

## RESPIRATION ET FERMENTATION, SOURCES D'ATP

Nous avons vu que les cellules végétales utilisent la matière produite par photosynthèse pour : - Assurer leur croissance.

- Réaliser des réserves
- Produire de l'énergie en oxydant le glucose produit dans les mitochondries.

Nous savons, depuis la 2<sup>nd</sup> que ce sont les **mitochondries** qui produisent l'énergie nécessaires au fonctionnement cellulaire grâce à l'oxydation du glucose par l'O<sub>2</sub> : **c'est la respiration cellulaire.**

*PB : comment les cellules non chlorophylliennes et les cellules animales (cellules hétérotrophes) produisent-elles de l'ATP ? Comment l'ATP est-il synthétisé hors des chloroplastes ?*

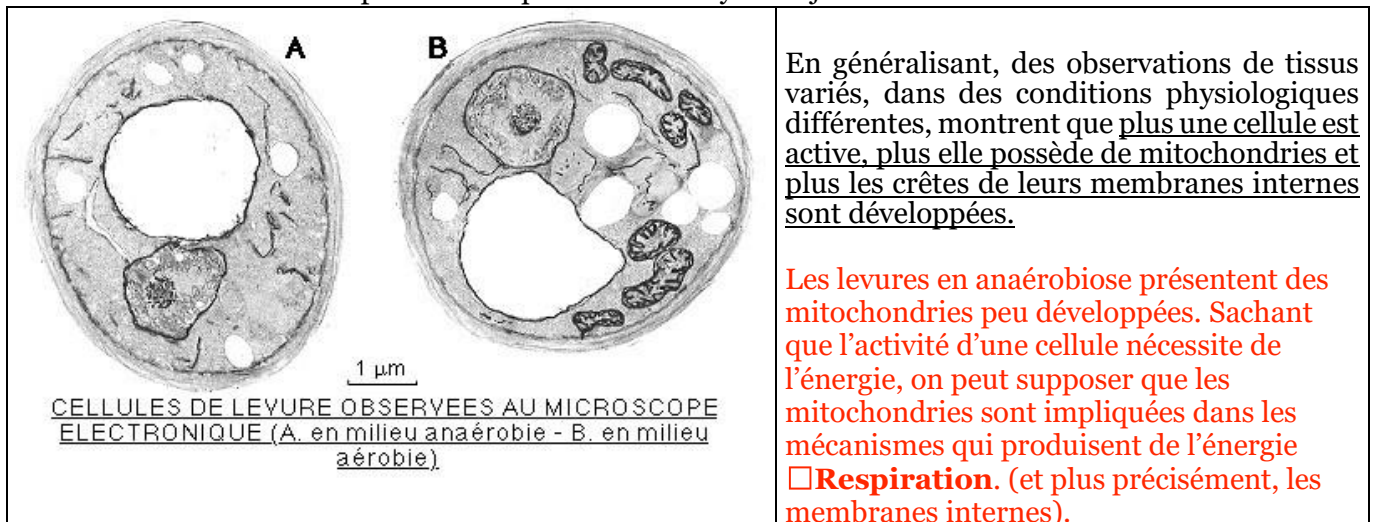
### **Mise en évidence de la respiration mitochondriale :**

#### **a) Observation de levures en aérobiose et anaérobiose.**

Les levures sont des champignons unicellulaires dépourvus de chlorophylle. Comme les cellules animales, elles sont hétérotrophes et consomment des substances organiques qui peuvent être soit stockées, soient puisées dans le milieu.

Nous savons que la **respiration** est un phénomène qui **consomme du dioxygène** et **rejette du dioxyde de carbone**. Nous savons aussi que ces échanges de gaz s'accompagnent de l'**oxydation de nutriments organiques**, comme le glucose.

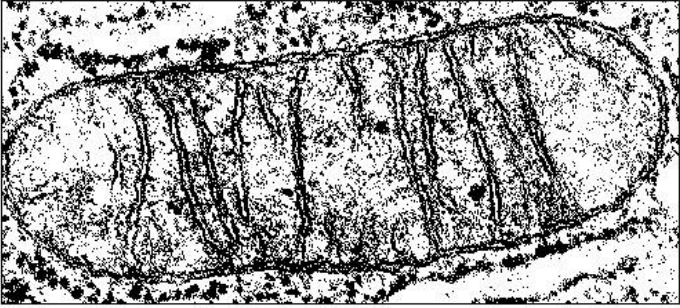
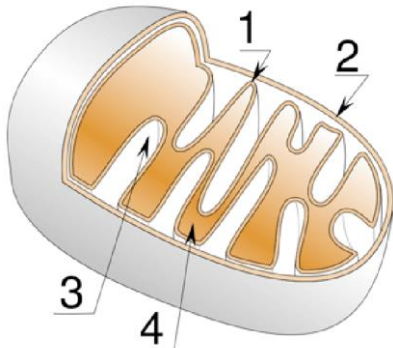
L'observation au microscope électronique de levures ayant séjourné dans des conditions aérobies.



