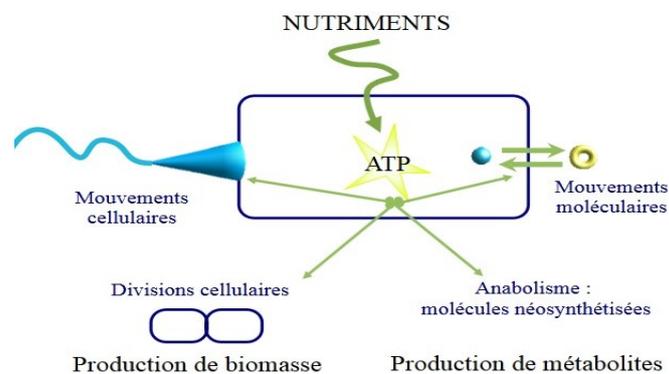


MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE CHEZ LES CHIMIOTROPHES

Ces réactions sont toutes des **réactions d'oxydoréduction** au cours desquelles une source d'énergie (substance nutritive prélevée dans le milieu) est oxydée.

Ces oxydations cataboliques conduisent d'une part à la **production de coenzymes réduits** (qui devront être réoxydés pour assurer la pérennité du système), et d'autre part à la **production d'ATP** (molécule servant de vecteur énergétique dans toutes les cellules vivantes).

Document n°1 : Rôles du métabolisme énergétique



1. DIVERSITÉ DU MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE CHEZ LES CHIMIOTROPHES

Cette opération est productrice d'énergie si et seulement si :

-
-
-
-

En fonction de l'accepteur final d'électrons, on distingue **deux types de métabolisme énergétique chez les chimiotrophes** :

-
-

Le transfert d'électrons implique le plus souvent une chaîne membranaire de transporteurs d'électrons.

Le flux des électrons le long de cette chaîne de transport crée une translocation de protons générant une force protomotrice, utilisable par les ATP synthases.

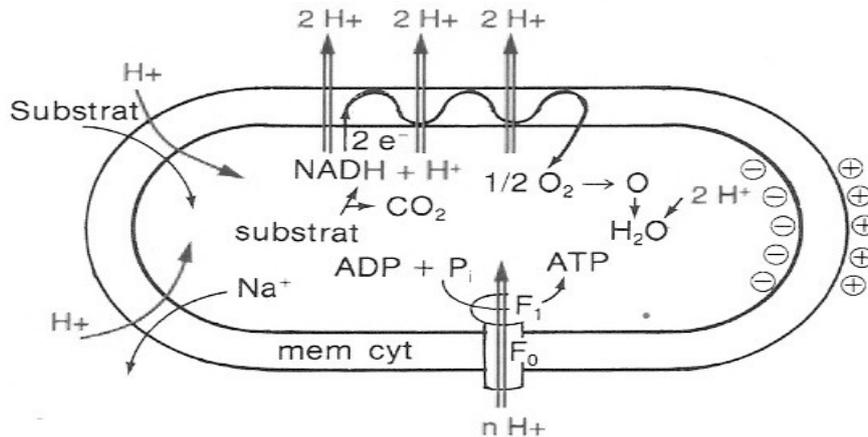
.....

On distingue :

-
-

La respiration s'applique principalement à certains chimioorganotrophes mais aussi à certains chimiolithotrophes.

Document n°2 : Schéma général d'un respiration aérobie



-
-

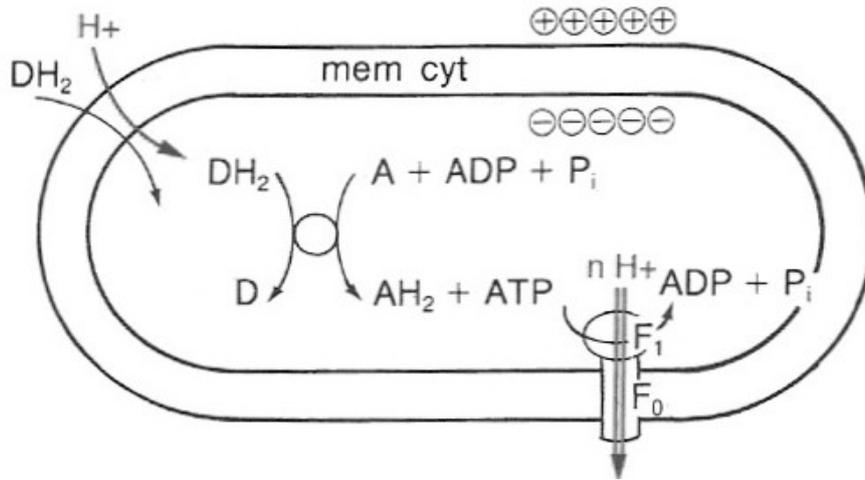
Le transfert d'électrons se réalise grâce à des coenzymes cytoplasmiques.

.....

Les fermentations **concernent les chimioorganotrophes** (rarement les chimiolithotrophes).

.....

Document n°3 : Schéma général des fermentations



Remarque :

Certaines espèces bactériennes sont capables de mettre en place différents systèmes de production d'énergie en fonction des conditions environnementales.

- Exemple : *Escherichia coli* :
- Respiration aérobie en aérobiose.
 - Respiration nitrate sur milieu nitraté en anaérobiose.
 - Fermentation en anaérobiose.

2. LES FERMENTATIONS CHEZ LES CHIMIOORGANOTROPHES

2.1. DÉFINITION GÉNÉRALE DE LA FERMENTATION

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2.2. LE PYRUVATE : MOLÉCULE CENTRALE ISSUE DE LA DÉGRADATION DU GLUCOSE

Formule semi-développée du pyruvate :

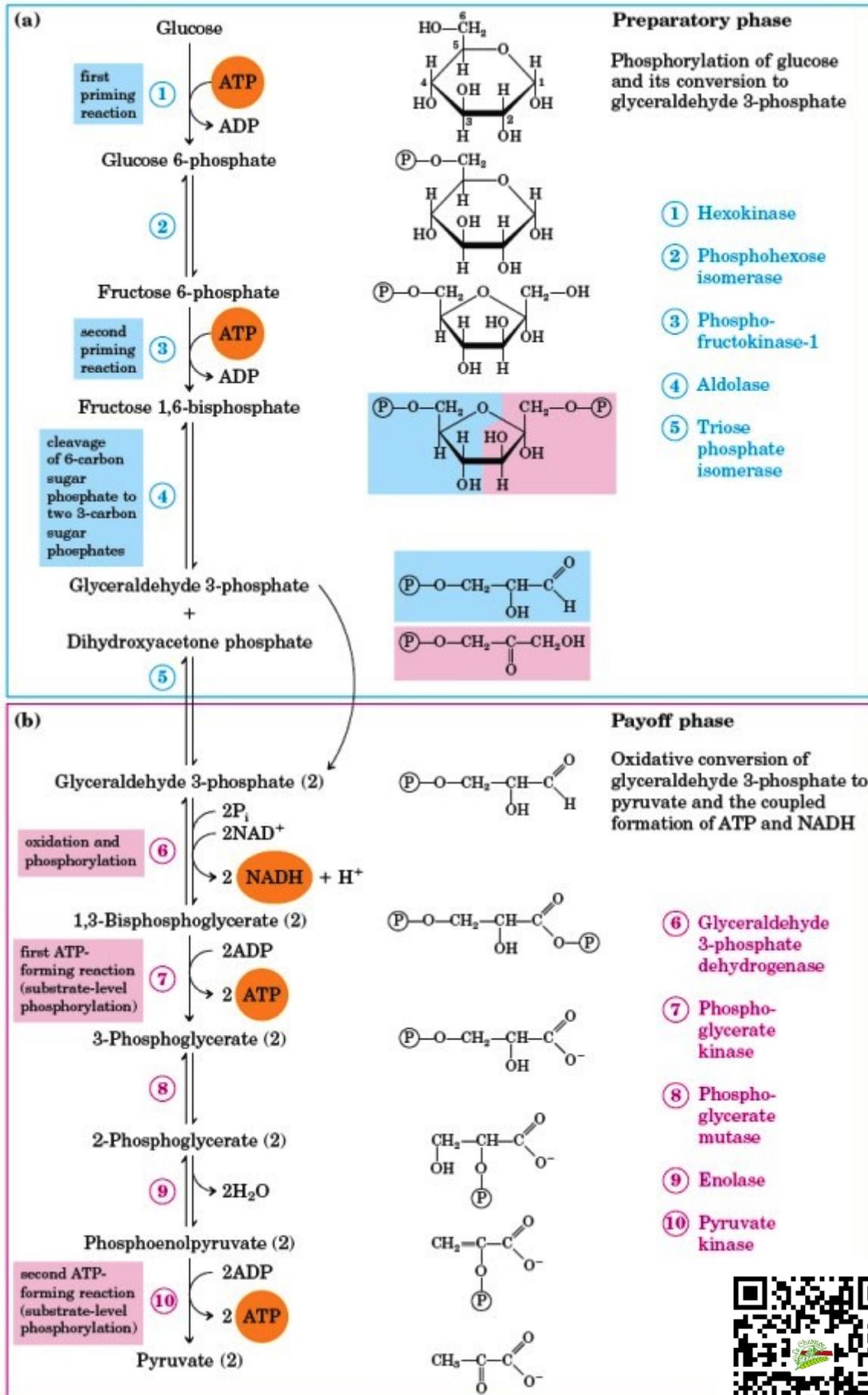
Cette molécule est au carrefour de différentes voies métaboliques.

