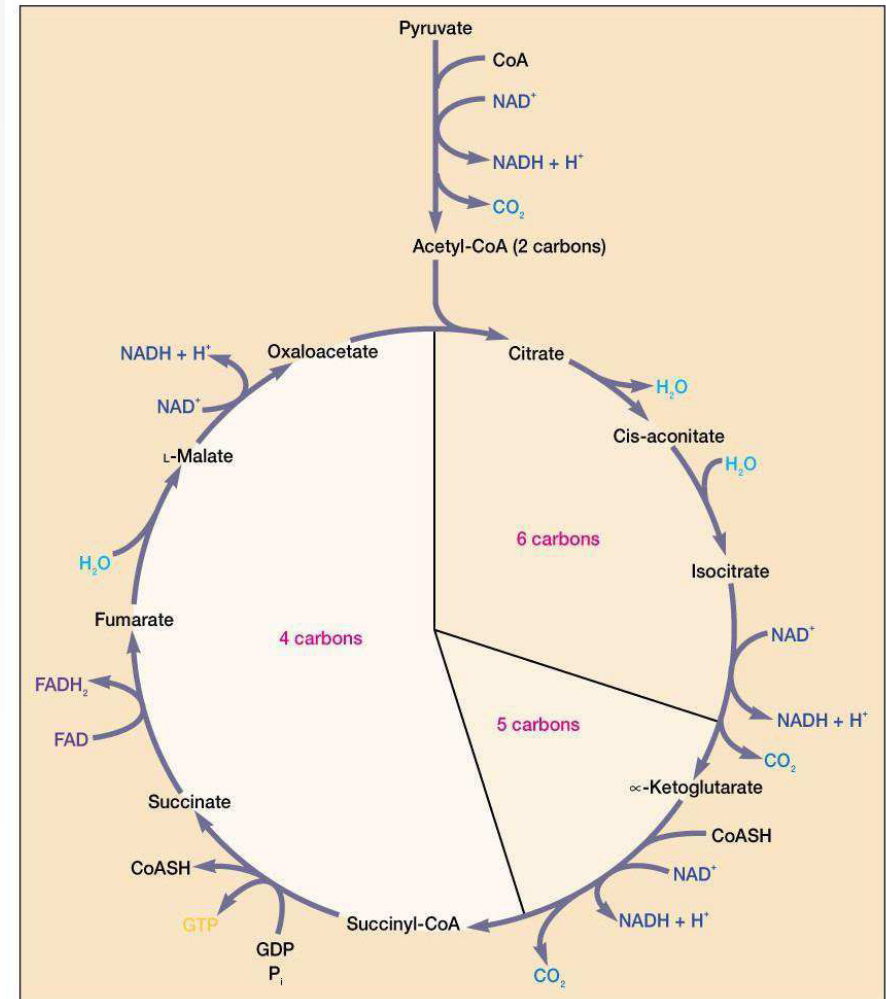
Plusieurs sources différentes d'énergie sont dirigées vers des voies cataboliques communes.



# Étape 3: le cycle des acides tricarboxyliques



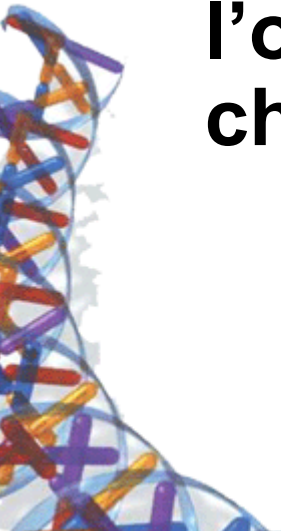
- Aussi appelé **cycle du citrate** ou **cycle de Krebs**.
- Oxydation et dégradation complètes du glucose et d'autres molécules.
- Commun chez les bactéries aérobiques, les protozoaires libres, les champignons.
- Pour chaque molécule d'acetyl-CoA oxydée, le cycle des acides tricarboxyliques produit:
  - 2 molécules de  $\text{CO}_2$
  - 3 molécules de NADH
  - 1  $\text{FADH}_2$
  - 1 GTP