NB : Nous savons que la molécule universelle du transfert d'énergie dans les cellules est l'ATP : la respiration, dans les mitochondries ne produirait-elle pas de l'ATP. Mais observons tout d'abord l'ultrastructure d'une mitochondrie.

#### **b) Ultrastructure des mitochondries : un organe compartimenté.**

Les mitochondries apparaissent comme des organites compartimentés, présentant une membrane interne développées délimitant des crêtes dans la matrice (ou stroma)

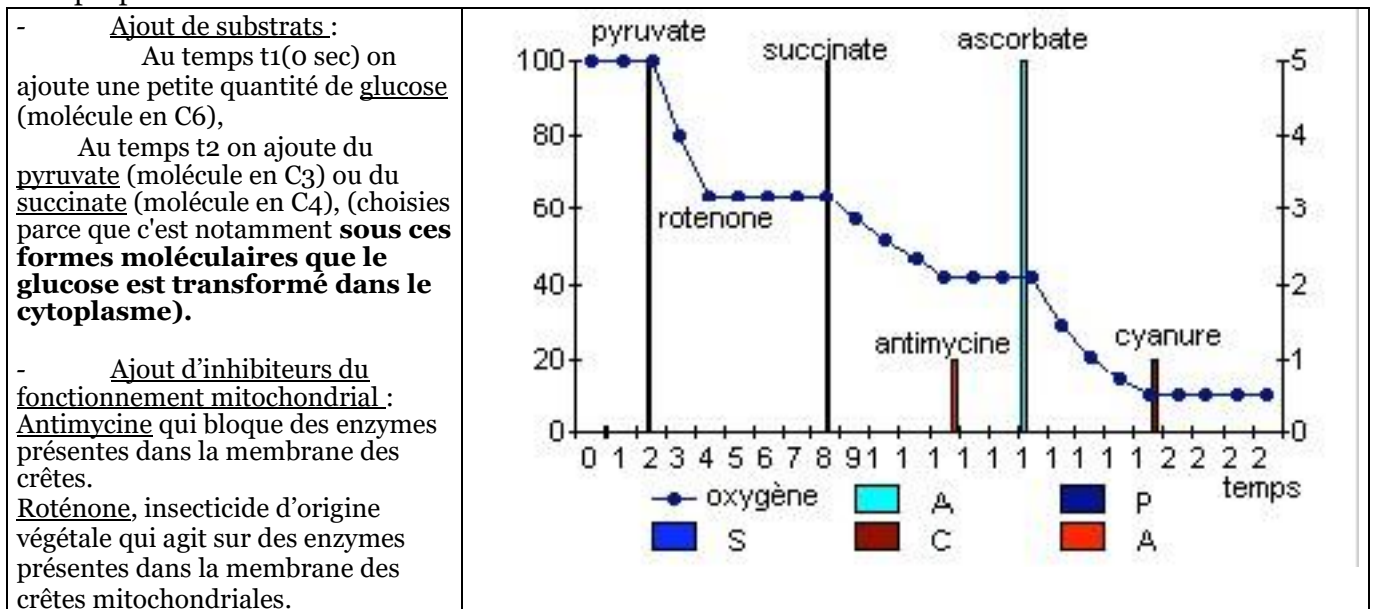
Observation microscopique	Schéma	Légendes
 <p>MITOCHONDRIE OBSERVEE AU MET (x 45 000)</p>		<p>1 : Mbr interne</p> <p>2 : Mbr externe</p> <p>3 : Crête</p> <p>4 : Matrice</p>

Afin de mieux comprendre le rôle des différents compartiments, on réalise une expérience sur une suspension de mitochondries.

### c) Expérience.

On réalise une expérience sur une suspension de mitochondries, obtenue par centrifugation d'un broyat cellulaire, et placée dans une enceinte de réaction, dans un milieu approprié et bien oxygéné,

o. On proposera donc des résultats obtenus ainsi :



- L'injection de glucose à t<sub>0</sub>, n'induit aucune variation de la [O<sub>2</sub>] ; il n'est pas le substrat des réactions consommant l'O<sub>2</sub>.
- Les injections de pyruvate et succinate induisent une diminution de l'O<sub>2</sub> ; ce sont des substrats utilisés dans les mitochondries.

