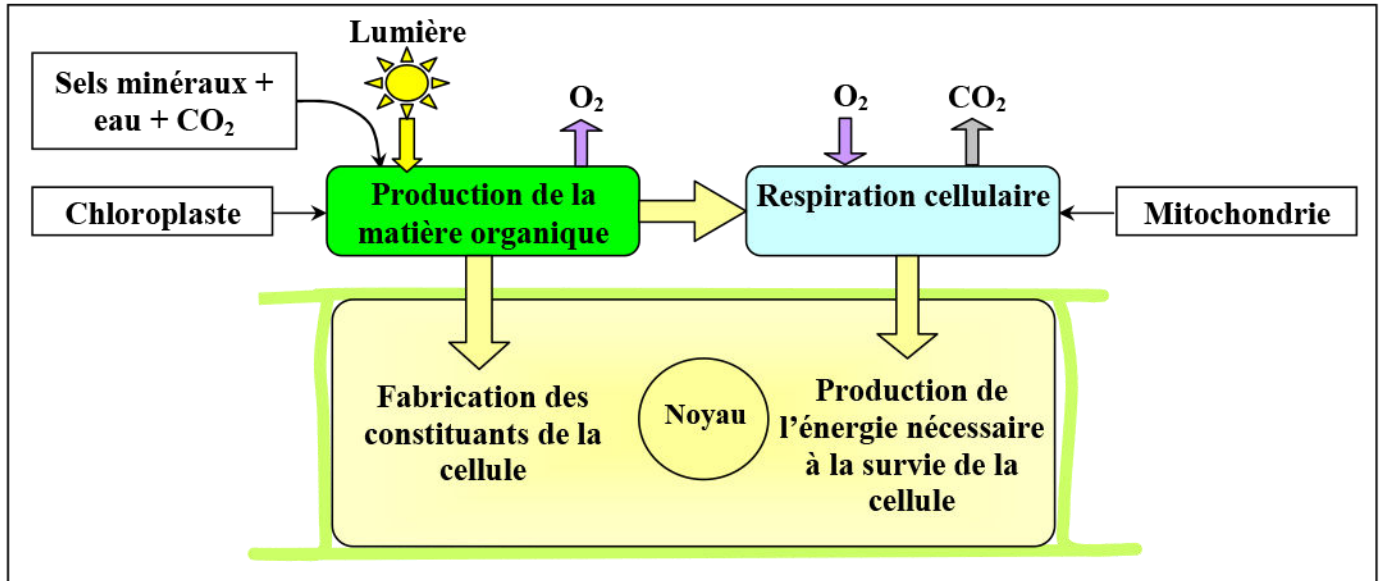


Introduction:



★ Les plantes chlorophylliennes sont des êtres vivants autotrophes. Elles produisent leur matière organique (Les glucides, les lipides, les protides) en utilisant l'eau, les sels minéraux, le  $\text{CO}_2$  atmosphérique et l'énergie lumineuse (phototrophes). C'est la photosynthèse qui se présente deux phases essentielles :

- ✓ La phase claire : Dépendante de la lumière. Elle permet la transformation de l'énergie lumineuse (photons) en énergie chimique (ATP):



- ✓ La phase sombre : Indépendante de la lumière. Elle permet la conversion du dioxyde de carbone et de l'eau en glucides, en utilisant l'énergie potentielle chimique de l'ATP.

★ Les êtres vivants hétérotrophes, doivent se nourrir de matière organique pour en extraire leur énergie chimique (ATP) et produire leur propre matière organique.

- **Quels sont les phénomènes cellulaires permettant la libération de l'énergie chimique emmagasinée dans la matière organique?**
- **Comment intervient l'énergie chimique dans les activités cellulaires qui nécessite de l'énergie?**

### Introduction:

La cellule doit trouver l'énergie nécessaire à son fonctionnement : celle-ci est principalement obtenue par dégradation de molécules organiques, c'est le catabolisme. Elle doit également fabriquer les molécules de base (glucides, lipides et protides) : ce sont les réactions d'anabolisme. L'ensemble constitue le métabolisme cellulaire.

- Quelle sont les réactions responsables de la libération de l'énergie chimique emmagasinée dans la matière organique ?
- Quelles sont les organites intervenant dans les phénomènes de libération de cette énergie chimique ?

### I – Mise en évidence des phénomènes permettant la libération de l'énergie chimique emmagasinée dans la matière organique

#### ① Données expérimentales :

##### a) Expérience 1: (Voir document 1)

#### Document 1 : Libération de l'énergie chimique emmagasinée dans la matière organique dans un milieu aérobie (En présence d'oxygène):

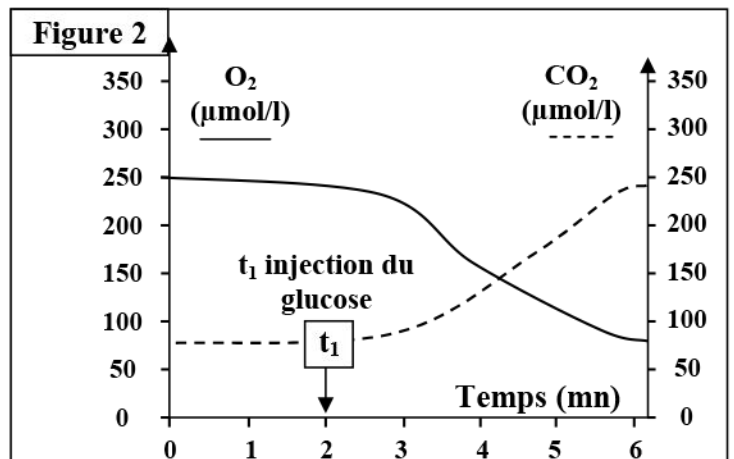
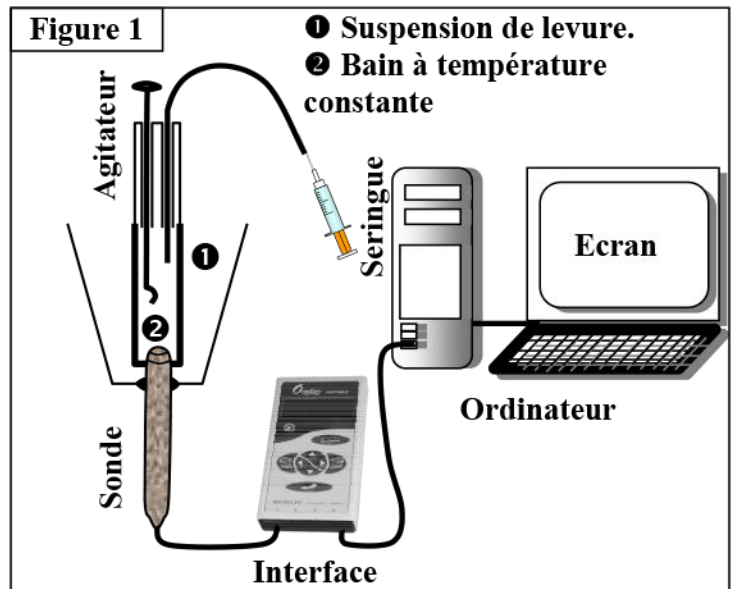
Dans le but de rechercher les caractéristiques des phénomènes métaboliques permettant la libération de l'énergie emmagasinée dans la matière organique, on propose l'étude des données suivantes:

##### Protocole expérimental:

On prépare une suspension de levure, de concentration connue (10g/L). La suspension est constamment aérée avec un bulleur. On place 5 ml de la suspension dans le bioréacteur du dispositif EXAO (Figure1). On relie la sonde à dioxygène ( $O_2$ ) et à dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) par une interface à un ordinateur. En suite on observe sur l'écran de l'ordinateur l'évolution de la teneur en  $O_2$  et en  $CO_2$  dans le milieu (Figure 2).

A  $t_1$  on injecte dans le bioréacteur 0.1 ml d'une solution de glucose à une concentration de 5%.

- 1) Décrire les résultats représentés par les courbes de la figure 2.
- 2) Comment expliquez-vous ces résultats?
- 3) montrer les caractéristiques mises en évidence par cette expérience.



- 1) Avant d'ajouter le glucose à la suspension de levure, la concentration d'oxygène et de dioxyde de carbone reste stable.  
Après injection de la solution glucosée à la suspension de levure, la concentration de dioxygène diminue jusqu'à ce qu'elle se stabilise à  $80 \mu\text{mol/L}$ , et la concentration de dioxyde de carbone augmente jusqu'à ce qu'elle se stabilise à  $235 \mu\text{mol/L}$ .
- 2) En présence de dioxygène dans le milieu, les levures absorbent du dioxygène et rejettent du dioxyde de carbone.
- 3) Les changements observés dans la concentration de l'oxygène et du dioxyde de carbone immédiatement après l'addition du glucose à la suspension de levure, sont interprétés par le fait que les cellules de levure consomment de l'oxygène pour la dégradation du métabolite glucose, avec la libération de dioxyde de carbone. Ces échanges gazeux caractérisent le métabolisme de la respiration. On parle de la respiration cellulaire.