## Étape 3: le transfert des électrons et la phosphorylation oxydative



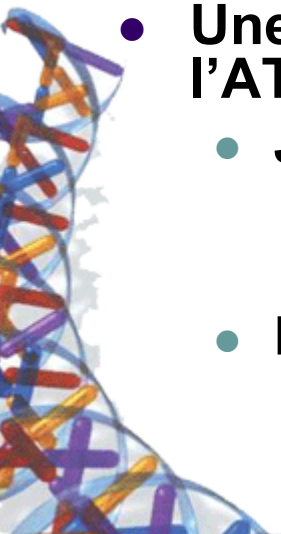
- Peu de molécules d'ATP provenant de l'oxydation du glucose en 6 molécules de  $\text{CO}_2$  ont été synthétisées directement au cours de la glycolyse et du cycle des acides tricarboxyliques.
- La plus grande partie de l'ATP provient de l'oxydation du NADH et du  $\text{FADH}_2$  dans la chaîne de transfert des électrons.



# Étape 3: la chaîne de transfert des électrons

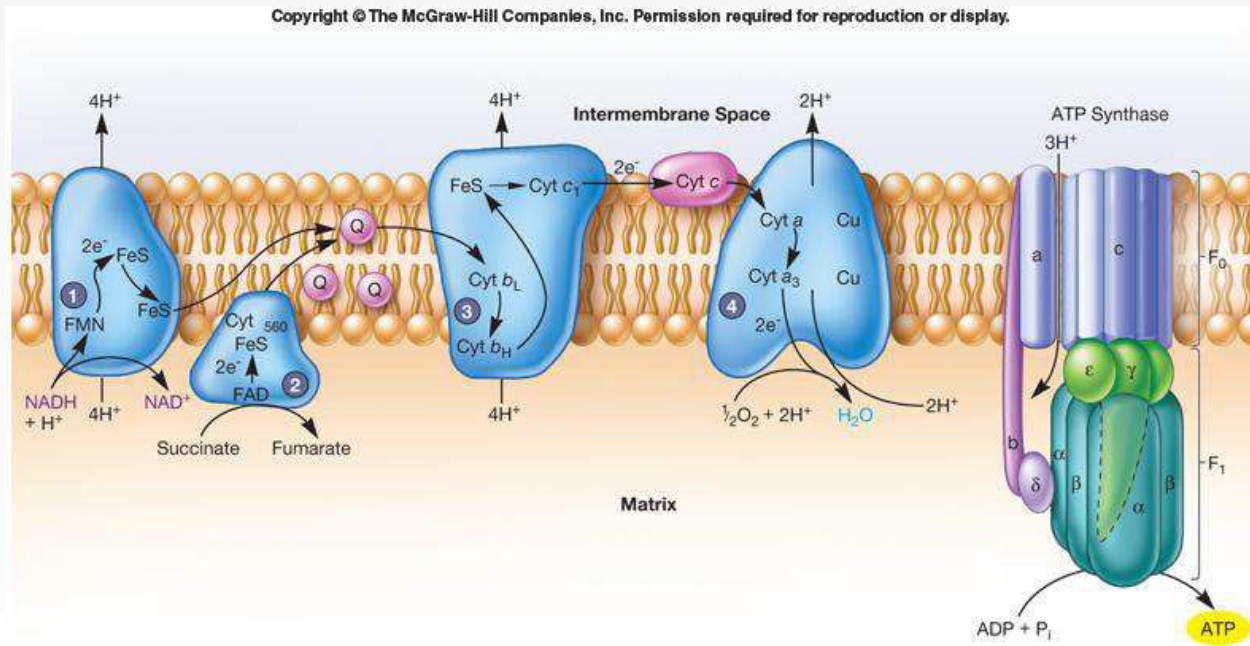


- Série de transporteurs d'électrons qui agissent ensemble pour transférer les électrons de donneurs tels que le NADH ou le  $\text{FADH}_2$  aux accepteurs tels que l' $\text{O}_2$ .
- Les électrons sont transférés de transporteurs dont le potentiel de réduction est plus négatif vers ceux dont le potentiel est plus positif et enfin se combinent à l' $\text{O}_2$  et  $\text{H}^+$  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 ( $\text{P/O}$ ) = 3
  - Pour le  $\text{FADH}_2$ , le quotient  $\text{P/O}$  = 2
    - i.e., 2 molécules d'ATP sont produites.