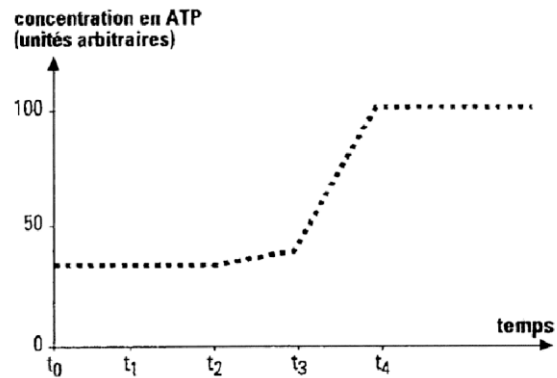
La respiration, oxyde non pas le glucose mais des substrats qui résultent de premières réactions qui se déroulent dans le cytoplasme. Une première étape se déroule donc dans le cytoplasme, elle semble viser à dégrader le glucose (glycolyse)

- L'injection d'inhibiteurs enzymatiques se traduit par un arrêt de la consommation d'O<sub>2</sub> ; il existe dans la membrane interne des mitochondries des enzymes qui catalysent les réactions de la respiration, à partir des substrats formés dans le cytoplasme.

Une deuxième étape se déroule donc dans la membrane interne des mitochondries et mobilise des enzymes.

Evolution de la concentration en ATP en fonction du temps dans une suspension de mitochondries, en présence de dioxygène

à  $t_0$  : ajout de saccharose  
 à  $t_1$  : ajout de glucose  
 à  $t_2$  : ajout de pyruvate  
 à  $t_3$  : ajout d'ADP +  $P_i^*$  + pyruvate  
 à  $t_4$  : ajout de cyanure (produit qui bloque l'activité enzymatique)  
 $P_i^*$  : phosphate inorganique



➤ La production d'ATP, via la respiration nécessite, du pyruvate (substrat), de l'ADP +  $P_i$  (ATP)

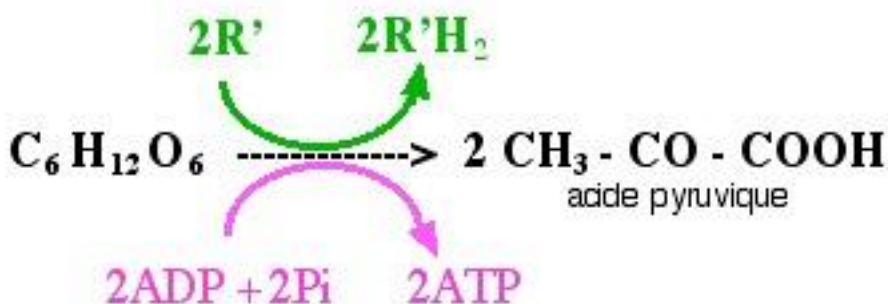
Les réactions de la respiration, se déroulant dans la membrane des crêtes mitochondriales, catalysées par des enzymes et utilisant un substrat provenant de réactions cytoplasmiques, produisent de l'ATP (énergie)

### Les étapes de la respiration cellulaire.



#### a) La glycolyse, dans le cytoplasme.

réaction observée dans le **cytoplasme** d'une cellule.



La dégradation des nutriments débute toujours **dans le cytoplasme** de la cellule par une **glycolyse** (=dégradation du glucose).

C'est une suite complexe de réactions qui dégradent une molécule de glucose (C6) en deux molécules d'acide pyruvique (C3):

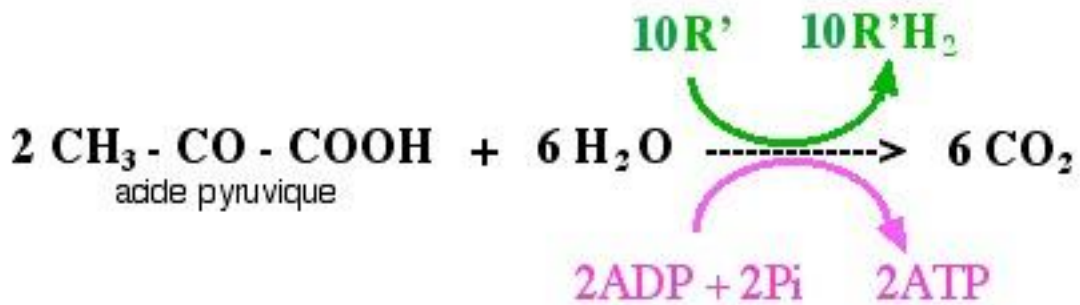
Quelques caractéristiques:

- C'est toujours un phénomène **anaérobie**, c'est-à-dire **qui ne consomme pas de dioxygène**.
- Elle comprend plusieurs réactions catalysées chacune par une enzyme spécifique et produisant une série de métabolites intermédiaires entre le produit initial, le glucose et le produit final, l'acide pyruvique (succinate ou pyruvate par exemple).
- La signification biochimique fondamentale est une **déshydrogénation**, correspondant à une **oxydo-réduction** qui nécessite un accepteur ou transporteur de protons et d'électrons symbolisé **R+**(état oxydé).