### b) Expérience 2: (Voir document 2)

#### Document 2: Libération de l'énergie chimique emmagasinée dans la matière organique dans un milieu anaérobie (En absence d'oxygène):

Dans le but de voir comment évoluent les populations de levures dans un milieu dépourvu de dioxygène, on effectue l'expérience suivante:

On prépare une suspension de levure dans l'eau ( $10\text{g/L}$ ) que l'on maintient à l'abri de l'air dans un flacon à col étroit contenant une solution glucosée (Figure 1).

Après un certain temps, on peut mettre en évidence le dégagement de  $\text{CO}_2$  que l'on caractérise à l'aide d'eau de chaux, et la disparition du glucose que l'on peut caractériser à l'aide de bandelettes réactives utilisées pour mesurer la glycémie.

- 1) Analysez les résultats obtenus au cours de cette expérience.

On place ensuite 5 ml de la suspension dans le bioréacteur du dispositif EXAO, pour suivre la variation au cours du temps de la concentration d'oxygène ( $\text{O}_2$ ), de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et d'alcool éthylique (éthanol:  $\text{CH}_3 - \text{CH}_2\text{OH}$ ). La figure 2 représente les résultats obtenus.

- 2) Interprétez ces résultats puis donnez une conclusion.

Le lait frais contient plusieurs espèces de bactéries lactiques qui transforment le lactose  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$  dans un milieu anaérobie, en acide lactique  $\text{CH}_3\text{-CHOH-COOH}$ . On parle de la fermentation lactique.

- 3) En se basant sur tout les données de ce document, dégager les caractéristiques de la fermentation comme voie de dégradation des métabolites.

Figure 1

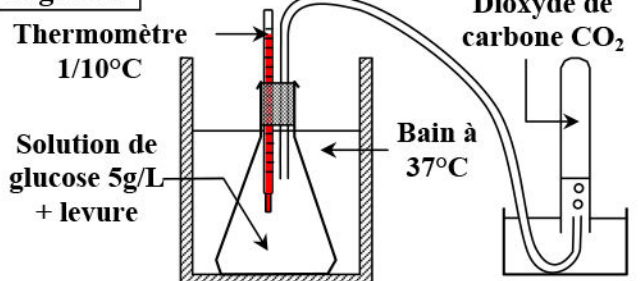
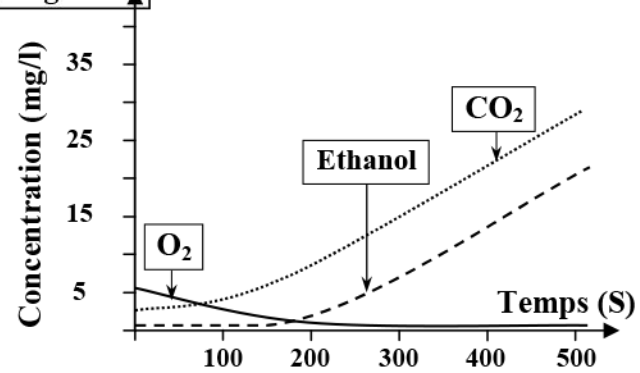


Figure 2



- 1) Peu de temps après le début de l'expérience, on constate une disparition progressive du glucose. Cela veut dire que ce métabolite est consommé par la levure, en absence de dioxygène, mais en dégageant le dioxyde de carbone.



- 2) A partir des données de la figure 2, on constate que la concentration en dioxygène diminue et devient nulle très rapidement. Au cours de ce bref moment, la concentration de dioxyde de carbone augmente légèrement.

Cette phase indique que les cellules de levure utilisent le métabolisme de la respiration pour dégrader le glucose.

A partir du moment où il n'y a plus de dioxygène dans le milieu (200S), la concentration de dioxyde de carbone augmente rapidement, avec l'augmentation de l'alcool éthylique (Ethanol). Cette phase indique que les cellules de levure utilisent le métabolisme de la fermentation alcoolique pour dégrader le glucose.

Nous concluons qu'en absence de dioxygène, le glucose peut être dégradé selon une voie anaérobie, c'est la fermentation.

- 3) Pour couvrir ses besoins énergétiques, Les cellules utilisent l'énergie potentielle libérée à la suite de la dégradation des métabolites énergétique comme le glucose. Cette dégradation se fait selon Deux types de réactions chimiques: La respiration cellulaire et la fermentation.

## ② Bilan :

Deux voies métaboliques utilisent le glucose :

- ✓ La respiration cellulaire: Dans un milieu aérobie le métabolite (glucose) est dégradé complètement en  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ , avec production d'une quantité importante d'énergie sous forme d'ATP.

Le bilan des transformations chimiques au cours de la respiration s'écrit :

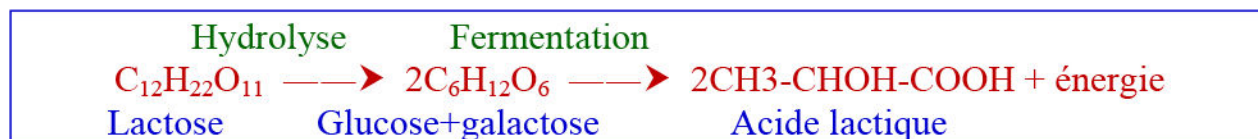


- ✓ La voie de la fermentation : Dans un milieu anaérobie le métabolite (glucose) est dégradé partiellement, donnant des molécules organiques contenant encore une énergie potentielle, avec production d'une faible quantité d'énergie. On détermine deux types de fermentation :

⇒ La fermentation alcoolique dont la réaction chimique globale est la suivante :



⇒ La fermentation lactique : la transformation du lactose du lait en acide lactique selon les réactions suivantes :



## II – La glycolyse, étape commune entre respiration et fermentation

### ① Localisation de la respiration et la fermentation dans la cellule:

a) Données expérimentales : (Voir document 3)

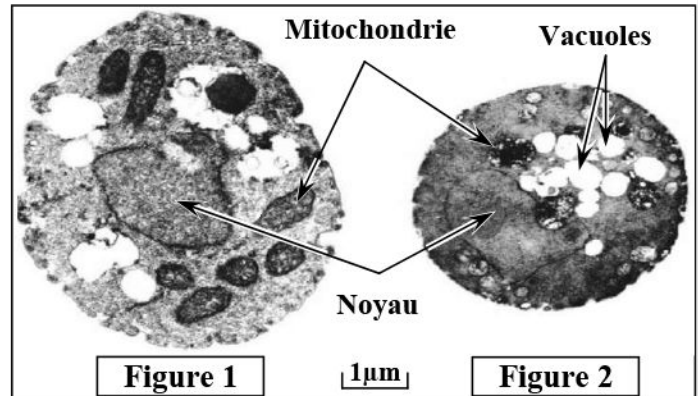
### Document 3: Localisation de la respiration et la fermentation dans la cellule.

On souhaite voir comment évoluent les populations de levures et certains paramètres du milieu en aérobiose et en anaérobiose. Pour cela, des levures ont été placées dans un milieu de culture contenant le glucose en présence ou en absence d'oxygène. Le tableau ci-dessous représente les conditions et les résultats de l'expérience :

1) Indiquez les informations que l'on peut tirer de ces résultats.		Poids de levures formées (g)	Glucose (g)		Test à l'alcool	
			Initial	Consommé	Début	Fin
	Aérobic	1.970	150	150	-	-
	Anaérobic	0.255	150	45	-	+

On observe des cellules de levure cultivées sur un milieu nutritif riche en O<sub>2</sub> : milieu aérobic, et sur un milieu nutritif dépourvu d'O<sub>2</sub> : milieu anaérobic. Les schémas ci-dessous représentent les électronographies de cette observation.

- 2) Comparez les deux cellules et déduisez la relation entre le type de métabolisme et la présence de mitochondries.



#### b) Exploitation des données:

- 1) En milieu aérobic, la multiplication cellulaire (poids de levures) ainsi que la consommation du glucose sont beaucoup plus importantes qu'en milieu anaérobic. Sachant que la multiplication cellulaire nécessite de l'énergie, On pourrait admettre que la production d'énergie (à partir de la dégradation du glucose) est moindre en mode « fermentation » qu'en mode « respiration ». De plus, la dégradation du glucose en anaérobiose est incomplète et il se forme de l'alcool éthylique ou éthanol.
- 2) L'observation au microscope électronique montre que les deux levures présentent un noyau et des vacuoles. Mais, seule la levure ayant séjourné dans des conditions aérobies révèle de nombreuses mitochondries bien développées dans le cytoplasme. Par contre, celle ayant séjourné dans des conditions anaérobies montre des mitochondries peu abondantes et de petite taille.