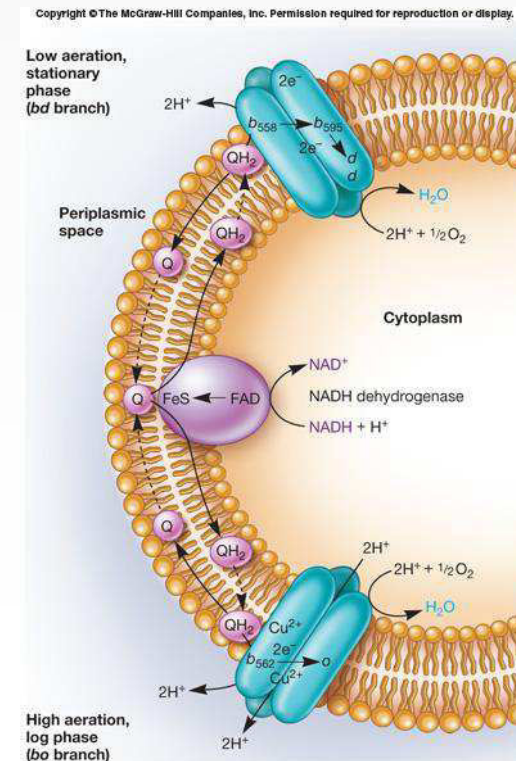


# Étape 3: la chaîne de transfert des électrons

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



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

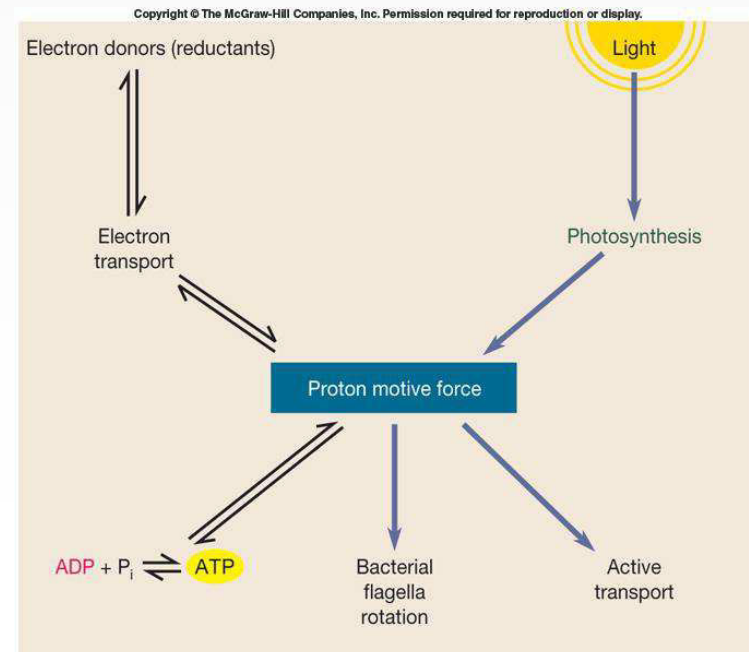


# Étape 3: la phosphorylation oxydative



- **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**.



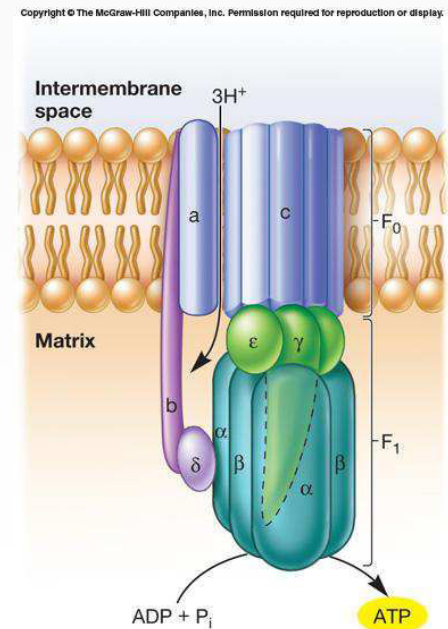
# Étape 3: la force proton-motrice synthétise de l'ATP



- 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.