Animation : <http://www.edumedia-sciences.com/fr/a416-glycolyse>

#### b) Les réactions se poursuivent dans la matrice.

Doc 2 : réactions observées dans la **matrice** :



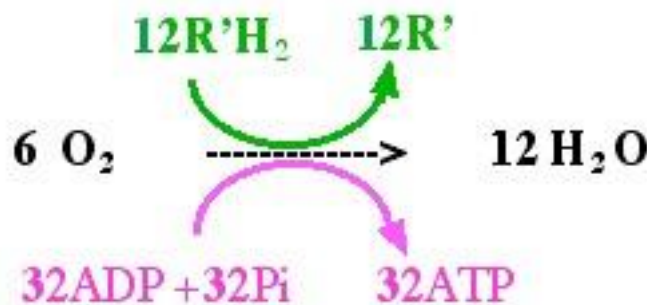
La dégradation des métabolites amorcée dans le cytoplasme, se poursuit dans les mitochondries : **dans la matrice**, l'acide pyruvique est totalement dégradé sous l'action d'enzymes (décarboxylases et déshydrogénases): du dioxyde de carbone est libéré, les transporteurs de protons et d'électrons sont réduits (**R'H<sub>2</sub>**) et de l'ATP est produit.

L'acide pyruvate est littéralement « broyé » au cours d'un cycle de réactions nommé « cycle de Krebs » au cours duquel des **carbones** sont « arrachés » : décarboxylations (CO<sub>2</sub>), ainsi que des **hydrogènes** : déshydrogénations (RH<sub>2</sub>)

Animation : <http://www.edumedia-sciences.com/fr/a415-cycle-de-krebs>

**c) ...puis dans les crêtes mitochondriales.**

Doc 3 : réactions observées dans la membrane des **crêtes mitochondriales** :



Au niveau de la membrane interne (**crêtes**) les molécules de transporteurs réduits (**RH<sub>2</sub>**) sont régénérées (**R+**) grâce à des molécules spécialisées (enzymes) qui constituent **la chaîne respiratoire** et assurent une série de réactions d'oxydo-réduction.

Le dioxygène constitue l'**accepteur final** de protons et d'électrons : lui-même réduit, il permet la formation de molécules d'eau. Les protons apportés par les transporteurs d'hydrogène sont transférés du stroma vers l'intérieur des crêtes (contre leur gradient de concentration), alors que les électrons sont transférés vers le stroma. De ce fait l'intérieur des crêtes devient acide (la concentration en protons a

Animation : <http://www.edumedia-sciences.com/fr/a417-chaîne-respiratoire>

Document 4 : expérience sur des **particules submitochondriales**.

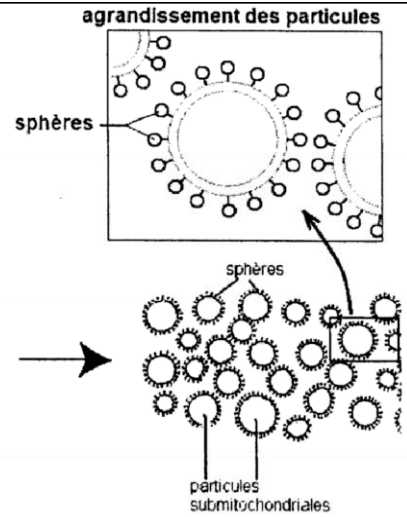
Les particules submitochondriales, petits sacs de 100 nm de diamètre, sont obtenues à partir de fragments retournés de membrane interne de mitochondries. Cette membrane est recouverte de **structures arrondies nommées sphères** qui ne sont plus en contact avec la matrice (= milieu intra-mitochondrial) mais avec un milieu expérimental. Il contient de l'O<sub>2</sub>, des composés réduits RH<sub>2</sub>, de l'ADP et du Pi (phosphate inorganique).