La respiration et la présence de mitochondries sont liées. Le mode fermentation ne nécessite pas de mitochondries. Ces derniers sont des organites cellulaires impliqués dans la respiration cellulaire.

#### c) Bilan:

Deux types de réactions chimiques permettent d'extraire l'énergie responsable du fonctionnement cellulaire:

- ✓ **La respiration cellulaire:** c'est une oxydation complète de matière organique (glucose) en milieu aérobic, elle nécessite l'intervention des mitochondries.
- ✓ **La fermentation :** c'est une oxydation incomplète (partielle) de matière organique en milieu anaérobic, elle se déroule dans l'hyaloplasme.

Qu'il s'agisse de la respiration ou de la fermentation, la dégradation des métabolites débute dans le hyaloplasme de la cellule par la glycolyse, qui est un processus qui ne consomme pas de dioxygène.

## ② Les étapes de la glycolyse:

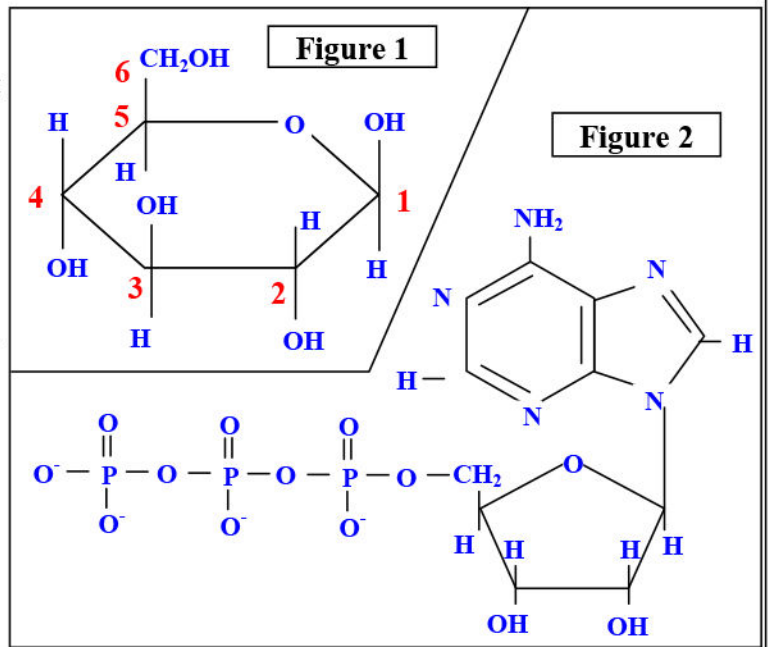
### a) Structure moléculaire du glucose et de l'ATP: (Voir document 4)

#### Document 4: Structure moléculaire du glucose et de l'ATP.

**Figure 1:** Le glucose  $C_6H_{12}O_6$ , c'est un glucide simple ou monosaccharide mais il est aussi un constituant de disaccharides (Le saccharose) et de polysaccharides (Le glycogène). Le glucose possède des isomères comme le fructose et le mannose.

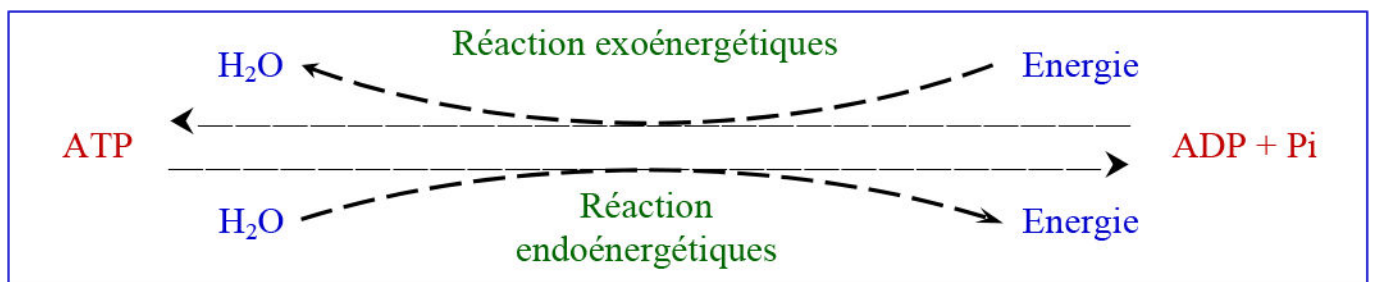
**Figure 2 :** ATP, adénosine triphosphate est une molécule constituée d'adénine (base azotée) liée à un ribose (sucre) qui lui attaché à trois groupements phosphates.

L'ATP fournit l'énergie nécessaire aux réactions chimiques du métabolisme Afin de libérer cette énergie, la molécule d'ATP est clivée, par hydrolyse, en adénosine diphosphate (ADP) et en phosphate.



Les cellules utilisent des métabolites énergétiques variés comme les glucides, les lipides et les acides aminés. Cependant, le glucose représente le métabolite énergétique essentiel de la cellule.

L'ATP joue le rôle d'intermédiaire énergétique entre les réactions exoénergétiques et les réactions endoénergétiques.



**Réactions exoénergétiques :** Réactions productrices (libératrices) de l'énergie.

**Réactions endoénergétiques :** Réactions consommatrices de l'énergie.

### b) Les étapes de la glycolyse: (Voir document 5)

★ La glycolyse est une série de réactions chimiques, qui s'effectuent dans le hyaloplasme, catalysées par des enzymes spécifiques et qui ne consomme pas de dioxygène.

★ La glycolyse comporte globalement trois étapes essentielles:



## Document 5: Les étapes de la glycolyse:

L'utilisation du glucose marqué montre qu'après sa pénétration dans le hyaloplasme d'une cellule, il peut être:

- ⇒ Soit stocké sous forme de macromolécules (Glycogène, amidon).
- ⇒ Soit dégradé en acide pyruvique au cours d'une série de réactions appelée glycolyse, qui aboutissent à la synthèse de deux molécules d'acide pyruvique.

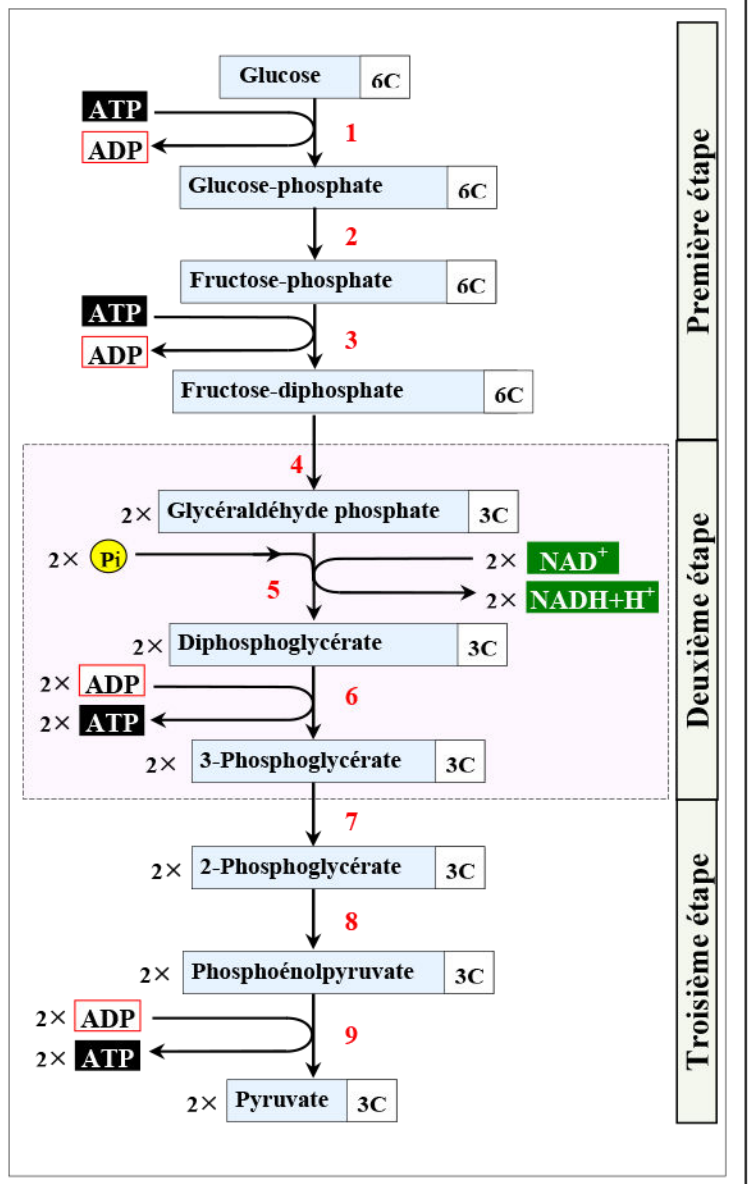
La glycolyse permet une production d'ATP en absence de dioxygène.

