

CONSOMMATION DE LA MATIERE ORGANIQUE ET FLUX D'ENERGIE

Table de matière

I.	Mise en évidence des voies métaboliques responsables de la libération de l'énergie emmagasinée dans la matière organique au niveau de la cellule.....	2
A.	Rappels.....	2
B.	Analyse de quelques données expérimentales	3
C.	Conclusion	5
II.	Étude de la glycolyse	5
A.	Quelques données sur les couples NAD^+/NADH , H^+ et $\text{FAD}^+/\text{FADH}_2$ (doc.4).....	6
B.	Les étapes de la glycolyse (doc.5)	6
C.	Bilan de la glycolyse.....	6
III.	Étude de la respiration cellulaire	7
A.	Mise en évidence du rôle et de la structure de la mitochondrie	7
1.	Mise en évidence du rôle de la mitochondrie.....	7
2.	Ultrastructure de la mitochondrie (doc.7).....	8
B.	Les oxydations respiratoires	10
1.	Quel est le devenir de l'acide pyruvique ?.....	10
1.1.	Mise en évidence de la dégradation complète de l'acide pyruvique dans la matrice	10
1.2.	Les étapes de la dégradation de l'acide pyruvique dans la matrice (doc.9).....	11
1.2.1.	Formation de l'Acétyl-coenzyme A.....	11
1.2.2.	Cycle de Krebs.....	11
1.2.3.	Bilan de la décomposition de l'acide pyruvique dans la matrice.....	11
2.	La chaîne respiratoire : réduction d' O_2 et phosphorylation oxydative.....	12
2.1.	Mise en évidence du rôle de la chaîne respiratoire	12
2.2.	Mise en évidence du rôle des sphères pédonculées.....	13
2.3.	Conclusion : mécanisme de la réduction d' O_2 et la phosphorylation oxydative (doc.12)	15
C.	Le bilan énergétique de la respiration cellulaire	16
D.	Conclusion sur la respiration cellulaire.....	16
IV.	La fermentation.....	17
A.	Étude de quelques exemples.....	17
1.	La fermentation alcoolique.....	17
1.1.	Mise en évidence de la fermentation alcoolique.....	17
1.2.	Les étapes de la fermentation alcoolique (doc.14)	17
1.3.	Quelques caractéristiques de la fermentation alcoolique	17
2.	La fermentation lactique	17
2.1.	Mise en évidence de la fermentation lactique	17
2.2.	Les étapes de la fermentation lactique. (doc.16)	18
2.3.	Quelques caractéristiques de la fermentation alcoolique	18
B.	Définition de la fermentation	19
V.	Le rendement énergétique de la respiration et de la fermentation	19

Chapitre 1

Les réactions responsables de la libération de l'énergie emmagasinée dans la matière organique au niveau de la cellule (12h)

Introduction

- Toutes les cellules vivantes ont besoin d'énergie pour assurer leurs activités. Les nutriments organiques ou métabolites sont des molécules qui représentent un stock d'énergie chimique potentielle et leur dégradation plus ou moins complète par la cellule libère l'énergie nécessaire à la synthèse d'ATP.
- ✓ Quelles sont les modalités de conversion de l'énergie potentielle contenue dans les métabolites en énergie utilisables par les cellules ?
- ✓ Quelles sont les structures cellulaires impliquées dans les mécanismes qui assurent la conversion de cette énergie ?

I. Mise en évidence des voies métaboliques responsables de la libération de l'énergie emmagasinée dans la matière organique au niveau de la cellule.

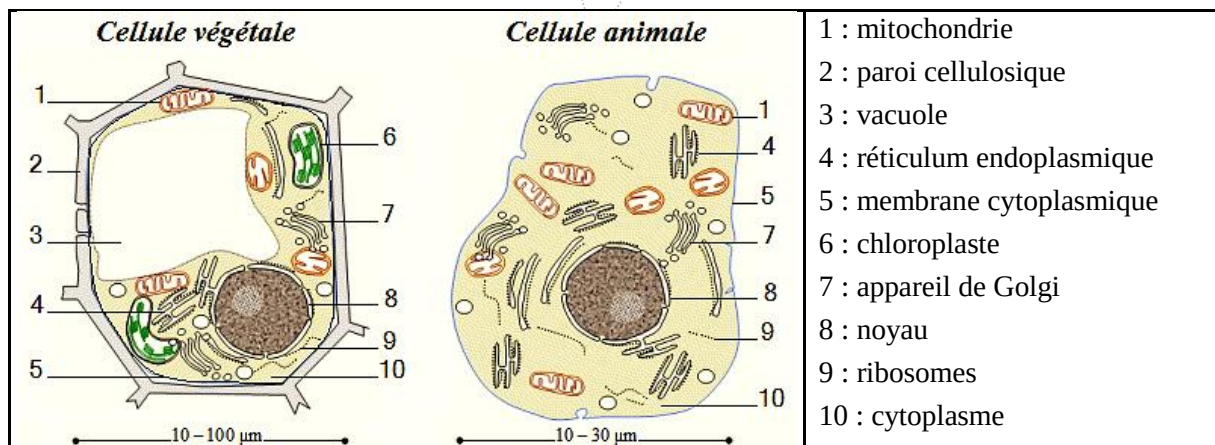
A. Rappels.