Mitochondrie



fragments de membrane interne



agrandissement des particules

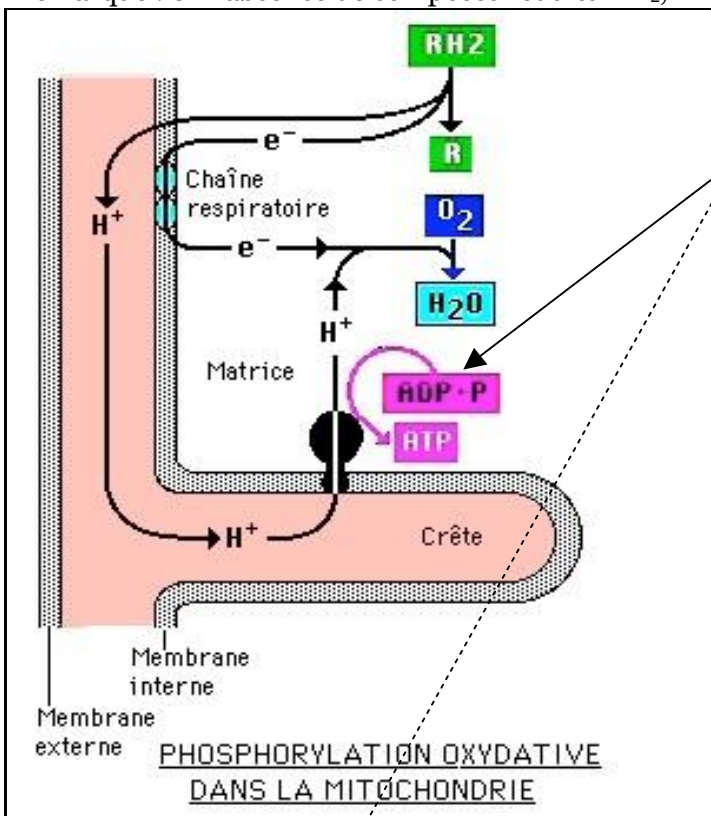
sphères

sphères

particules submitochondriales

Conditions	Résultats
Particules submitochondriales	Synthèse d'ATP et réoxydation des R'H <sub>2</sub> en R+
Particules submitochondriales sans les sphères.	Pas de synthèse d'ATP mais réoxydation des RH <sub>2</sub> en R+
Particules submitochondriales sans les sphères, mais ajout de sphères isolées dans le milieu	Synthèse d'ATP et réoxydation des RH <sub>2</sub> en R+

Remarque : en l'absence de composés réduits RH<sub>2</sub>, il n'y a pas de synthèse d'ATP.



La synthèse d'ATP nécessite la présence d'ADP + Pi, des sphères et de RH<sub>2</sub>.

Ces sphères, génératrices d'ATP sont des **ATP synthétases**, dont nous avons déjà vu le principe de fonctionnement dans les chloroplastes.

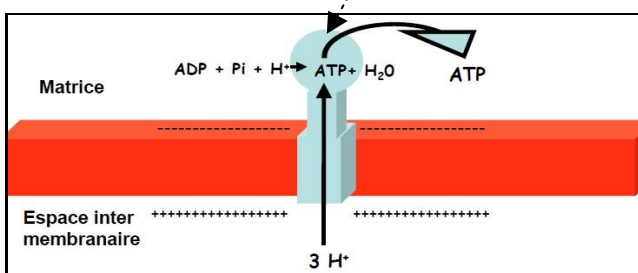
La différence de concentration de protons entre l'espace intermembranaire et le stroma est exploitée par une ATP synthétase qui synthétise de l'ATP chaque fois que des protons sont transférés de l'intérieur des crêtes vers le stroma : à peu près **32 ATP sont synthétisés**.

Dans le stroma, les électrons, les protons et le dioxygène se combinent pour former des molécules d'eau.

Cet ensemble de réaction = **chaîne respiratoire**.

Animation : choisir « biologie », « biologie cellulaire », « page 2 », « chaîne respiratoire » :

<http://www.biologieenflash.net/sommaire.html>

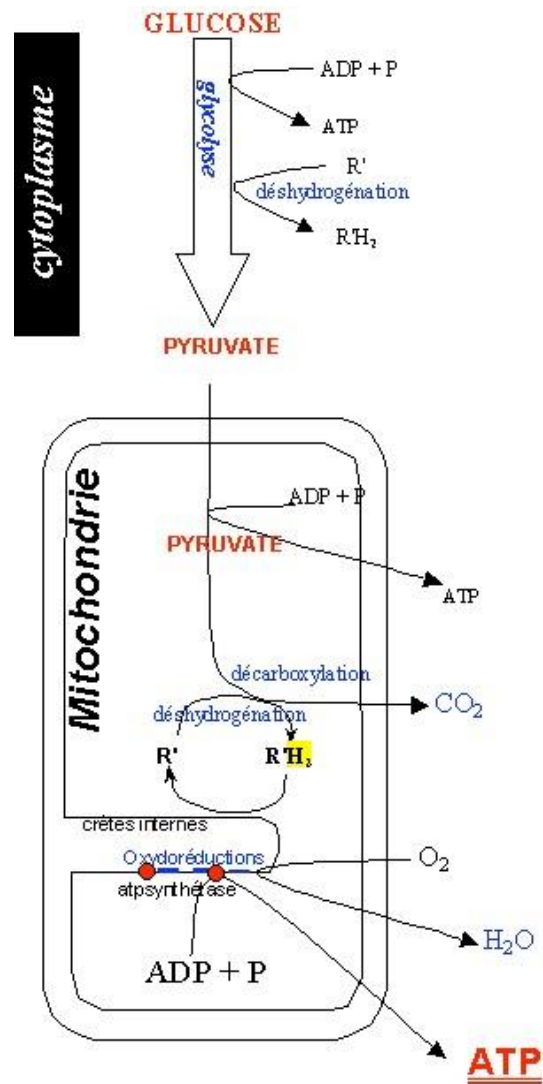


Animations : <http://pedagogie.ac-amiens.fr/svt/info/logiciels/animmetabo/respi.htm> <http://www.edumedia-sciences.com/fr/a414-la-respiration-cellulaire>