Chez les micro-organismes, elle peut être produite par trois principales voies à partir du glucose :

2.2.1. LA GLYCOLYSE, OU VOIE D'EMBDEN-MEYERHOF-PARNAS (EMP)

.....

Document n°4 : La glycolyse, ou voie d'EMBDEN-MEYERHOF-PARNAS (EMP)



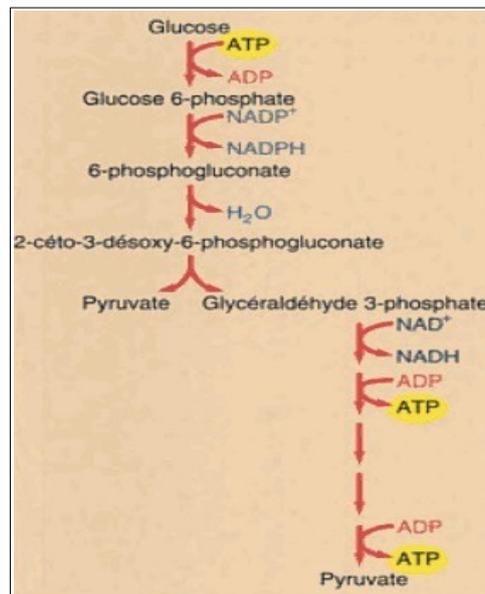
<https://www.reussir-en-biologie.com/la-glycolyse-2/>



Analyser le document n°4 :

2.2.2. LA VOIE D'ENTNER-DOUDOROFF, OU VOIE DU KDPG

Document n°5 : La voie d'ENTNER-DOUDOROFF

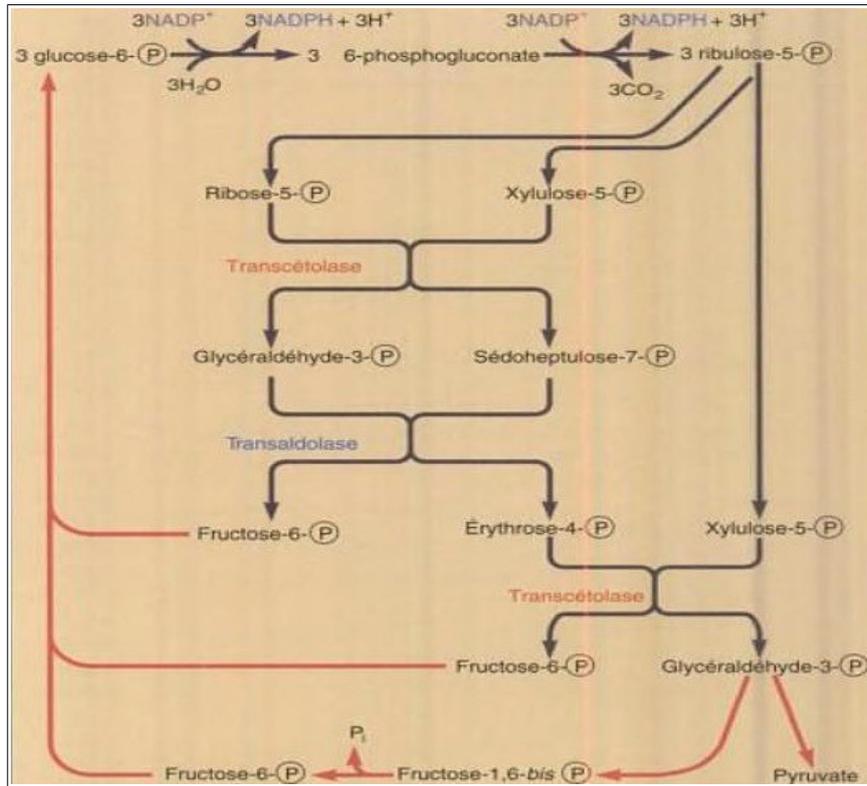


Bilan :

Le NADPH, H⁺ produit par cette sert aux biosynthèses. Chez les phototrophes, le NADPH, H⁺ peut intervenir dans des mécanismes de photophosphorylation.

2.2.3. LA VOIE DES PENTOSE PHOSPHATES

Document n°6 : La voie des pentoses phosphates



.....

.....

.....

2.3. DEVENIR DU PYRUVATE DANS LES FERMENTATIONS

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

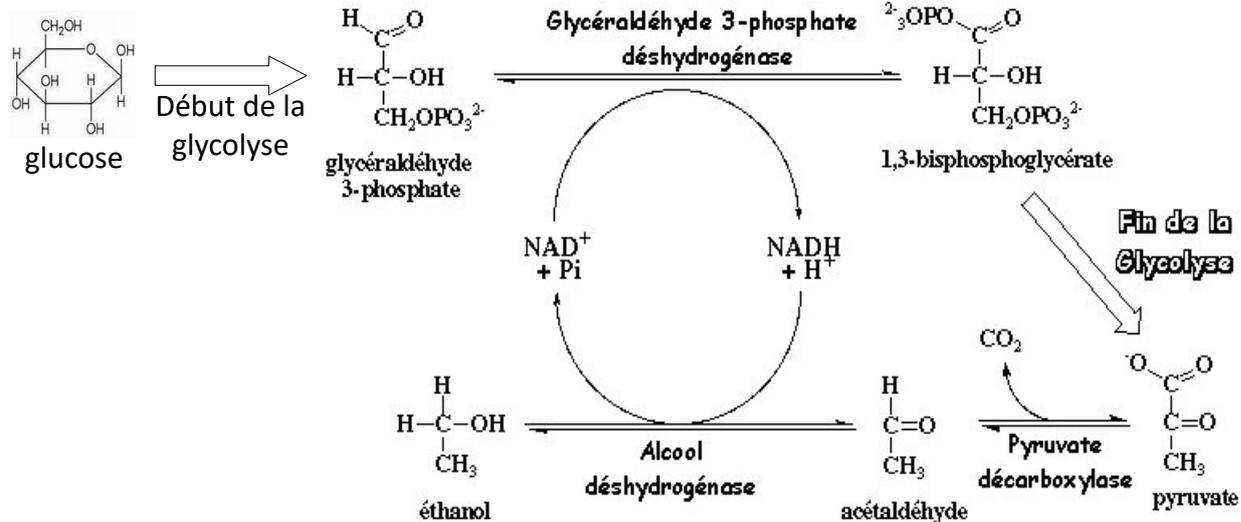
.....