Le document ci-contre montre les étapes de la glycolyse.

A partir de ces données, résumez ce qui se passe au cours de la glycolyse et déduisez en quoi consiste le bilan chimique et le bilan énergétique de la glycolyse.

### Enzymes impliquées

1. Hexokinase
2. Phosphoglucosomérase
3. Phosphofructokinase
4. Aldonase
5. Glycéraldéhyde-phosphate déshydrogénase
6. Phosphoglycérate kinase
7. Phosphoglycérate mutase
8. Énolase
9. Pyruvate kinase



### ⇒ Etape 1 : Formation du fructose diphosphate.

Le glucose fixe un groupement phosphate issu de l'ATP, et se transforme en Glucose-phosphate (C<sub>6</sub>P). Ce dernier fixe un groupement Phosphate issu d'un deuxième ATP et se transforme en fructose diphosphate (PC<sub>6</sub>P).

### ⇒ Etape 2 : Formation de l'acide glycérique diphosphate.

Le fructose diphosphate (PC<sub>6</sub>P) se scinde en deux molécules de glycéraldéhyde phosphate (2C<sub>3</sub>P). Chacune des deux molécules (C<sub>3</sub>P) est oxydée grâce à une déshydrogénation, ce qui permet la réduction d'un transporteur d'hydrogène : NAD<sup>+</sup> (Nicotinamide Adénine Dinucléotide) qui passe de la forme oxydée (NAD<sup>+</sup>) à la forme réduite (NADH+H<sup>+</sup>) :



Cette réaction d'oxydoréduction est couplée à une phosphorylation des deux molécules de glycéraldéhydes phosphate (2C<sub>3</sub>P) pour donner deux molécules de diphosphoglycérates (2PC<sub>3</sub>P).

### ⇒ Etape 3 : Formation de l'acide pyruvique et synthèse de l'ATP.

Chaque molécule de diphosphoglycérates (PC<sub>3</sub>P) libère ses deux groupements phosphates qui se lient à deux ADP pour former 4 ATP et deux molécules d'acide pyruvique (pyruvate).

### c) Bilan de la glycolyse:

A la fin de la glycolyse, une molécule de glucose est dégradée en deux molécules d'acide pyruvique. La réaction fondamentale de la glycolyse est une déshydrogénation liée à la présence d'un transporteur d'hydrogène ( $\text{NAD}^+$ ).

L'équation globale de la glycolyse est la suivante:



**Remarque:** Cette oxydation est incomplète : le pyruvate contient encore de l'énergie potentielle.

### III – La respiration cellulaire et le rôle des mitochondries

#### ① Rôle des mitochondries dans la respiration cellulaire:

##### a) Mise en évidence du rôle des mitochondries : (Voir document 6)

#### Document 6: Mise en évidence du rôle des mitochondries.

**Protocole expérimentale:** on soumet des cellules de foie à un broyage mécanique modéré dans une solution à pH=7.4 à une température de 4°C afin de libérer les constituants de la cellule sans trop les léser. Le broyat obtenu est soumis à une centrifugation à très grande vitesse, ce qui permet de séparer une fraction riche en mitochondries du reste des constituants cytoplasmiques.

On place dans l'enceinte du bioréacteur du dispositif de l'EXAO une suspension de mitochondries, puis on suit la variation de la teneur en dioxygène dans ce milieu.

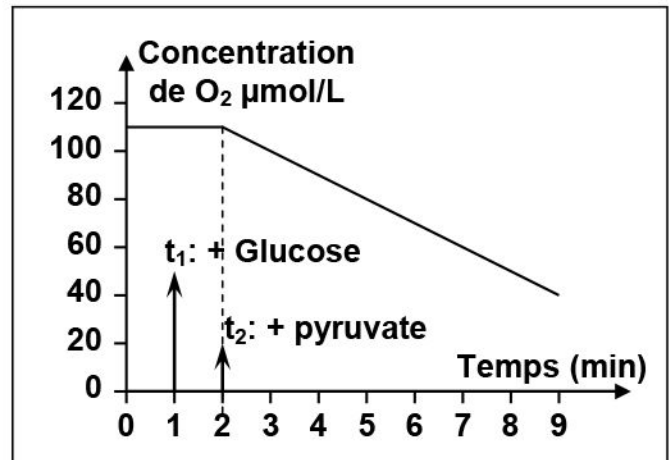
Au temps  $t_1$ , on ajoute une petite quantité de glucose.

Au temps  $t_2$ , on ajoute l'acide pyruvique.

La figure ci-contre représente les résultats obtenus.

Décrire les variations de la teneur en dioxygène dans le milieu.

Que peut-on déduire à propos du rôle des mitochondries dans la respiration cellulaire.



On constate que la concentration du dioxygène reste constante avant et après l'ajout du glucose, par contre l'ajout de l'acide pyruvique provoque une diminution de la concentration de dioxygène dans le milieu.

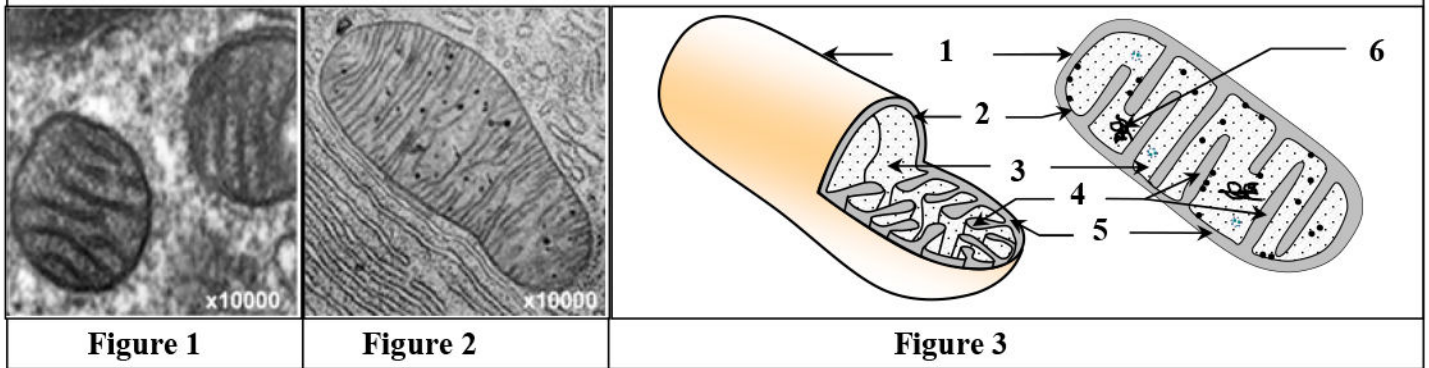
La modification de la quantité d'oxygène dans le milieu indique sa consommation par les mitochondries. C'est le phénomène de la respiration cellulaire, qui se déroule au niveau des mitochondries.

On déduit que les mitochondries utilisent l'acide pyruvique comme métabolite énergétique et non pas le glucose. Donc la respiration, amorcée par la glycolyse dans le hyaloplasme, se poursuit dans les mitochondries par la dégradation de l'acide pyruvique qui subit une série de réactions biochimiques aérobie, appelés oxydations respiratoires.

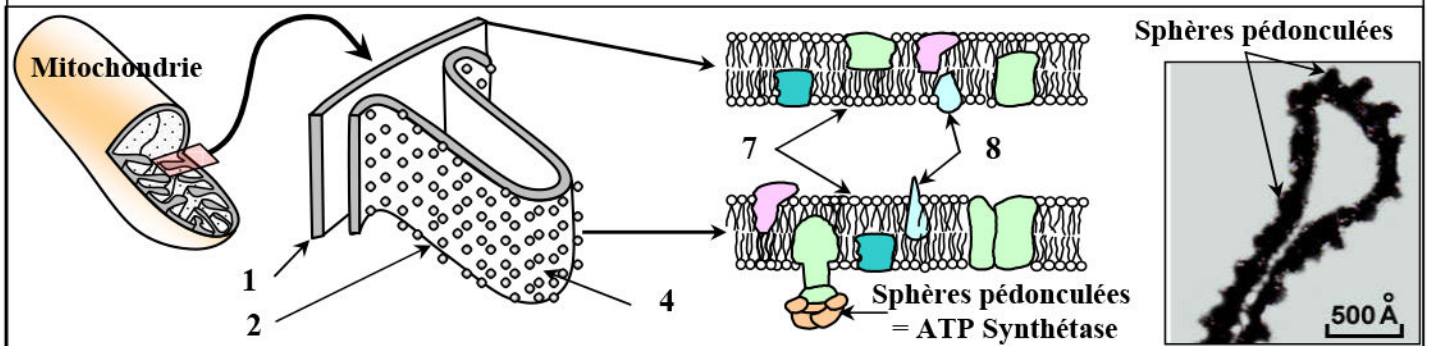


**Document 7: Ultrastructure et composition chimique de la mitochondrie**

Les figures ci-dessous présentent l'ultrastructure de la mitochondrie observée au microscope électronique (Fig. 1 + Fig. 2) et sa représentation tridimensionnelle (Fig. 3).