Tableau bilan :

	nom	localisation	Substrat(s) utilisé(s)	Produit(s) formé(s)	Nombre d'ATP formés
Première étape	glycolyse	hyaloplasme	1 glucose R'	2 pyruvates R'H <sub>2</sub>	2
Deuxième étape	Décarboxylations oxydatives	Matrice de la mitochondrie	2 pyruvates R'	6 CO <sub>2</sub> R'H <sub>2</sub>	2
Troisième étape	Chaîne respiratoire	Crêtes mitochondriales	R'H <sub>2</sub> 6 O <sub>2</sub>	R' 12 H <sub>2</sub> O	32

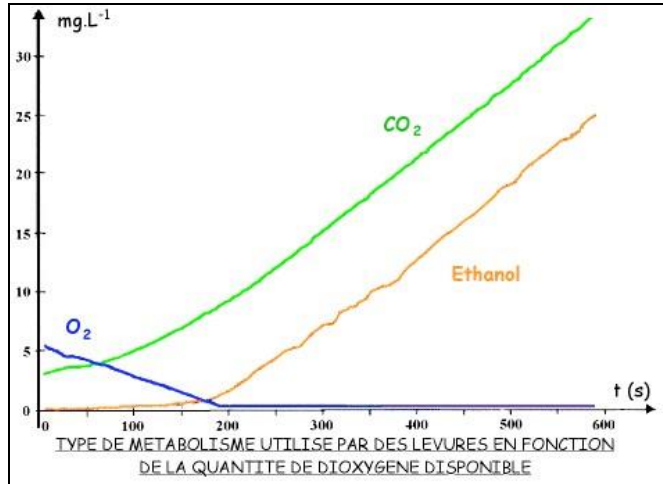
BILAN : schéma :



## Dans un milieu ANAEROBIE

Exercice type Bac : <http://www.didac-tic.fr/bac/ts07metropole/doc3s.htm>

Une vérification moderne : résultat « EXAO » :



- Moins il y a d'O<sub>2</sub>, plus le rendement diminue, et plus de l'éthanol apparaît dans le milieu

- Sachant que l'éthanol est une molécule carbonée (**CH<sub>3</sub> - CH<sub>2</sub> - OH**) (**C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH**) qui représente encore **1 360 kJ par mole d'éthanol** (énergie potentielle), on peut dire que dans le cytoplasme des cellules la glycolyse se poursuit par une réaction qui produit une molécule contenant encore de l'énergie non extraite : **l'éthanol**. Il s'agit donc d'une dégradation incomplète du glucose, (contrairement à la respiration qui produit CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O, qui ne contiennent plus d'énergie = extraction complète).

**Il s'agit de la fermentation alcoolique.**

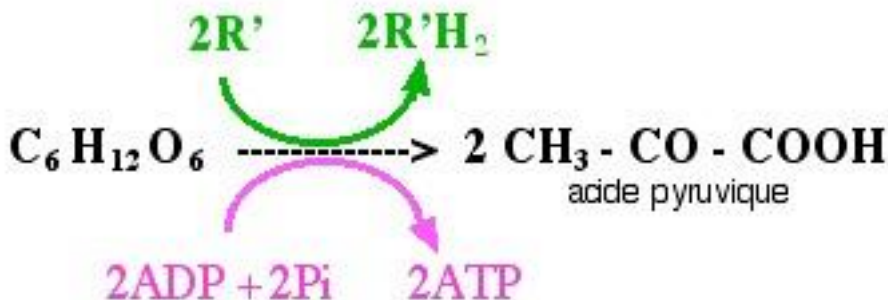
- Etude expérimentale de la fermentation alcoolique