<http://www.reussir-en-biologie.com/les-fermentations/>

2.3.1. FERMENTATION HOMOÉTHANOLIQUE

Document n°7 : Fermentation éthanolique à partir du glucose



Bilan :

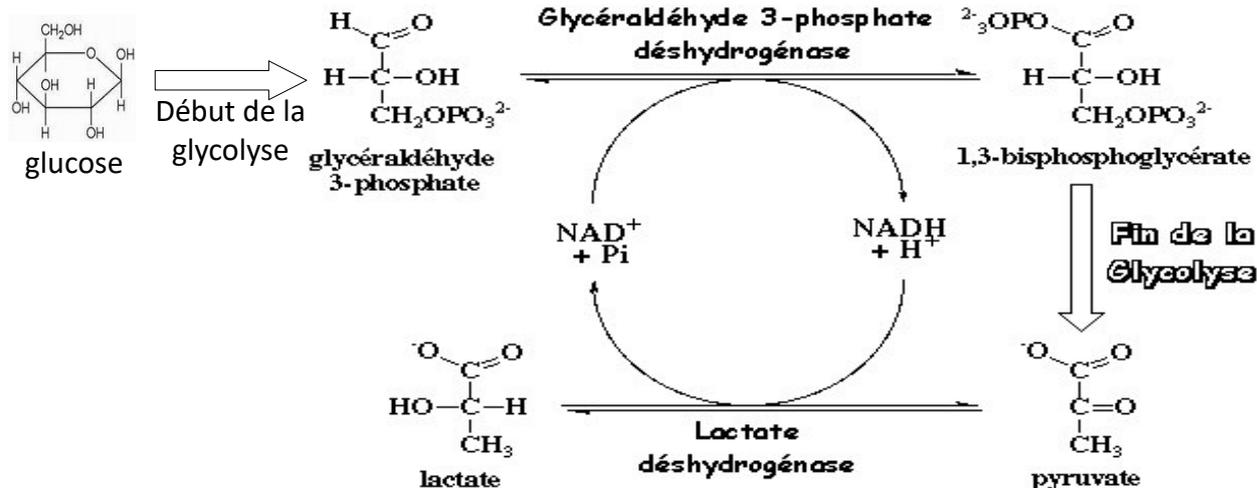
La fermentation homoéthanolique à la base de la fabrication des produits alcoolisés (vins, bières...) et du pain. Elle est réalisée par des levures (eucaryotes), en particulier *Saccharomyces cerevisiae*.

La bactérie *Zymomonas mobilis* est capable de réaliser la fermentation alcoolique à partir du glucose. Mais dans ce cas, le pyruvate est issu de la voie d'ENTNER-DOUDOROFF.

Cette aptitude est utilisée pour la production de bioéthanol et de biocarburants.

2.3.2. FERMENTATION HOMOLACTIQUE

Document n°8 : Fermentation homolactique à partir du glucose



Bilan :

La **fermentation homolactique** est responsable de la fermentation du lait qui est à la base de la fabrication du yaourt et du fromage frais.

Le lactate produit provoque un abaissement de *pH* responsable de l'acidité des produits laitiers fermentés (goût et conservation) et de la précipitation des protéines du lait (texture).

Elle est réalisée par les *Streptococcus*, de nombreux *Lactobacillus*, certains *Bacillus* et certaines moisissures.

La **fermentation hétérolactique** permet de produire du **lactate**, de l'**éthanol** et du **CO₂**.

Cette fermentation est responsable de la production du kéfir.

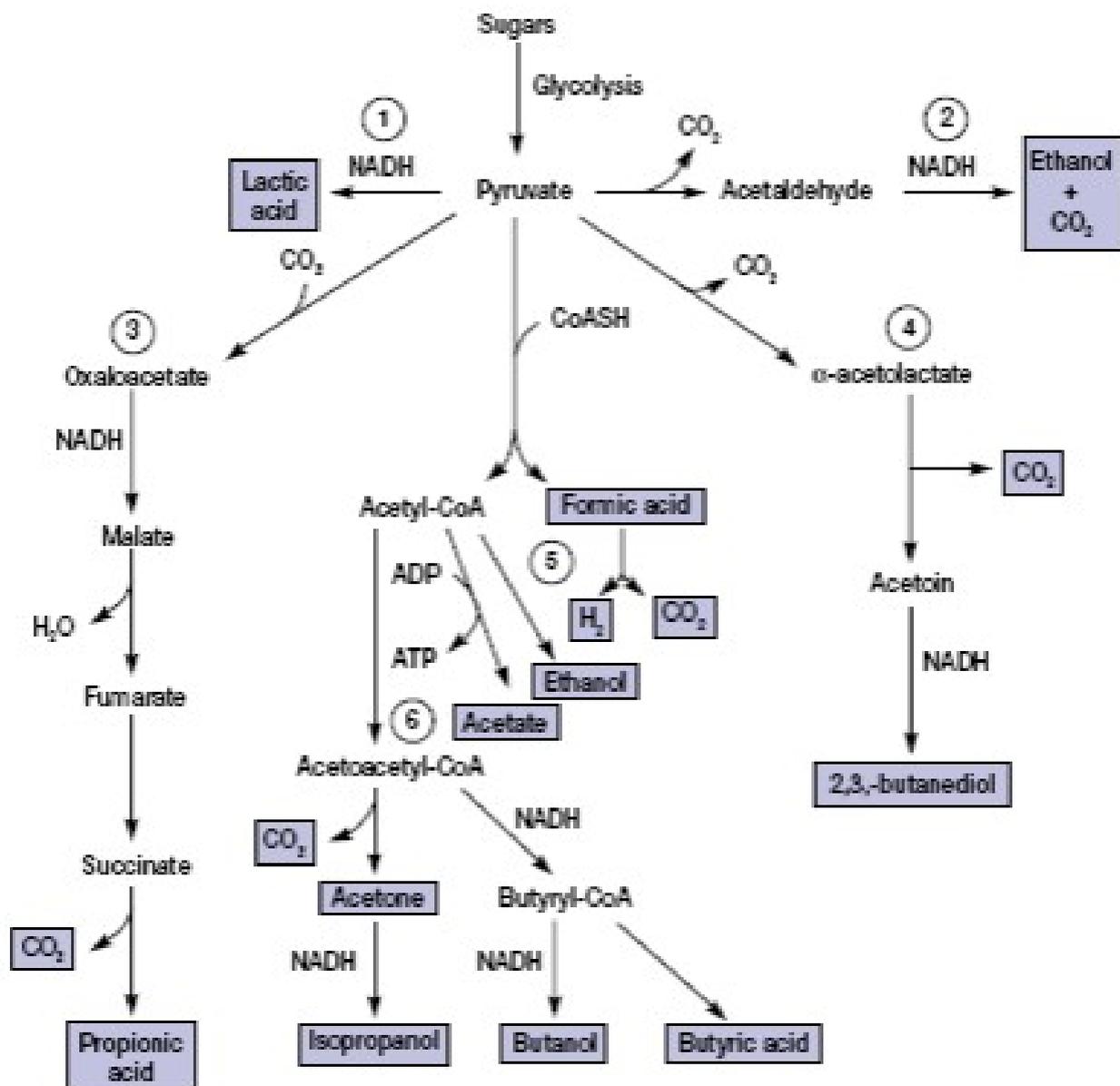
Elle est réalisée par certains *Leuconostoc* et par les *Lactobacillus* hétérofermentaires.