La figure ci-dessous présente une électronographie de la membrane interne de la mitochondrie, ainsi qu'un schéma explicatif de la structure moléculaire des membranes mitochondriales interne et externe.



- 1) En se basant sur ces données, décrire l'ultrastructure de la mitochondrie. Puis annotez le document en donnant le nom correspondant à chaque numéro.

Le tableau ci-contre présente les résultats de l'analyse biochimique des différentes structures mitochondriales.

- 2) Comparez la composition chimique des différentes structures mitochondriales puis indiquez la relation entre cette composition et son rôle dans la respiration cellulaire.

	Composition chimique	Equipement enzymatique
<b>Membrane externe</b>	38 % de lipides 62 % de protéines	Composition comparable à celle de la membrane cytoplasmique
<b>Membrane interne</b>	20 % de lipides 80 % de protéines	Nombreuses enzymes en particulier des ATPsynthase
<b>Matrice</b>	Absence de glucose Présence d'acide pyruvique et d'ATP	Déshydrogénases et carboxylases

- 1) Les mitochondries sont de petites organites cellulaires clos, délimités par deux membranes : une membrane externe séparant la mitochondrie du hyaloplasme et une membrane interne qui présente des replis appelés crêtes mitochondriales. Entre ces deux membranes se trouve l'espace intermembranaire. La membrane interne limite la matrice à l'intérieur.

Les membranes de la mitochondrie ont une structure voisine à celle des membranes cytoplasmiques des cellules d'eucaryotes : des phospholipides et des protéines intégrées.

La membrane interne porte des sphères pédonculées tournées vers la matrice.

1 = Membrane externe ; 2 = Membrane interne ; 3 = Matrice ; 4 = Crêtes ;  
5 = Espace intermembranaire ; 6 = ADN mitochondrial ; 7 = Phospholipides ;  
8 = Protéines intégrées.

2) ★ La matrice de la mitochondrie renferme un mélange très concentré de plusieurs enzymes, principalement des déshydrogénases et des carboxylases.

★ La mitochondrie est limitée par deux membranes de propriétés différentes:

- ✓ La membrane externe est pauvre en protéines et contient une protéine transmembranaire, la porine, qui permet le passage des ions et des métabolites hydrosolubles.
- ✓ La membrane interne est très riche en protéines, elle comporte 80% de protéines pour seulement 20% de lipides. On trouve des protéines de transport de molécules, des protéines de transport d'électrons, et des enzymes et complexes enzymatiques (en particulier l'ATP Synthase).

★ La présence de nombreuses enzymes suggère l'existence de réactions chimiques. Ce sont les oxydations respiratoires.

## ② Etapes de la respiration cellulaire au niveau des mitochondries:

a) Oxydation du pyruvate dans la matrice: (Voir document 8)

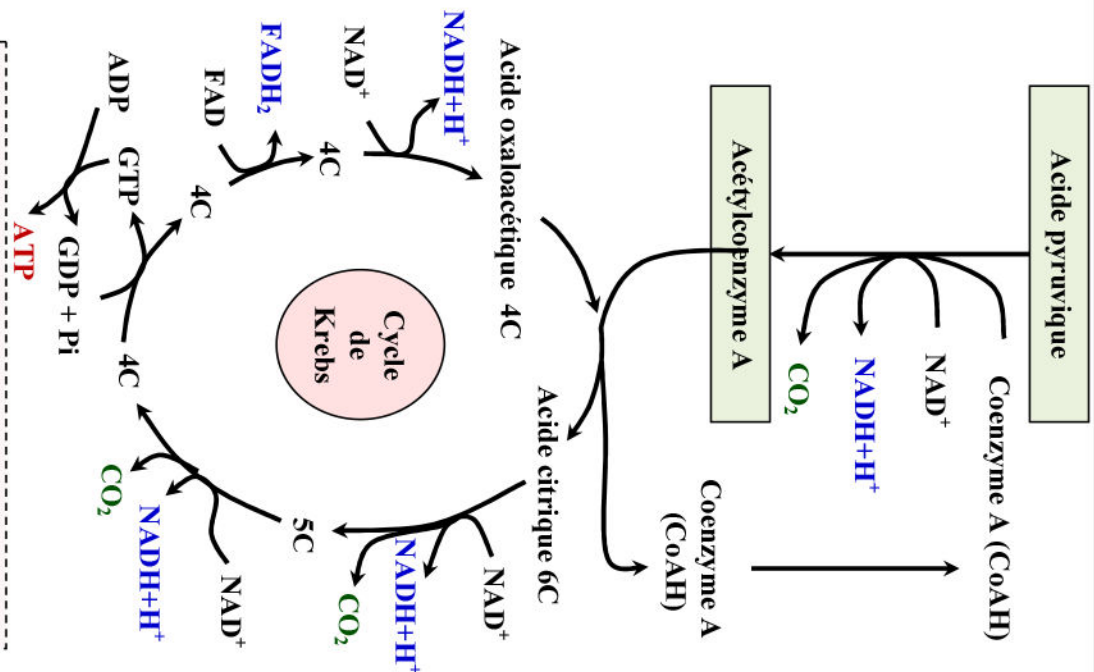
### Document 8: Oxydation du pyruvate dans la matrice.

- XC c'est le nombre d'atomes de carbone de chaque type de molécule.

- Chez les végétaux le GDP est remplacé par de l'ADP.

#### Noms des molécules

-  $\text{NAD}^+$ : nicotine adénine Dinucléotide  
- FAD: flavine adénine Dinucléotide  
- GDP: guanosine 5'-diphosphate  
- GTP: guanosine 5'-triphosphate



- 1) Décrivez l'ensemble de réactions chimiques que subit l'acide pyruvique dans la matrice mitochondriale.
- 2) Donnez l'équation bilan de cycle de Krebs
- 3) Quel est le bilan chimique de l'oxydation totale d'une molécule de pyruvate dans la matrice mitochondriale ?



- 1) Dans la matrice, le pyruvate issu de la glycolyse va subir un ensemble de réactions chimiques qu'on peut résumer en deux étapes:

⇒ **Étape 1:** l'acide pyruvique subit une décarboxylation au cours de laquelle il perd une molécule de  $\text{CO}_2$ , et une déshydrogénation au cours de laquelle il perd de l'hydrogène ( $\text{H}^+$ ) à l'origine de la réduction de  $\text{NAD}^+$  en  $\text{NADH}+\text{H}^+$ . Le résultat de cette dégradation est un groupement acétyle  $\text{CH}_3\text{CO}$  qui se fixe sur un composé appelé coenzyme A pour donner l'acétyle coenzyme A.

La réaction globale de cette étape est :



⇒ **Étape 2 :** l'acétyle coenzyme A se fixe sur un corps en 4C (Acide oxaloacétique) pour donner un corps en 6C (Acide citrique), et le coenzyme A est ainsi libéré pour s'associer à un nouveau radical Acétyl.

L'acide citrique subit une série de réactions de décarboxylation et de déshydrogénation constituant le cycle de Krebs. Le résultat de ces réactions est la libération de deux molécules de  $\text{CO}_2$ , la réduction de deux molécules  $\text{NAD}^+$  en  $\text{NADH}+\text{H}^+$ , et d'une molécule  $\text{FAD}$  en  $\text{FADH}_2$  :



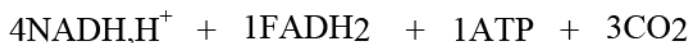
De plus il y a formation d'une molécule d'ATP à partir de l'oxydation de GTP.

En fin il y a régénération de l'acide oxaloacétique qui pourra ainsi à nouveau radical Acétyl.

- 2) Equation bilan de cycle de Krebs :



- 3) A partir de l'oxydation totale d'une molécule d'acide pyruvique dans la matrice, il y a eu production de:



La réaction globale de l'oxydation totale d'une molécule d'acide pyruvique dans la matrice:



Pour que les phénomènes précédents perdurent, les éléments réduits  $\text{NADH},\text{H}^+$  et  $\text{FADH}_2$  doivent être réoxydés en  $\text{NAD}^+$  et  $\text{FAD}$ , par la chaîne respiratoire mitochondriale (CRM).