On peut écrire l'équation bilan de la fermentation alcoolique

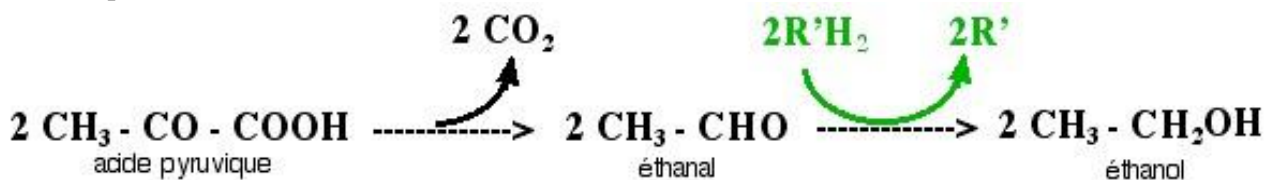


### ▪ LES ETAPES DE LA FERMENTATION

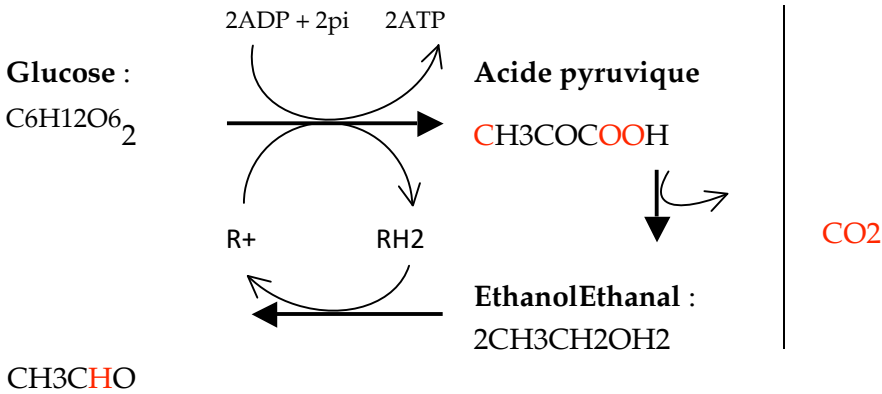
1. La fermentation débute dans le cytoplasme par la glycolyse:



2. Dans le cas de la fermentation alcoolique, l'acide pyruvique est d'abord décarboxylé (perte de CO<sub>2</sub>), le métabolite qui en résulte (l'éthanal) est ensuite réduit en éthanol avec régénération du transporteur:

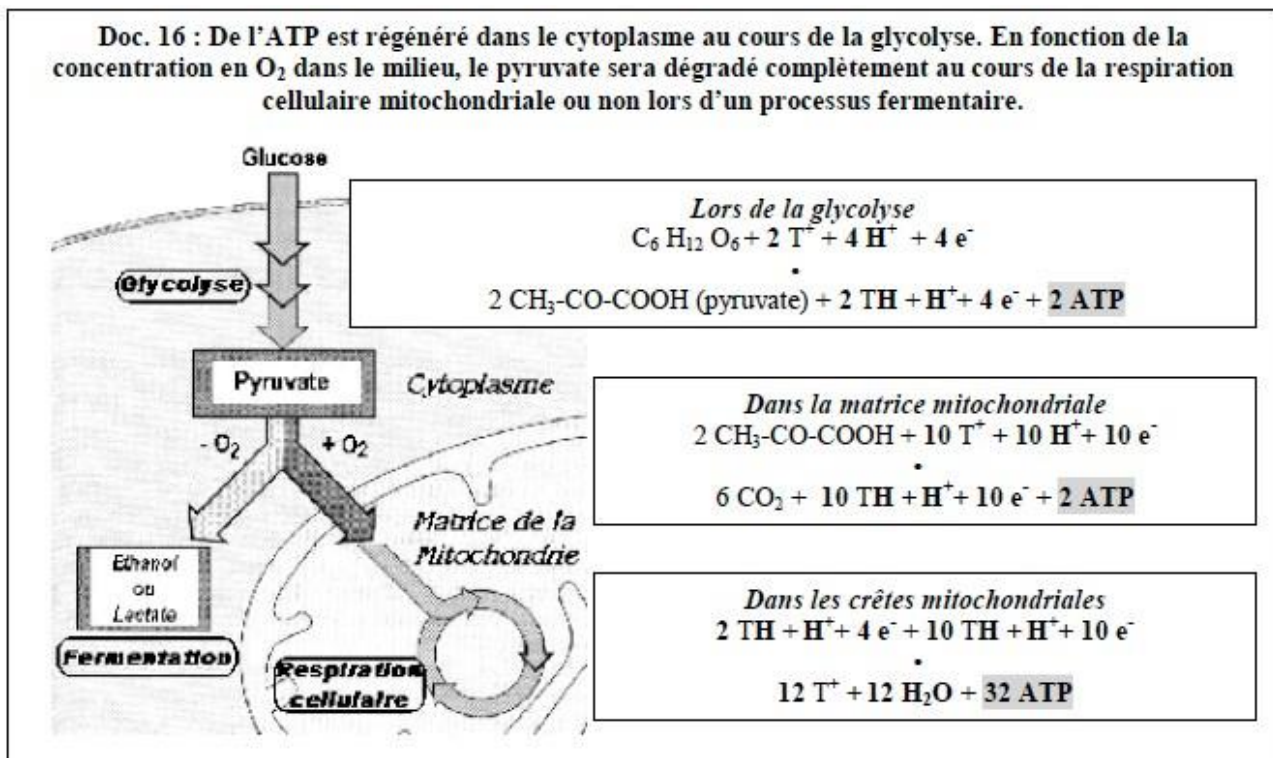


Ces réactions d'oxydo-réduction ne libèrent pas une quantité suffisante d'énergie pour permettre la synthèse d'ATP. **Donc seule la glycolyse produit de l'ATP lors des fermentations.**



▪ COMPARAISON RESPIRATION - FERMENTATION ALCOOLIQUE

RESPIRATION	METABOLISME	FERMENTATION ALCOOLIQUE
Glucose $C_6H_{12}O_6$	Substrat	Glucose $C_6H_{12}O_6$
2840 kJ par mole de glucose	Energie potentielle initiale	2 840 kJ par mole de glucose
Aérobies ( $O_2$ )	Conditions	Anaérobies
$6 CO_2 + 6 H_2O$	Produits	$2 CO_2 + 2 CH_3 - CH_2OH$
0 kJ	Energie potentielle finale	1 360 kJ par mole d'éthanol
<b>36 moles par mole de glucose</b>	ATP produit	<b>2 moles par mole de glucose</b>





L'absence de dioxygène stoppe le fonctionnement des mitochondries, le dioxygène étant l'accepteur final des H<sup>+</sup> et e<sup>-</sup>. Les molécules en C3 (acide pyruvique) qui s'accumulent dans le cytosol sont alors transformées par les enzymes de la fermentation que la cellule se met à synthétiser.