→ voir TP MGM « Étude des Métabolismes Respiratoires et Fermentatifs »

2.3.3. DIVERSITÉ DES FERMENTATIONS CHEZ LES MICROORGANISMES

Il existe une grande variété de fermentations à partir de substrat glucidique.

Document n°9 : vue d'ensemble des principales fermentations bactériennes à partir d'hexoses



→ voir TP MGM « Étude des Métabolismes Respiratoires et Fermentatifs »

Type de fermentation	Organismes	Produits	Commentaire
Propionique	Genre <i>Propionobacterium</i> <i>Clostridium propionicum</i>		Élaboration de certains fromages à pâtes cuites (gruyère, emmenthal, etc)
butanediolique	Certaines entérobactéries		Butanediol révélé par le test VP
Acides mixtes	Certaines entérobactéries		Révélee par le test RM.
Butyrique	<i>Butyribacterium</i> <i>Clostridium propionicum</i>		Indésirable (conserves avariées, éclatement des meules de gruyères)

Certaines microorganismes sont capables de réaliser des fermentations à partir de substrats non glucidiques.

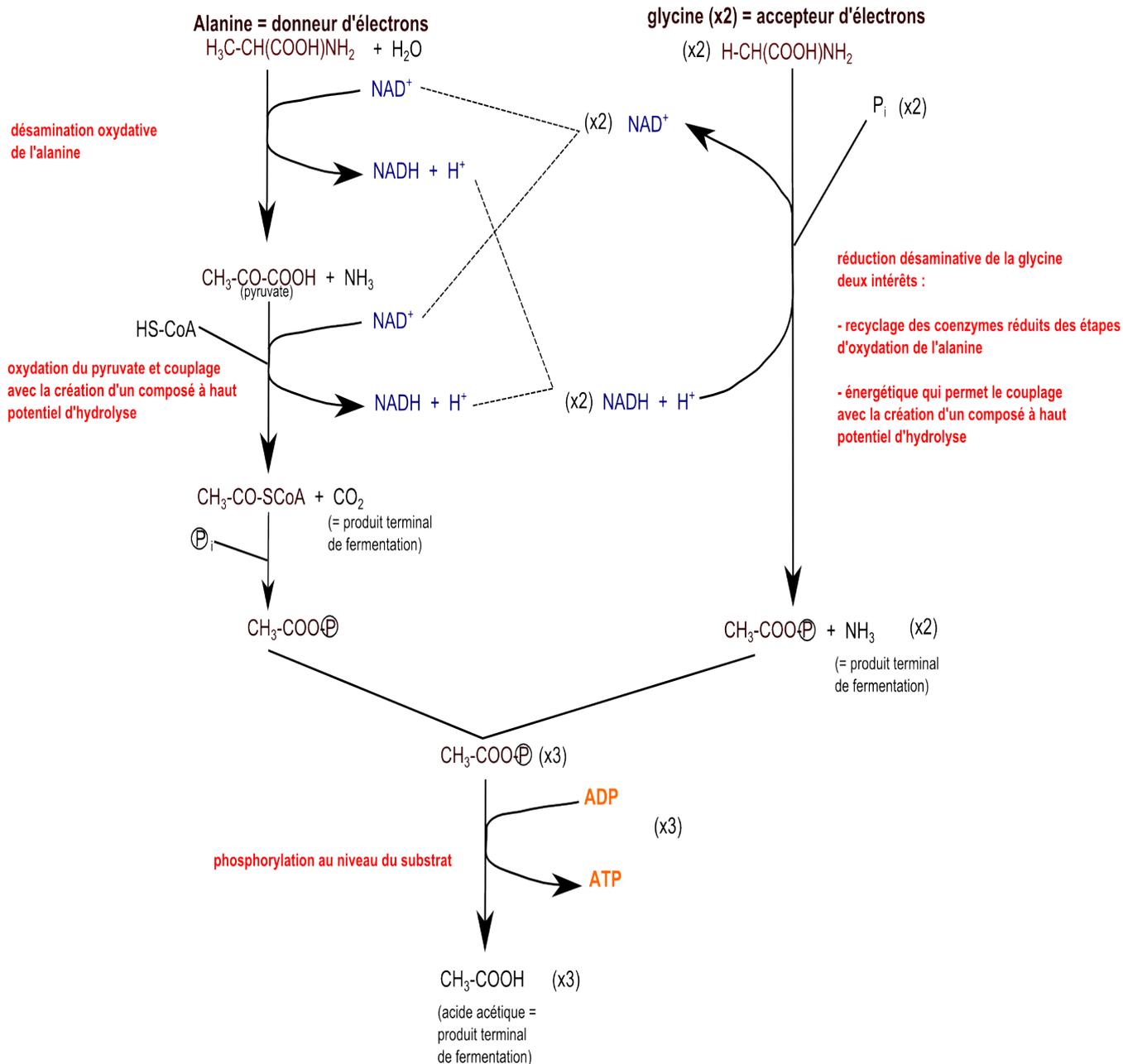
Document n°10 : Quelques fermentations bactériennes atypiques

Type	Overall balanced reaction	Organisms
Acetylene	$2 C_2H_2 + 3 H_2O \rightarrow \text{ethanol} + \text{acetate}^- + H^+$	<i>Pelobacter acetylenicus</i>
Glycerol	$4 \text{Glycerol} + 2 HCO_3^- \rightarrow 7 \text{acetate}^- + 5 H^+ + 4 H_2O$	<i>Acetobacterium</i> spp.
Resorcinol (an aromatic compound)	$2 C_6H_4(OH)_2 + 6 H_2O \rightarrow 4 \text{acetate}^- + \text{butyrate}^- + 5 H^+$	<i>Clostridium</i> spp.
Cinnamate (an aromatic compound)	$2 C_9H_7O_2 + 2 H_2O \rightarrow C_9H_9O_2 + \text{benzoate}^- + \text{acetate}^-$	<i>Acetivibrio multivorans</i>
Phloroglucinol (an aromatic compound)	$C_6H_4O_3 + 3 H_2O \rightarrow 3 \text{acetate}^- + 3 H^+$	<i>Pelobacter massiliensis</i> <i>Pelobacter acidigallici</i>
Putrescine	$10 C_4H_{14}N_2 + 26 H_2O \rightarrow 6 \text{acetate}^- + 7 \text{butyrate}^- + 10 NH_4^+ + 16 H_2 + 13 H^+$	Unclassified gram-positive nonsporing anaerobes
Citrate	$\text{Citrate}^{3-} + 2 H_2O \rightarrow \text{formate}^- + 2 \text{acetate}^- + HCO_3^- + H^+$	<i>Bacteroides</i> sp.
Glyoxylate	$4 \text{Glyoxylate}^- + 3 H^+ + 3 H_2O \rightarrow 6 CO_2 + 5 H_2 + \text{glycolate}^-$	Unclassified gram-negative bacterium
Succinate	$\text{Succinate}^{2-} + H_2O \rightarrow \text{propionate}^- + HCO_3^-$	<i>Propionigenium modestum</i>
Oxalate	$\text{Oxalate}^{2-} + H_2O \rightarrow \text{formate}^- + HCO_3^-$	<i>Oxalobacter formigenes</i>
Malonate	$\text{Malonate}^{2-} + H_2O \rightarrow \text{acetate}^- + HCO_3^-$	<i>Malonomonas rubra</i> <i>Sporomusa malonica</i>

les bilans ne sont pas nécessairement équilibrés

La réaction de STICKLAND est une fermentation à partir d'acides aminés (glycine et alanine).

Document n°11 : Réaction de STICKLAND



Il existe également des fermentations chez les chimiolithotrophes.

Exemple : Fermentation des ions sulfates par *Desulfovibrio sulfodismutans*.