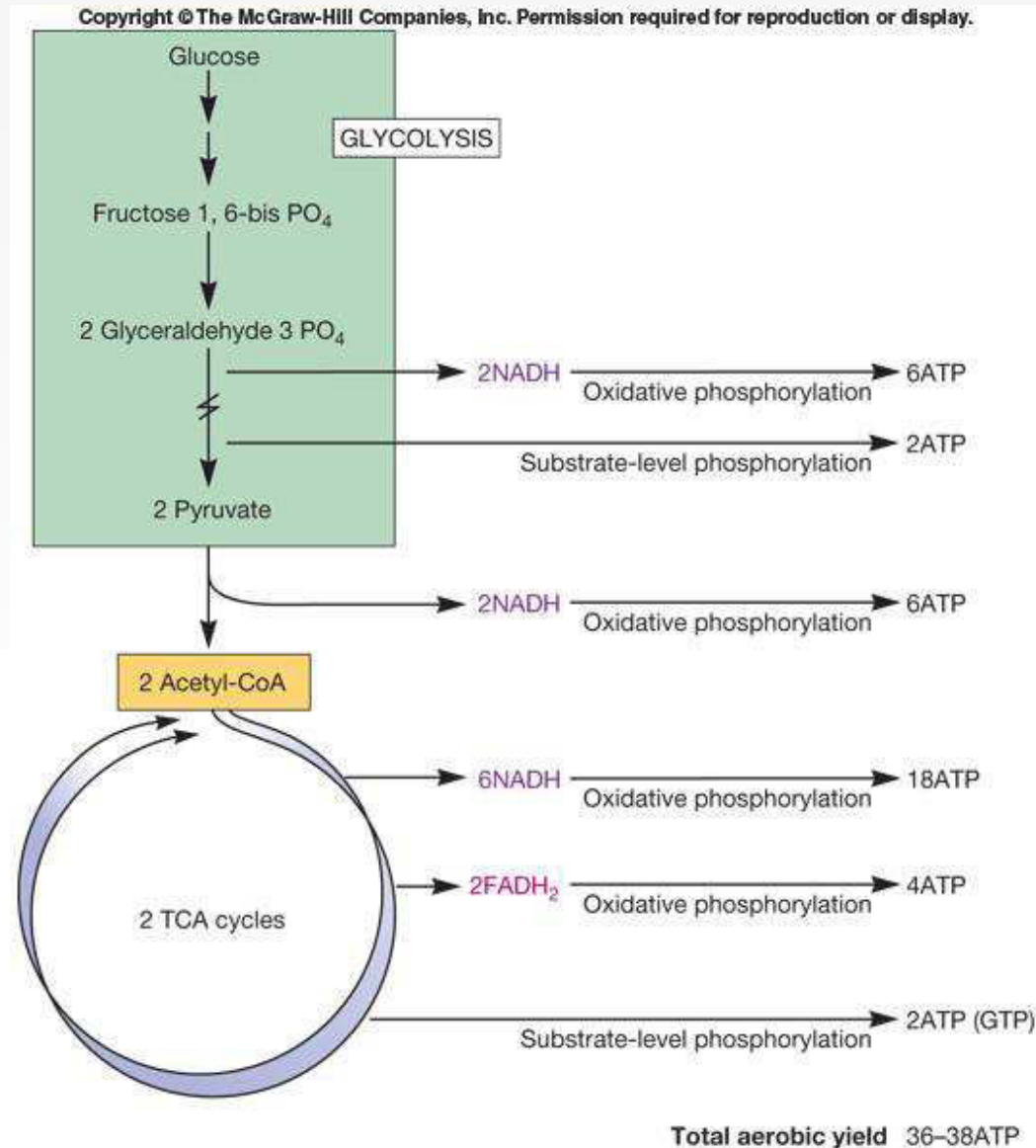
- **ATP synthétase**

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



(a)

# Rendement maximum théorique en ATP de la respiration aérobie



# La chimioorganotrophie et la respiration anaérobie



- **Accepteurs d'électrons exogènes autres que l'O<sub>2</sub>.**
- **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 CO<sub>2</sub>).**