## b) La réoxydation des transporteurs réduits :

★ **Notion de chaîne respiratoire :** (Voir document 9)

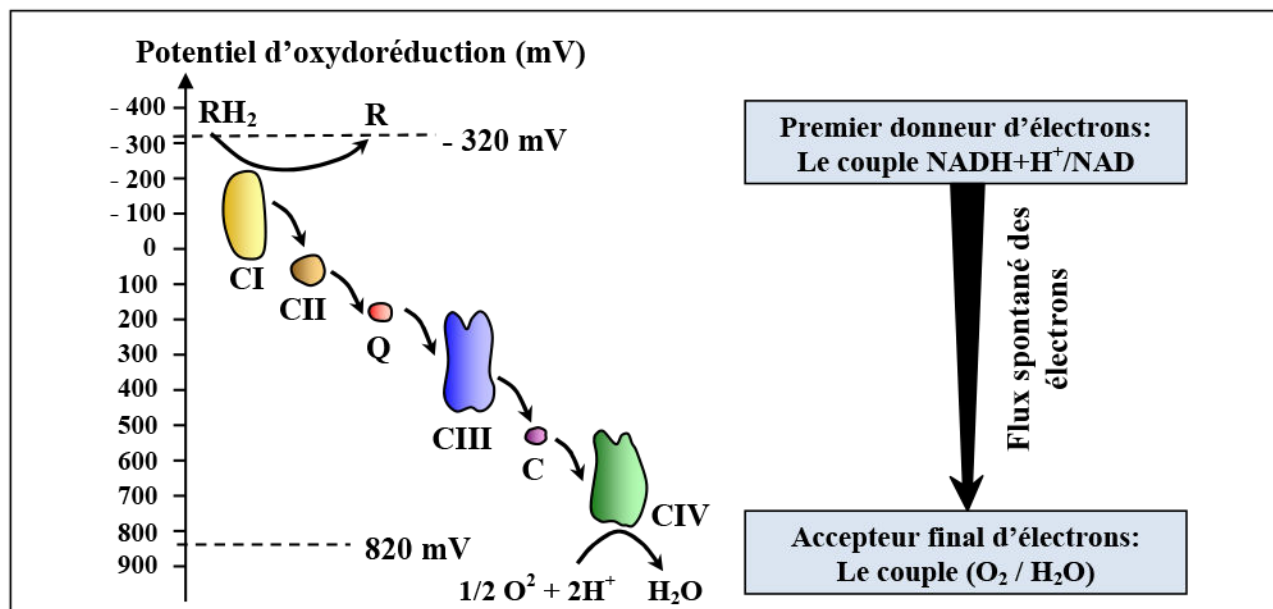


## Document 9: Notion de chaîne respiratoire.

Dans les systèmes biologiques, les réactions d'oxydoréduction impliquent le plus souvent des échanges de protons et d'électrons.

A un couple redox est associé un potentiel d'oxydoréduction mesuré en volts. La connaissance du potentiel d'oxydoréduction des couples redox impliqués dans une réaction d'oxydoréduction permet de prévoir si le transfert d'électrons se fera spontanément ou nécessite un apport d'énergie.

La mesure du potentiel redox de certains transporteurs d'électrons localisés au niveau des mitochondries et plus précisément au niveau de la membrane interne (CI, CII, ... CIV), a donnée les résultats représentés par la figure ci-dessous.



A partir des données de ce document :

- 1) Définir la chaîne respiratoire.
- 2) Montrez le rôle de la chaîne respiratoire dans la réoxydation des coenzymes réduits et la réduction du dioxygène.

- 1) La chaîne respiratoire est une chaîne de transport d'électrons réalisant l'oxydation des coenzymes réduites issues de la dégradation de composés organiques. Ces coenzymes sont notamment le NADH, H<sup>+</sup> et le FADH<sub>2</sub>.
- 2) Tout au long de la chaîne respiratoire les électrons provenant du premier donneur d'électrons: NADH ou FADH<sub>2</sub>, seront transportés successivement via les différents complexes (CI, CII, ... CIV).

Les coenzymes réduits (RH<sub>2</sub>) subissent une oxydation selon la réaction suivante:



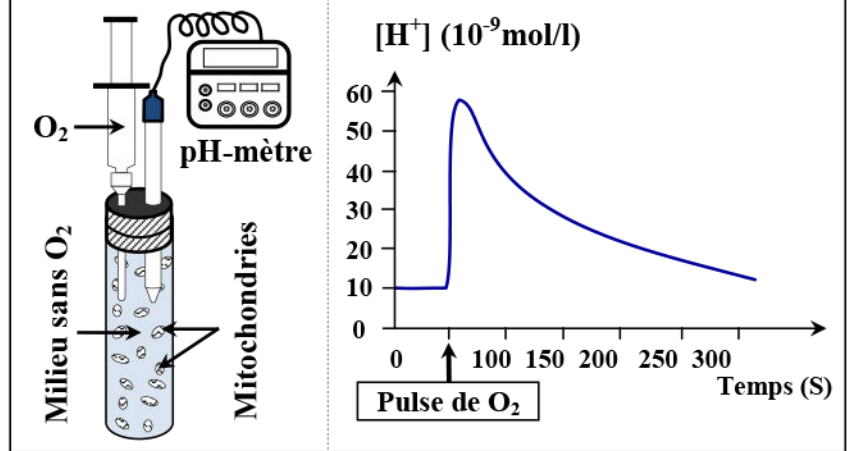
Les électrons de basses énergies libérés à la fin de la chaîne respiratoire réagissent ainsi avec l'accepteur final des électrons qui est l'O<sub>2</sub> et en présence de protons dans la matrice mitochondriale, vont former des molécules d'eau.



**Document 10: Réduction du dioxygène et flux des protons  $[H^+]$ .**

Une solution enrichie en mitochondries et en donneur d'électrons ( $NADH+H^+$ ) est contenue dans un milieu confiné dépourvu de dioxygène. En injectant une solution d' $O_2$  (Pulse), on étudie son influence sur la concentration en protons du milieu extérieur. On obtient la courbe ci-contre.

Analysez puis expliquez les résultats de cette l'expérience.



⇒ **Analyse des résultats :**

Avant l'injection d' $O_2$ , on observe que la concentration en  $H^+$  du milieu extérieur est nulle. Juste après l'injection d' $O_2$ , on observe une augmentation rapide suivie d'une diminution lente de la concentration en  $H^+$ .

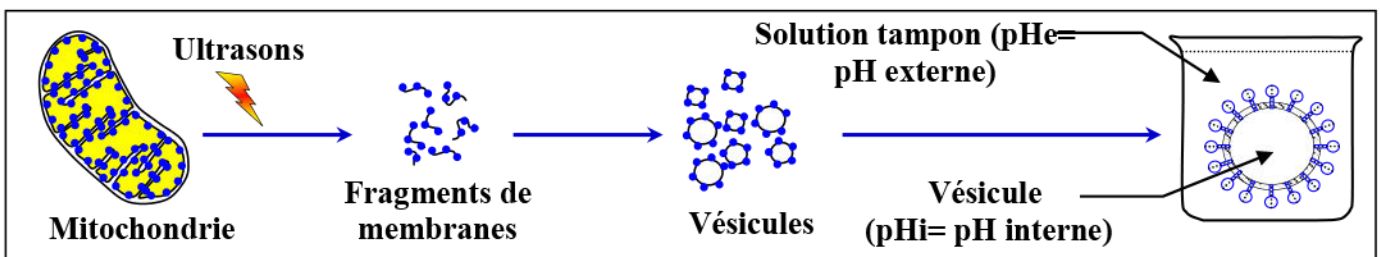
⇒ **Explication :**

Quand la respiration est activée par la présence de dioxygène, il y a oxydation des coenzymes réduits ( $NADH+H^+$ ) et les protons sont d'abord transférés de la matrice vers l'espace intermembranaire puis le milieu d'incubation ce qui explique la forte augmentation de la concentration en  $H^+$ . Dans un second temps, ils retournent dans la matrice, ce qui explique la diminution lente de la concentration en  $H^+$ .

★ **Rôle des sphères pédonculées :** (Voir document 9)

**Document 11: Mise en évidence du rôle des sphères pédonculées.**

Après avoir isolé des mitochondries, on les soumet à l'effet des ultrasons. Il en résulte une dislocation des membranes mitochondriales. On obtient alors, à partir de fragments retournés de la membrane interne, des vésicules fermées de telle façon que les sphères pédonculées soient orientées vers l'extérieur (Voir figure ci-dessous).



Les vésicules sont placées en présence d'ADP et  $P_i$  dans des solutions qui diffèrent par leur Ph, et on mesure la quantité d'atp synthétisé. Les résultats sont représentés par le tableau ci-dessous.