3. LES RESPIRATIONS

3.1. DÉFINITION GÉNÉRALE DES RESPIRATIONS

Les respirations sont des processus énergétiques au cours desquels le fonctionnement d'une chaîne membranaire de transport d'électrons (= chaîne respiratoire) permet la formation d'une force proto-motrice (on exclut de cette définition les photophosphorylations).

Cette force proto-motrice permet le plus souvent la synthèse d'ATP par l'ATP synthase (oxydation phosphorylante). La quantité d'ATP formé dépendra de la chaîne respiratoire (1 ATP formé par passage de 2 à 4 H⁺).

Remarque : La force proto-motrice peut être utilisée pour d'autres mécanismes : mouvement des flagelles, transports membranaires actifs, etc...

Les respirations permettent une oxydation plus complète des sources d'énergies : lorsque la source d'énergie est organique, l'oxydation est totale pour former CO₂ et H₂O. Le rendement énergétique des respirations est donc bien supérieur à celui des fermentations.

L'ATP est donc synthétisé par phosphorylation au niveau du substrat et par oxydation phosphorylante.

En fonction de l'accepteur final d'électrons, on distingue :

- les **respiration aérobie** : si l'accepteur final d'électrons est O₂.
- les **respirations anaérobies** : si l'accepteur final d'électrons est différent de O₂.

Document n°12 : Schéma simplifié de la chaîne respiratoire mitochondriale

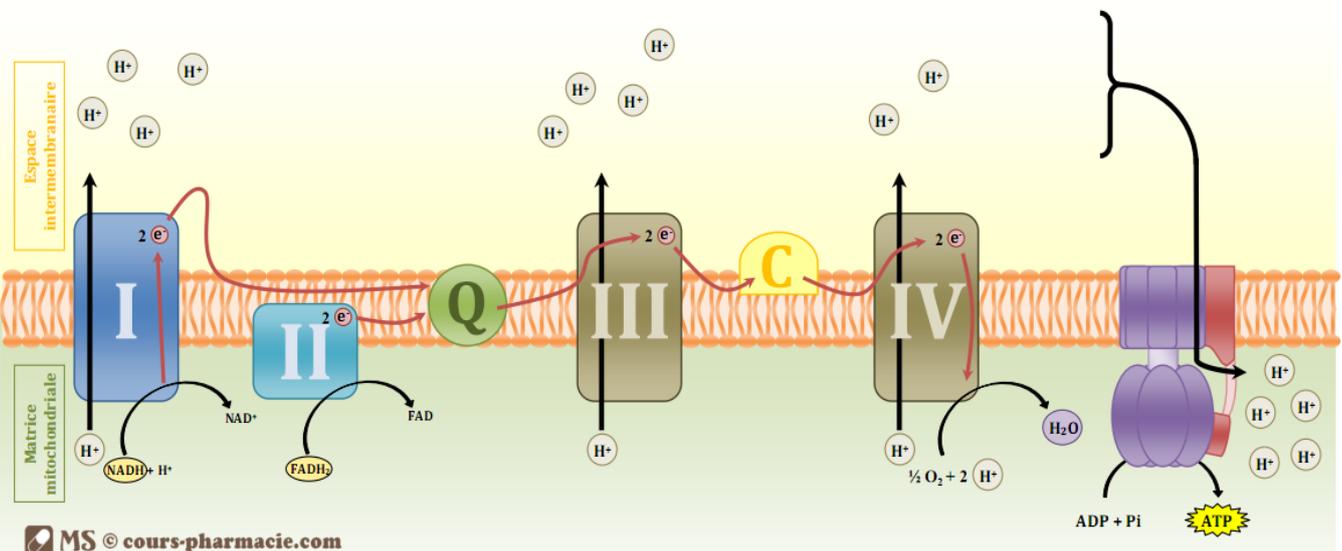


Schéma simplifié représentant les mécanismes de la chaîne respiratoire et de la synthèse d'ATP par phosphorylation oxydative.

La chaîne respiratoire correspond à une chaîne de complexes protéiques présents au sein de la membrane interne de la mitochondrie et responsables de la production d'ATP à partir du NADH et du FADH₂ produits lors des différentes voies cataboliques de l'organisme.

Cette production d'énergie est permise grâce à la formation d'un gradient électrochimique de proton dans l'espace inter-membranaire de la mitochondrie, lui-même formé par l'énergie des électrons provenant du NADH et du FADH₂. Les électrons riches en énergie récupérés seront transportés successivement via les différents complexes :

- Le **complexe I** a une action **NADH coenzyme Q réductase**, récupérant les électrons du NADH et permet le transport de 4 protons de la matrice mitochondriale à l'espace inter-membranaire.
- Le **complexe II** a une action **Succinate coenzyme Q réductase**, récupérant les électrons du FADH₂ et permet le transport d'aucun proton.
- Le **complexe III** a une action **Coenzyme Q cytochrome C réductase**, et permet le transport de 4 protons de la matrice mitochondriale à l'espace inter-membranaire.
- Le **complexe IV** a une action **Cytochrome C oxydase**, et permet le transport de 2 protons de la matrice mitochondriale à l'espace inter-membranaire.
- Le **coenzyme Q** (ou **ubiquinone**) permet la transition entre le complexe I ou II et le complexe III.
- Le **cytochrome C** permet la transition entre le complexe III et le complexe IV.

Suite à la chaîne de complexe protéique, le dernier accepteur d'électrons est l'oxygène qui sera ainsi à l'origine de la formation de molécule d'eau. Le NADH permettra donc le transport de **10 protons** de la matrice mitochondriale à l'espace inter-membranaire, tandis que le FADH₂ de seulement **6**. Ceux-ci repasseront vers la matrice mitochondriale via une pompe à proton que l'on appelle également l'**ATP-synthétase**, et qui sera à l'origine de la formation d'ATP.

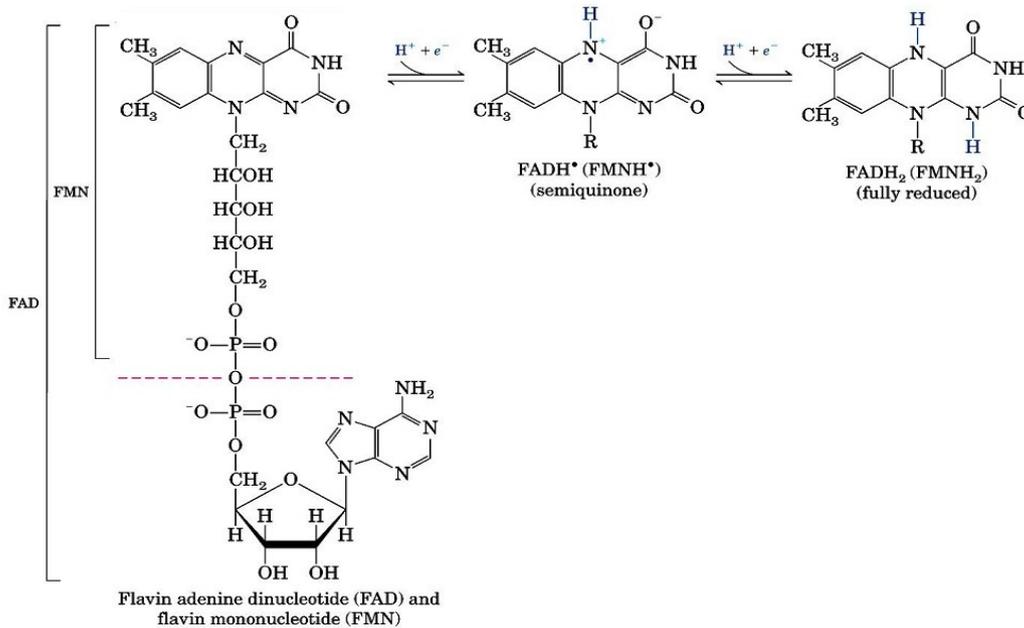
3.2. LES CONSTITUANTS DES CHÂÎNES RESPIRATOIRES

Les **chaînes respiratoires** (aussi appelées chaîne de transport d'électrons) sont constituées d'un ensemble complexe de **protéines membranaires et d'un transporteur non protéique** :