**Table 9.3** Some Electron Acceptors Used in Respiration

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

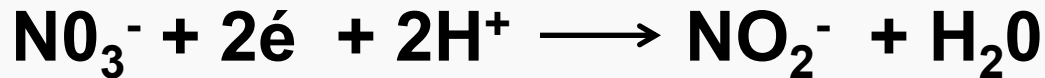


# Des exemples de respiration anaérobie



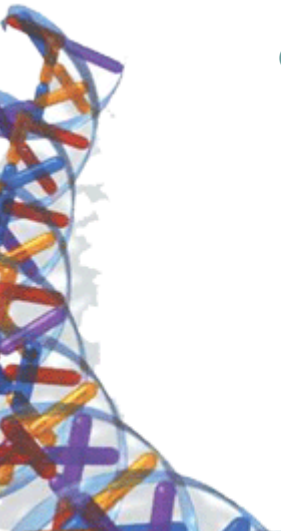
- **Réduction catabolique du nitrate**

- Utilisation du nitrate comme accepteur final d'électrons.



- **Dénitrification**

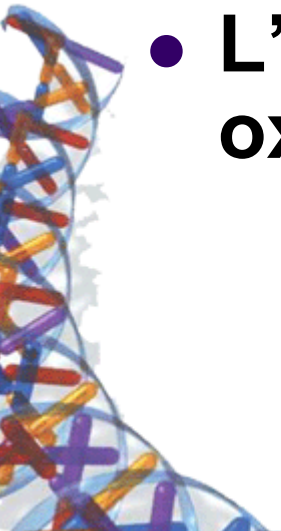
- Réduction du nitrate en azote gazeux.
- Dans le sol, engendre une perte de la fertilité.



# Oxydation des molécules inorganiques



- Limitée à un petit groupe de bactéries appelées **chimiolithotrophes**.
- 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.



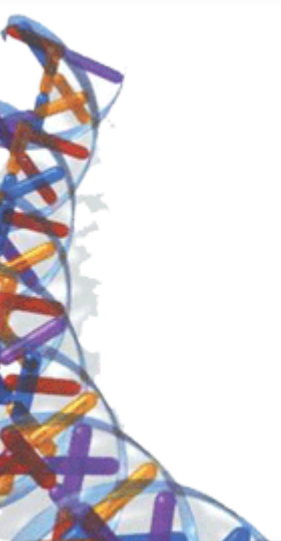
# Chimiolithotrophes représentatifs et leurs sources d'énergie



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 <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
<i>Nitrobacter</i>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	O <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , H <sub>2</sub> O
<i>Nitrosomonas</i>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	O <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , H <sub>2</sub> O
<i>Thiobacillus denitrificans</i>	S <sup>0</sup> , H <sub>2</sub> S	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , N <sub>2</sub>
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	Fe <sup>2+</sup> , S <sup>0</sup> , H <sub>2</sub> S	O <sub>2</sub>	Fe <sup>3+</sup> , H <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>



# Les bactéries nitrifiantes



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

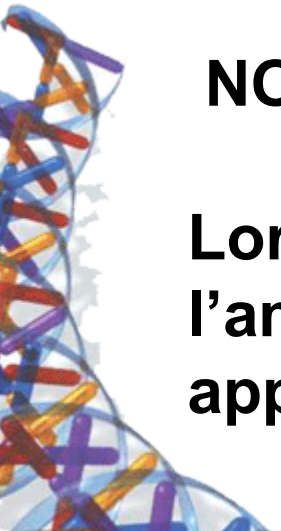
1) *Nitrosomonas* sp. et *Nitrosophira* sp.:



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**.