	Expérience 1	Expérience 2	Expérience 3	A partir de l'analyse de ces résultats expérimentaux, identifiez les conditions permettant la synthèse d'ATP.
	pHi = 6	pHi = 7	pHi = 6	
	pHe = 4	pHe = 7	pHe = 9	
Synthèse d'ATP	Non	Non	Oui	

On constate que la synthèse de l'ATP ne se fait que si  $pH_i < pH_e$ . Donc d'après ces résultats, les conditions permettant la synthèse d'ATP:

- ✓ La présence d'ADP et de  $P_i$ .
- ✓ Un pH extravésiculaire plus important que le pH de l'intérieur des vésicules ( $pH_i < pH_e$ ). Or le pH dépend de la concentration de protons du milieu (plus la concentration de protons est faible, plus le pH est élevé). Dans notre cas,  $[H^+]_i > [H^+]_e$ . Il y aura donc une tendance des protons à sortir des vésicules.
- ✓ La présence des sphères pédonculées

### Bilan:

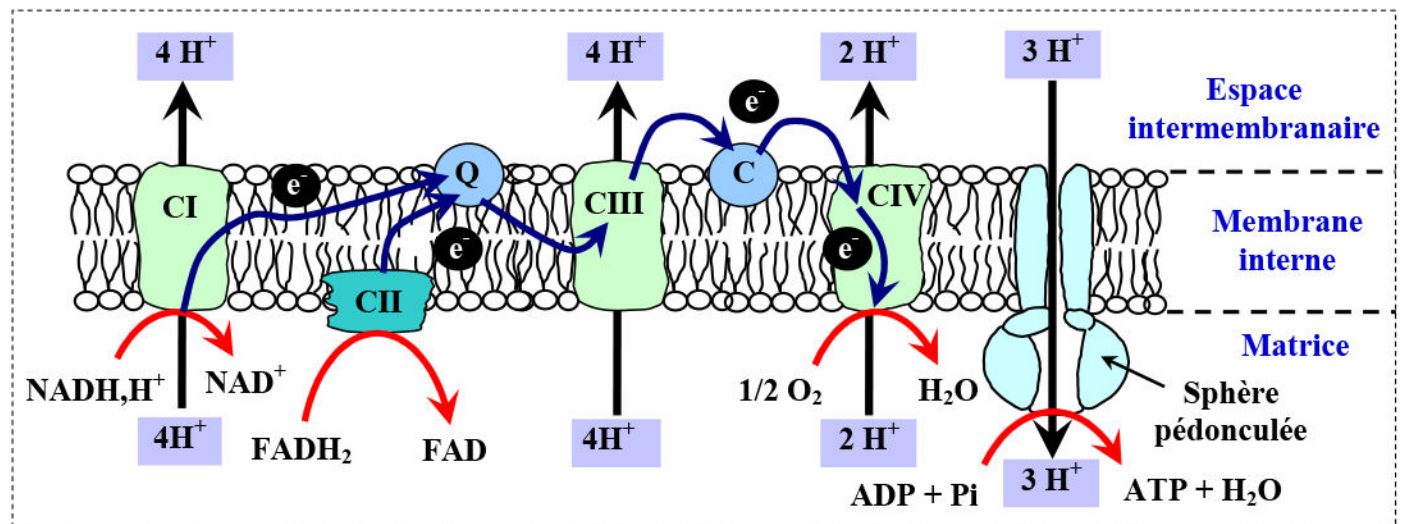
Dans les conditions cellulaires, les sphères pédonculées de la membrane interne des mitochondries catalysent la synthèse d'ATP dans la matrice. L'énergie nécessaire à cette synthèse vient d'un flux de protons.

Les protons, présents en concentration plus importante dans l'espace intermembranaire que dans la matrice (gradient de  $H^+$ ), gagnent la matrice en passant par les sphères pédonculées.

### c) Chaîne respiratoire et phosphorylation oxydative: (Voir document 12)

#### Document 12: Chaîne respiratoire et phosphorylation oxydative .

La chaîne respiratoire est localisée dans la membrane interne mitochondriale.



Cette chaîne de transport d'électrons est constituée de quatre complexes protéiques :

- ✓ Le complexe I, NADH-coenzyme Q oxydoréductase, agit sur  $NADH, H^+$  et permet le transport de 4 protons de la matrice mitochondriale à l'espace intermembranaire.
- ✓ Le complexe II, succinate-coenzyme Q oxydoréductase, agit sur  $FADH_2$  et permet le transport d'aucun proton.
- ✓ Le complexe III, coenzyme Q-cytochrome c oxydoréductase, permet le transport de 4 protons de la matrice mitochondriale à l'espace intermembranaire.
- ✓ Le complexe IV, cytochrome c oxydase, permet le transport de 2 protons de la matrice mitochondriale à l'espace intermembranaire.
- ✓ 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.

En exploitant les données de ce document et vos connaissances, élucidez la relation entre le fonctionnement de la chaîne respiratoire et la phosphorylation oxydative.



les coenzymes réduits mitochondriaux ( $\text{NADH}, \text{H}^+$  et  $\text{FADH}_2$ ) cèdent leurs deux électrons à un système de transporteurs qui, par une cascade de réactions d'oxydoréduction, amène ces électrons jusqu'à l'accepteur final, l'oxygène moléculaire, qui subit une réduction selon la réaction:  $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

La membrane mitochondriale interne, est imperméable aux ions  $\text{H}^+$ , cependant, au cours de ce transfert d'électrons, des protons sont expulsés de la matrice vers l'espace intermembranaire (au niveau des complexes I, III et IV), ce qui crée, de part et d'autre de la membrane interne, un gradient électrochimique d'ions  $\text{H}^+$ .

Le retour des protons  $\text{H}^+$  dans la matrice ne peut se produire qu'au niveau de passages spécifiques constitués par l'ATP synthase : les sphères pédonculées, ce qui permet la synthèse de l'ATP à partir d'ADP et de  $\text{P}_i$ .

Le gradient électrochimique de protons fournit ainsi l'énergie nécessaire à la synthèse d'ATP. La respiration et la phosphorylation de l'ADP sont donc couplées via le gradient de protons, ce qui donne à cette phase le nom de phosphorylation oxydative.

### Remarques:

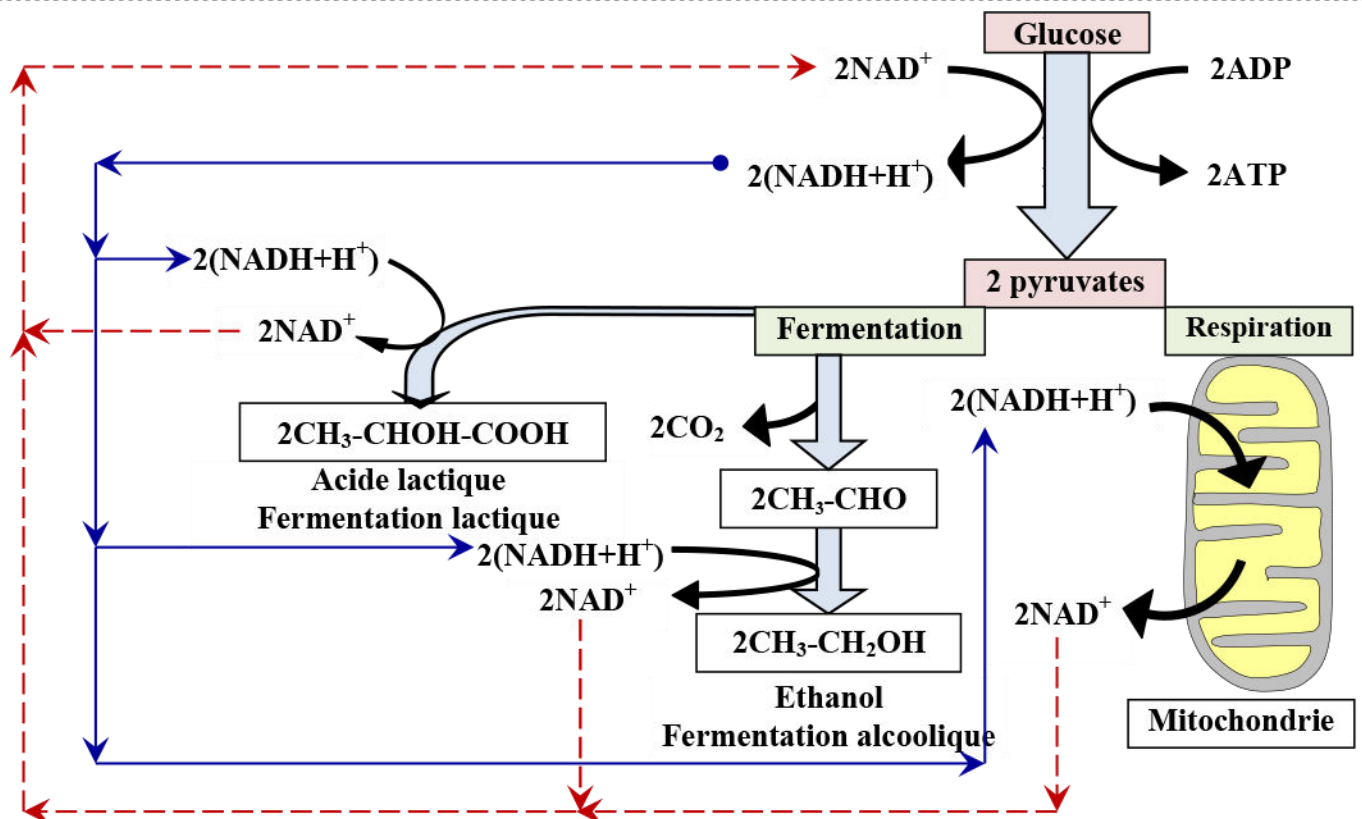
★ Nombre de moles d'ATP produites après l'oxydation des coenzymes réduits :

- ✓ L'oxydation d'une molécule de  $\text{NADH}, \text{H}^+$  permet la synthèse de trois molécules d'ATP.
- ✓ L'oxydation d'une molécule de  $\text{FADH}_2$  permet la synthèse de deux molécules d'ATP.