- _____ :
-
- _____ :

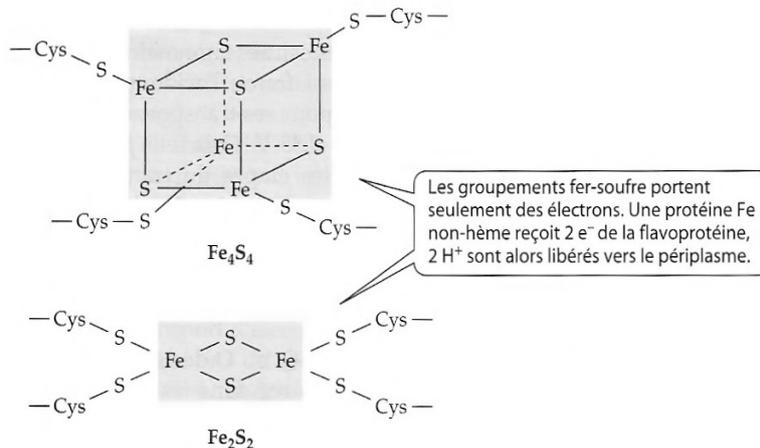
Hétéroprotéines dont la partie fonctionnelle est un coenzyme vrai dérivé de la vitamine B2 (riboflavine) : la **FAD (flavine adénine dinucléotide)** et la **FMN (flavine mononucléotide)**.

Document n°13 : Coenzymes flaviniques FAD/FADH₂ et FMN/FMNH₂



- _____ :
- Petites **hétéroprotéines** comprenant un **centre redox formé de Fe et de S** en quantités équimolaires.

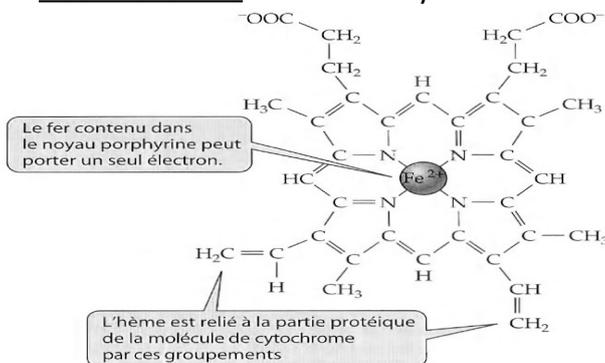
Document n°14 : Structures de centres Fe-S



— _____ :

Hétéroprotéines caractérisées par leurs propriétés spectrophotométriques. Il existe plusieurs classes : cytochrome *a*, cytochrome *b*, cytochrome *c*, etc. La partie fonctionnelle des cytochromes est un **noyau porphyrine avec un atome central de Fe : l'hème**.

Document n°15 : Hème des cytochromes

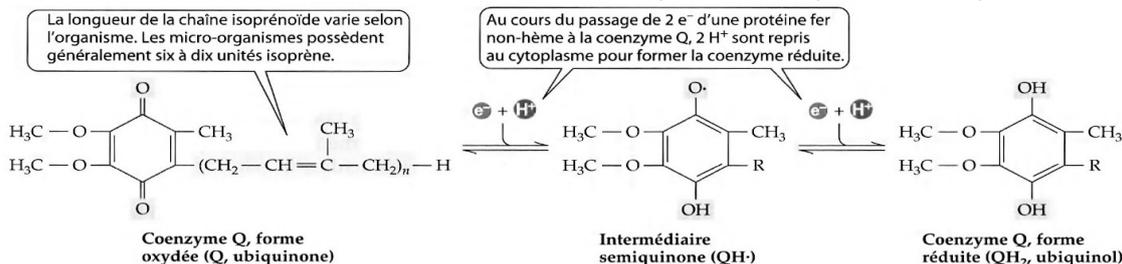


— **Les quinones :**

.....

.....

Document n°16 : Fonctionnement du coenzyme Q : ubiquinone/ubiquinol



3.3. LES RESPIRATIONS AÉROBIES

L'accepteur final d'électrons est O₂ :

3.3.1. LES RESPIRATIONS AÉROBIES CHEZ LES CHIMIOORGANOTROPHES

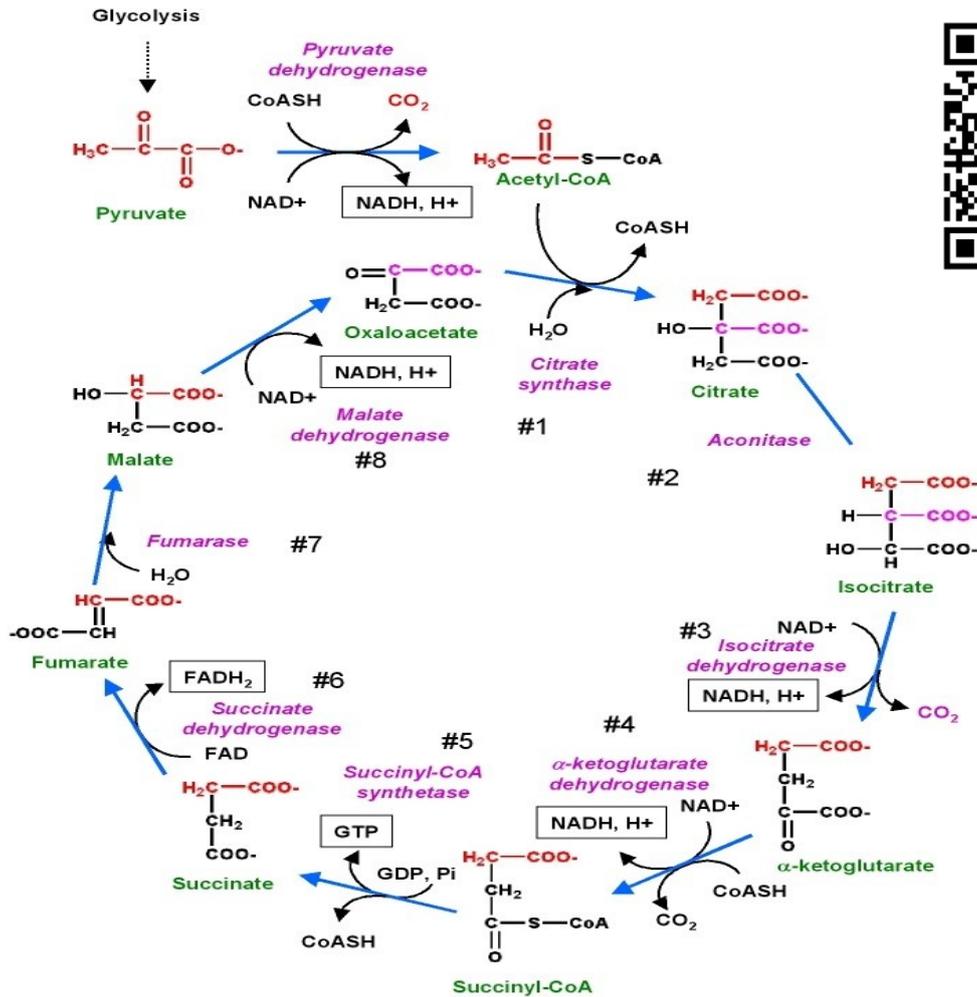
- **Source d'énergie :**
- **Donneur d'électrons :**
- **Accepteur final d'électrons :**

.....

.....

.....