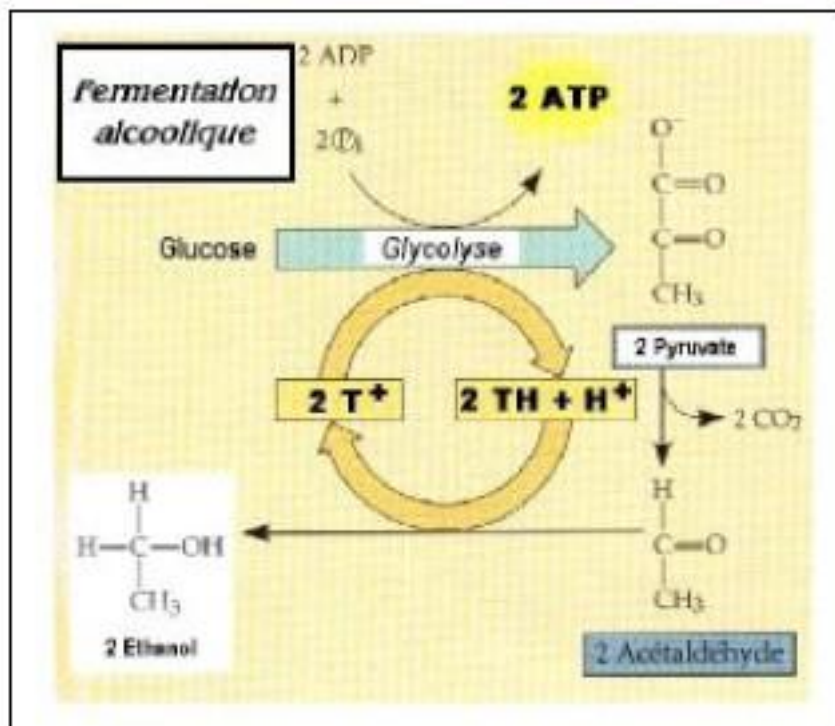
Selon l'information génétique de la cellule, les enzymes de la fermentation synthétisées diffèrent:

- les levures transforment les molécules en C3 en **éthanol + CO<sub>2</sub>**
- les cellules musculaires transforment ces mêmes molécules en C3 en **acide lactique**.

Les transporteurs d'hydrogène sont régénérés par la formation d'éthanol ou d'acide lactique.

Par contraste avec l'oxydation complète du substrat au cours de la respiration, grâce aux mitochondries, **une oxydation incomplète** est possible par fermentation. Elle produit un déchet organique, reste du substrat réduit, non totalement oxydé lors du processus dégradatif.

Cette fermentation permet un renouvellement peu efficace mais réel des intermédiaires métaboliques, ce qui autorise dans le cas de la fermentation alcoolique, une vie sans oxygène.



NB : (Hors programme, seule la fermentation alcoolique est à connaître) :

**La fermentation dégrade une biomolécule et forme une nouvelle molécule organique.**

Certaines fermentations

- Consomment du dioxygène, ce sont des **fermentations aérobies**:

o **La fermentation acétique** est la plus connue. Des bactéries aérobies transforment le vin en vinaigre. De l'éthanol est détruit, de l'acide éthanóique (CH<sub>3</sub>-COOH) apparaît.

- Ne consomment pas de dioxygène, ce sont des **fermentations anaérobies qui autorisent donc une vie sans dioxygène** :

o **La fermentation alcoolique** est réalisée par des levures. Les levures possèdent l'équipement enzymatique capable d'hydrolyser le saccharose et le maltose pour former du glucose et du fructose. Le plus fréquemment du glucose (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) est détruit et de l'éthanol (CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-OH) est produit. Les applications commerciales de la fermentation alcoolique sont connues depuis l'antiquité: c'est ainsi que le pain, le vin et la bière sont fabriqués.

o **La fermentation lactique** est réalisée par certains champignons et bactéries (utilisés pour la fabrication du yaourt ou du fromage) et par les cellules musculaires. Du glucose est détruit et de l'acide lactique (CH<sub>3</sub>-CHOH-COOH) est produit.

*Le cours suivant est un bilan avec l'exemple des cellules musculaires capables de récupérer de l'énergie grâce à 3 « métabolismes ».....*