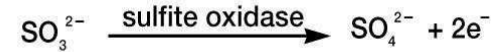
# Les bactéries sulfuro-oxydantes



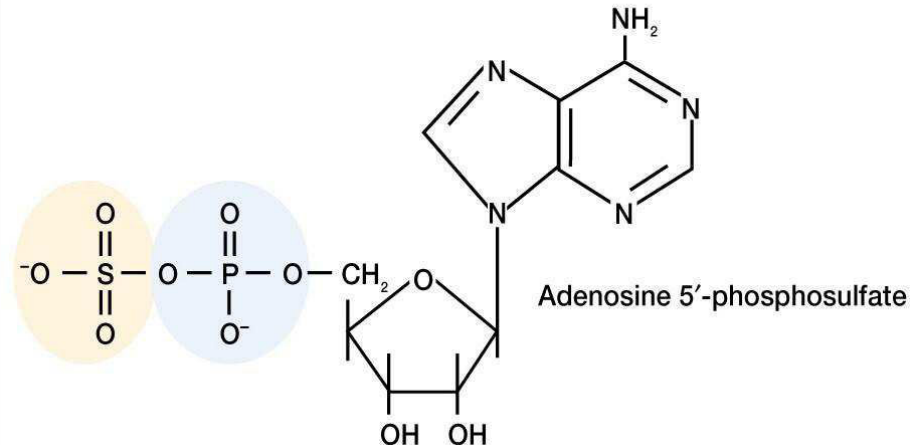
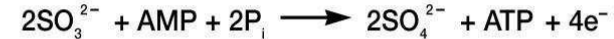
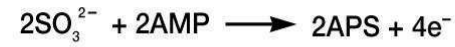
- Ces bactéries oxydent en acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), le soufre (S), le sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ), les thiosulfates ( $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ) et d'autres composés soufrés réduits.

- 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



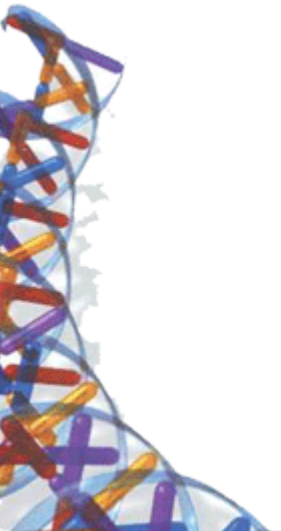
- **Processus au cours duquel l'énergie lumineuse est captée et convertie en énergie chimique.**
  - La photosynthèse est le processus métabolique le plus important sur terre car presque toute énergie provient de l'énergie solaire.
  - Elle fournit aux organismes photosynthétiques l'ATP et le pouvoir 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**

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



# La photosynthèse



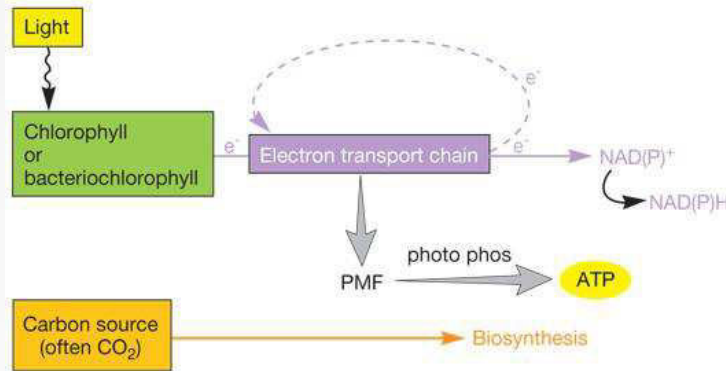
- **Phase claire**
  - L'énergie lumineuse est captée et convertie en énergie chimique.
- **Phase obscure**
  - Cette énergie chimique est alors utilisée pour réduire ou fixer le  $\text{CO}_2$  et synthétiser les constituants cellulaires.
- Il existe principalement trois types de phototrophie: **photosynthèse oxygénique**; **photosynthèse anoxygénique**; **phototrophie basée sur la rhodopsine**.



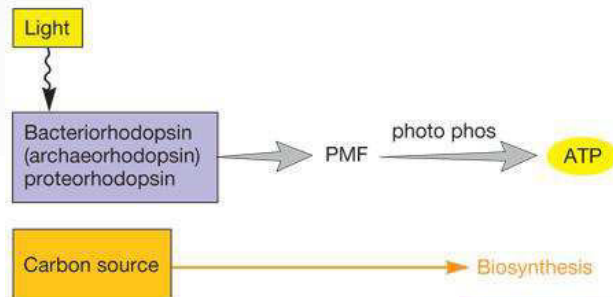
# La photosynthèse



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	$H_2O$	$H_2O$	$H_2$ , $H_2S$ , S, organic matter
$O_2$ production pattern	Oxygenic	Oxygenic <sup>a</sup>	Anoxygenic
Primary products of energy conversion	ATP + NADPH	ATP + NADPH	ATP
Carbon source	$CO_2$	$CO_2$	Organic and/or $CO_2$

<sup>a</sup>Some cyanobacteria can function anoxygenically under certain conditions. For example, *Oscillatoria* can use  $H_2S$  as an electron donor instead of  $H_2O$ .