Document n°17 : Le cycle de KREBS



Analyser le document n°17 :

.....

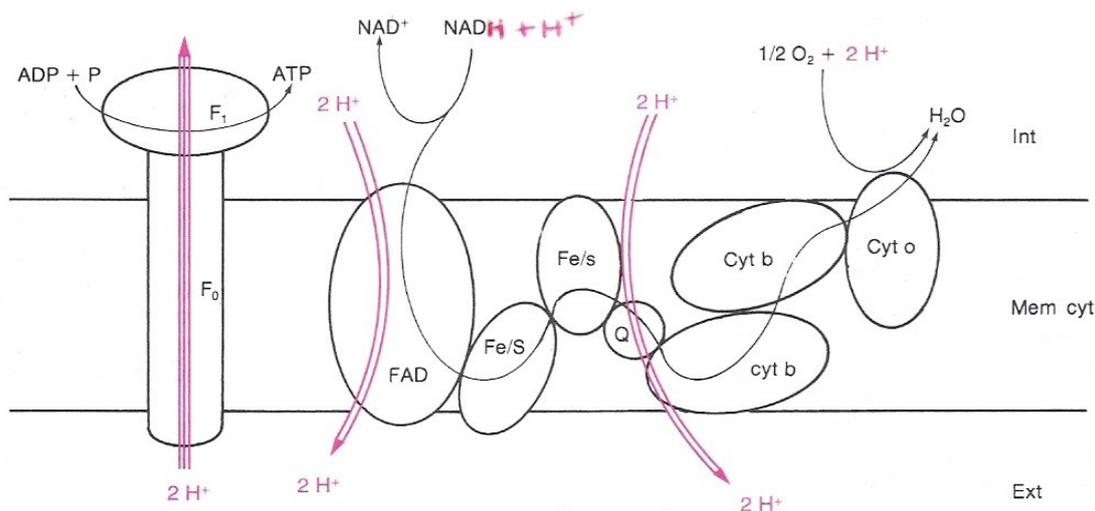
.....

.....

.....

.....

Document n°18 : Réoxydation des coenzymes réduits par la chaîne respiratoire aérobie d'*Escherichia coli*



3.3.2. LES RESPIRATIONS AÉROBIES CHEZ LES CHIMIOLITHOTROPHES

- **Source d'énergie :**
- **Donneur d'électrons :**
- **Accepteur final d'électrons :**

Pour les respirations aérobie des chimiolithotrophes on a une grande diversité des donneurs d'électrons minéraux qui peuvent céder leurs électrons à l'oxygène de façon suffisamment exergonique pour permettre la synthèse d'ATP (30,5 kJ.mol⁻¹).

Document n°19 : Respirations aérobie chez les chimiolithotrophes

Donneur d'électrons	Réaction	Type de chimiolithotrophe	E ₀ ' du couple (V)	ΔG ^{0'} (kJ/réaction)	Nombre d'électrons	ΔG ^{0'} (kJ/2e ⁻)
Phosphite ^b	4 HPO ₃ ²⁻ + SO ₄ ²⁻ + H ⁺ → 4 HPO ₄ ²⁻ + HS ⁻	Phosphito-bactéries	- 0,69	- 91	2	- 91
Hydrogène	H ₂ + 1/2 O ₂ → H ₂ O	Hydrogéo-bactéries	- 0,42	- 237,2	2	- 237,2
Sulfure	HS ⁻ + H ⁺ + 1/2 O ₂ → S ⁰ + H ₂ O	Sulfo-bactéries	- 0,27	- 209,4	2	- 209,4
Soufre	S ⁰ + 1 1/2 O ₂ + H ₂ O → SO ₄ ²⁻ + 2 H ⁺	Sulfo-bactéries	- 0,20	- 587,1	6	- 195,7
Ammonium ^c	NH ₄ ⁺ + 1 1/2 O ₂ → NO ₂ ⁻ + 2 H ⁺ + H ₂ O	Bactéries nitrifiantes	+ 0,34	- 274,7	6	- 91,6
Nitrite	NO ₂ ⁻ + 1 1/2 O ₂ → NO ₃ ⁻	Bactéries nitrifiantes	+ 0,43	- 74,1	2	- 74,1
Fer ferrique	Fe ²⁺ + H ⁺ + 1/4 O ₂ → Fe ³⁺ + 1/2 H ₂ O	Ferro-bactéries	+ 0,77	- 32,9	1	- 65,8

Donneur d'électrons	Accepteur final d'électrons	Produit d'oxydation	Micro-organismes concernés	Remarques

.....

Remarque : Généralement la source de carbone est le CO₂, les chimiolithorophes sont donc essentiellement autotrophes (il existe tout de même des hétérotrophes).

3.4. LES RESPIRATIONS ANAÉROBIES

Les respirations anaérobies se rencontrent aussi bien chez les chimiolithotrophes que chez les chimioorganotrophes.

.....

On a alors mise en jeu de réactions de réduction utilisées à des fins énergétiques.

.....

Remarque : Distinction entre métabolisme assimilatif et métabolisme dissimilatif

Le métabolisme assimilatif correspond à la mise en jeu de réactions de réduction à des fins de biosynthèse.

Exemples : NO_3^- réduit pour former les fonctions $-\text{NH}_2$ des acides aminés, bases azotées...

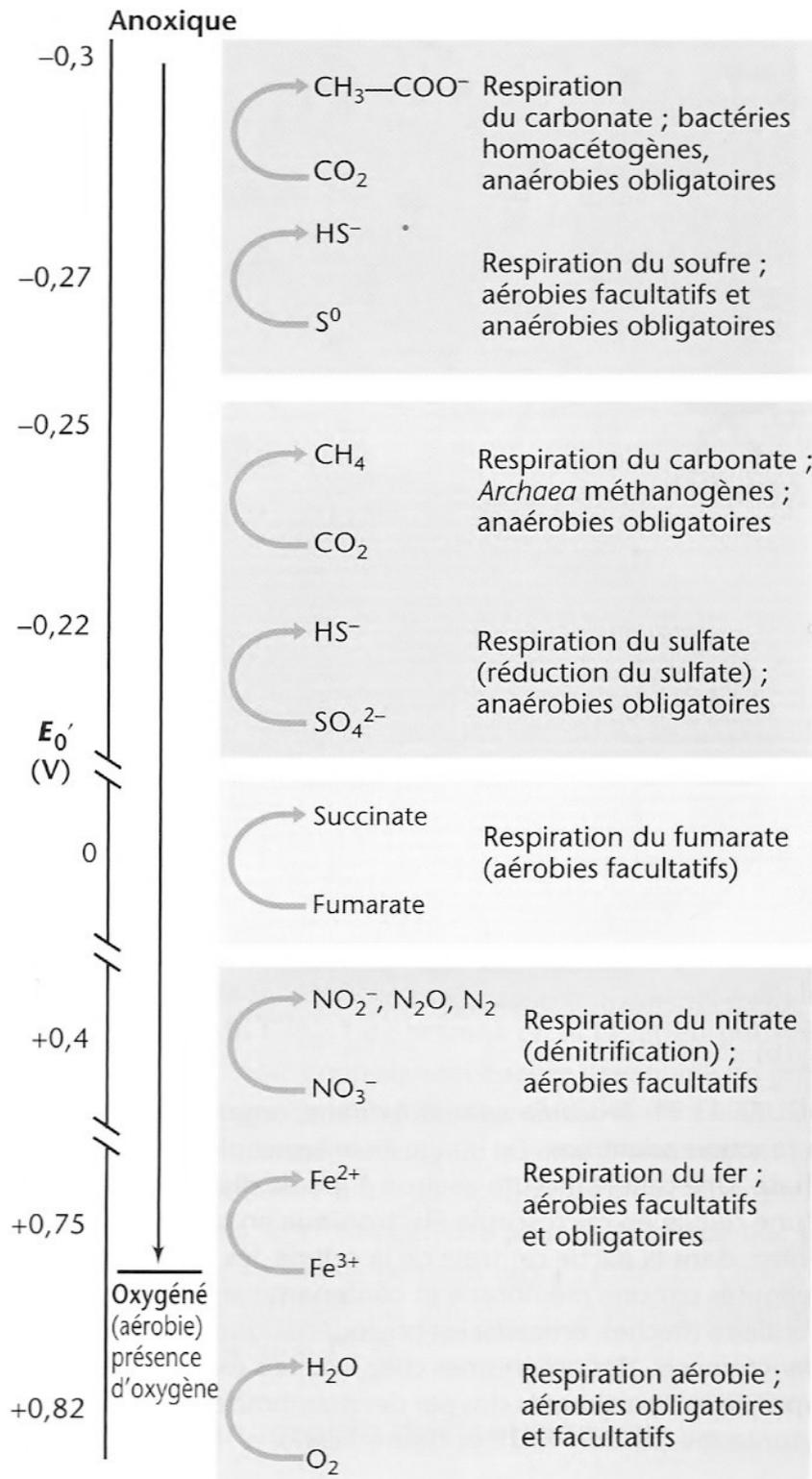
SO_4^{2-} réduit pour former les fonctions $-\text{SH}$ des acides aminés soufrés.