★ Devenir de l'acide pyruvique en milieu anaérobiose :

### Document 13: Devenir de l'acide pyruvique en cas d'absence du dioxygène.

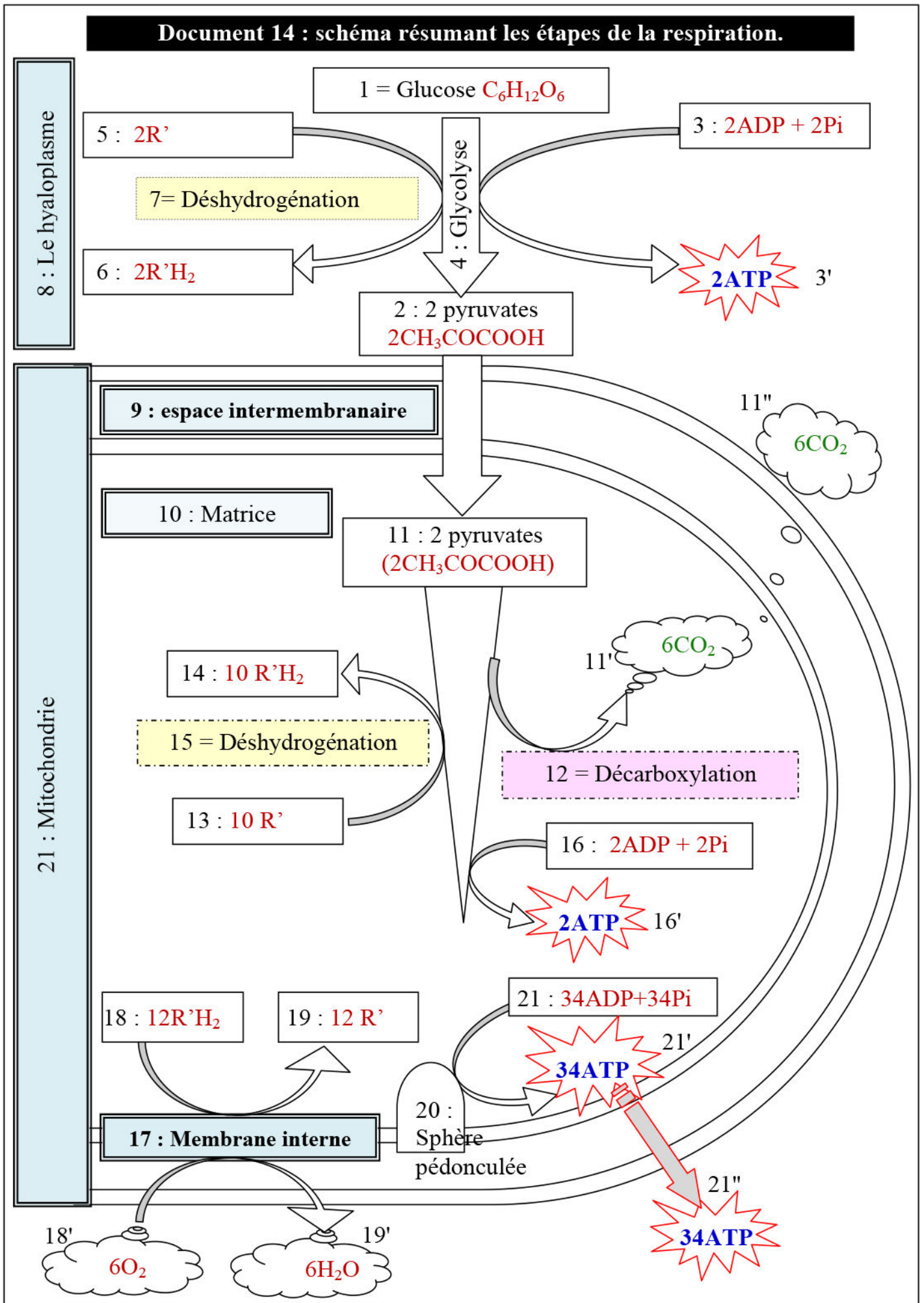
D'après les données de ce document indiquez le devenir du pyruvate en cas d'anaérobiose





3) Comparez le rendement énergétique de la respiration et la fermentation.

**Document 14 : schéma résumant les étapes de la respiration.**





1) Calculons le nombre de moles d'ATP produites:

- ✓ Lors de la respiration cellulaire :

La glycolyse produit  $2\text{ATP} + 2(\text{NADH} + \text{H}^+)$

Dans la mitochondrie chaque molécule d'acide pyruvique produit :  $1\text{ATP} + 4(\text{NADH} + \text{H}^+) + 1\text{FADH}_2$

Donc le bilan chimique énergétique de l'oxydation totale d'une molécule de glucose c'est :  $4\text{ATP} + 10(\text{NADH} + \text{H}^+) + 2\text{FADH}_2$ , ainsi le nombre total de molécules d'ATP produite est :  $4\text{ATP} + (10 \times 3) \text{ATP} + (2 \times 2) \text{ATP} = \mathbf{38 \text{ ATP}}$ .

- ✓ Lors de la fermentation :

Seule la glycolyse produit de l'ATP lors de la fermentation. Le bilan en ATP de la fermentation alcoolique est donc de  $\mathbf{2\text{ATP}}$  par mole de glucose oxydé.

**Remarque:** Lors de la glycolyse,  $2(\text{NADH} + \text{H}^+)$  sont produits dans le hyaloplasme et doivent passer dans la matrice mitochondriale. Ceci se fait grâce à des navettes moléculaires. Ces navettes ne transfèrent pas directement le  $(\text{NADH} + \text{H}^+)$  mais ses électrons. Ceci abouti à la fabrication:

- ✓ Soit des  $(\text{NADH} + \text{H}^+)$  matriciels. Dans ce cas le bilan énergétique sera 38ATP. C'est le cas du cœur et du foie.
- ✓ Soit des  $\text{FADH}_2$ . Dans ce cas le bilan énergétique sera 36ATP. c'est le cas du muscle squelettique et du cerveau.

2) Calculons le rendement énergétique de la respiration et de la fermentation:

On peut calculer le rendement énergétique en utilisant la relation suivante:

$$R = \frac{E'}{E} \times 100$$

$R$  = Rendement énergétique en %.  
 $E$  = Energie potentielle totale d'une mole de glucose en KJ.  
 $E'$  = Energie potentielle des molécules d'ATP produites en KJ.

- ✓ Le rendement énergétique de la respiration:

$$R = \frac{38 \times 30.5}{2860} \times 100 = \mathbf{40.5 \%}$$

- ✓ Le rendement énergétique de la fermentation:

$$R = \frac{2 \times 30.5}{2860} \times 100 = \mathbf{2.13 \%}$$

3) Le rendement énergétique de la respiration est nettement supérieur à celui de la fermentation.

Lors de la respiration, la dégradation du substrat organique est complète. Toute l'énergie chimique potentielle contenue dans une molécule de glucose (2860 KJ) est convertie en énergie chimique (ATP) (1159 KJ), et sous forme de chaleur (1701 KJ), avec la formation d'un résidu minéral dépourvu d'énergie.

Lors de la fermentation, la dégradation du substrat organique est partielle. Une partie de l'énergie chimique potentielle contenue dans une molécule de glucose (2860 KJ) est convertie en énergie chimique (ATP) (61 KJ), et sous forme de chaleur (107 KJ), avec la formation d'un résidu carboné contenant encore de l'énergie chimique potentielle  $(1346.5 \times 2) \text{ KJ}$ .