CO_2 réduit pour former les groupes $-\text{CH}_3$ de nombreuses molécules organiques.

Réalisé par de très nombreux organismes (eubactéries, archées, mycètes, algues, plantes).

Seules des petites quantités de molécules réduites sont utilisées pour satisfaire les besoins de la cellule.

Document n°20 : Exemples d'accepteurs finaux d'électrons des chaînes respiratoires anaérobies



Document n°21 : Exemples de respirations anaérobies

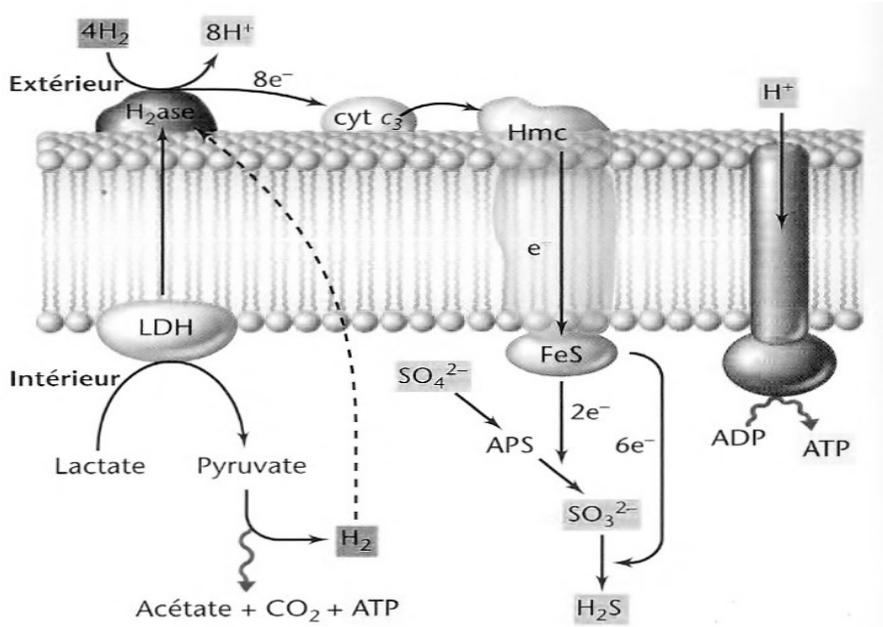
Donneur d'électrons	Accepteur final d'électrons	Produit d'oxydation	Micro-organismes concernés	Remarques

Le bilan énergétique des respiration anaérobies dépend :

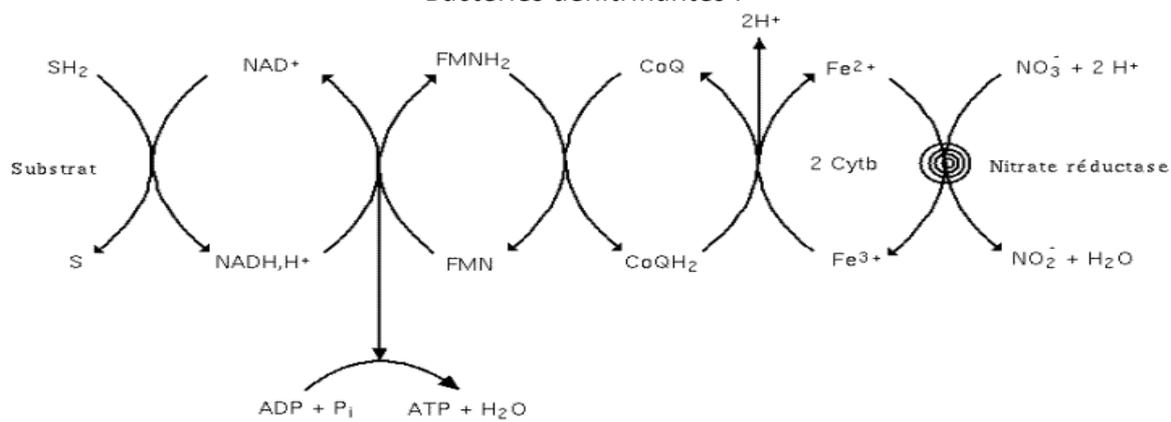
-
-
-
-
-

Document n°22 : Exemples de chaînes respiratoires anaérobies

Bactéries sulfato-réductrices :

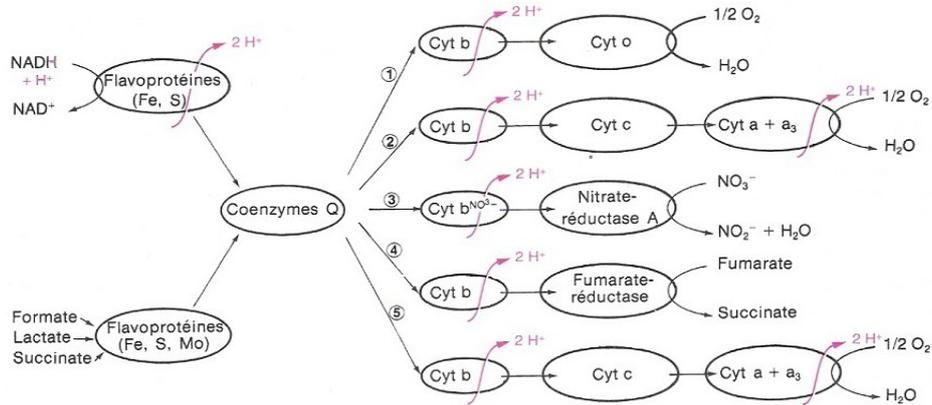


Bactéries dénitrifiantes :



BILAN

Q1. Déterminer les types de respirations schématisées ci-dessous :



Q2. Comparer le rendement énergétique de la respiration aérobie du glucose et de la fermentation alcoolique.

On considérera que pour la respiration aérobie : 1 $NADH, H^+$ permet la synthèse de 3 ATP, et que 1 $FADH_2$ permet la synthèse de 2 ATP (cas de la chaîne respiratoire mitochondriale)

 **MÉTABOLISME FERMENTATIF vs. MÉTABOLISME OXYDATIF** 

	Métabolisme fermentatif	Métabolisme oxydatif (respiratoire)
Source d'énergie		
Nature du donneur d'électrons		
Nature de l'accepteur final d'électrons		
Modalité de transfert d'électrons		
Type(s) respiratoire(s)		
Biosynthèse d'ATP		
Type(s) trophique(s)		