- [Rappels sur la cellule.](#) (doc 1)

Document 1:

➤ Tous les organismes sont composés de cellules, en effet la cellule est l'unité structurale fondamentale de tous les êtres vivants. Une cellule est constituée d'un cytoplasme limité par une membrane appelée membrane cytoplasmique. Dans le cytoplasme on trouve généralement un noyau et d'autres constituants de la cellule appelés organites cellulaires (comme la mitochondrie, le réticulum, l'appareil de Golgi...).

➤ La figure suivante représente la structure d'une cellule végétale et celle d'une cellule animale.



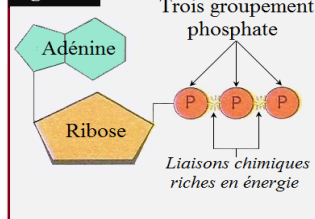
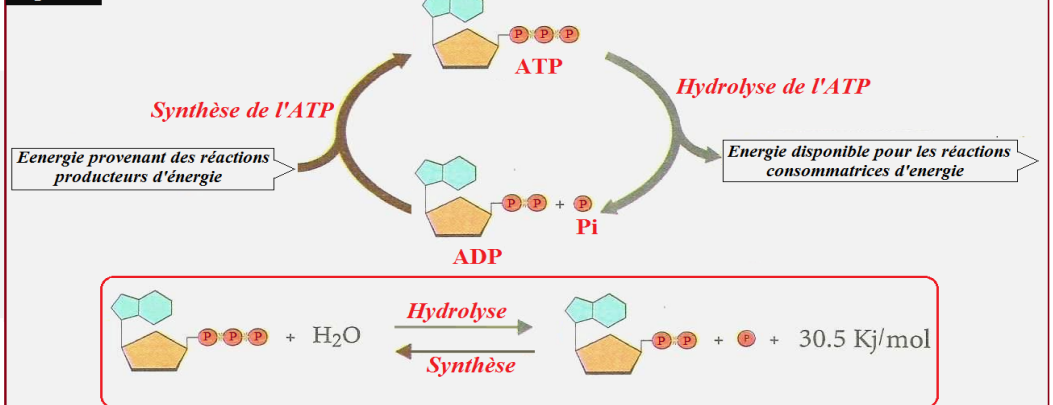
- [Bilan analytique.](#)

Les cellules animales et végétales réalisent des fonctions et des activités qui nécessitent une dépense d'énergie (activité mécanique, transport actif, synthèses cellulaires...). Pour obtenir cette énergie, les cellules consomment des substances organiques (comme les glucides), elles réalisent des réactions qui permettent la libération de l'énergie chimique emmagasinée dans les substances consommées, puis la conversion de cette énergie libérée en ATP qui constitue la forme énergétique utilisable par les cellules.

- [Rappels sur l'ATP.](#) (doc 2)

Document 2:

- L'ATP (Adénosine triphosphate) est une molécule universelle riche en énergie (elle a été mise en évidence dans toutes les cellules animales, végétales et bactériennes).
- L'ATP est formée d'une molécule d'adénosine liée à trois groupements phosphates (figure 1). La molécule d'adénosine est composée d'un pentose (le ribose) et d'une base organique azotée (l'adénine).
- Deux réactions chimiques réversibles caractérisent l'ATP (figure 2):
 - ✓ La synthèse de l'ATP par phosphorylation de l'ADP (Adénosine diphosphate). Il s'agit d'une réaction catalysée par l'enzyme ATPsynthase, et qui nécessite un apport important d'énergie qui sera stockée dans la molécule d'ATP.
 - ✓ L'hydrolyse de l'ATP : cette réaction catalysée par l'enzyme ATPase libère l'énergie chimique stockée dans la molécule d'ATP. L'énergie libérée devient disponible pour les réactions consommatrices d'énergie.

Figure 1**Figure 2****➤ Quelques questions**

- ✓ Quelles sont les réactions responsables de la libération de l'énergie emmagasinée dans les substances organiques ?
- ✓ Comment se fait la conversion de l'énergie libérée en ATP ?
- ✓ Comment l'énergie de l'ATP est utilisée dans les activités cellulaires qui nécessitent une dépense énergétique ?

B. Analyse de quelques données expérimentales

- Exercice (doc. 3)
- Éléments de correction

1.

- Avant l'injection de glucose, la concentration en O₂ reste presque constante dans la valeur 210 µmol/l et celle du CO₂ dans la valeur 50 µmol/l.
- Après l'injection de glucose, la concentration en O₂ diminue jusqu'à la valeur de 75 µmol/l, alors que celle du CO₂ augmente et atteint la valeur 210 µmol/l.

Constatation : en présence de glucose, les cellules de la levure consomment O₂ et rejettent CO₂.

2.

- La diminution de la quantité du glucose est due à une consommation de ce sucre par les cellules de la levure.
- L'augmentation de la température du milieu s'explique par une libération d'énergie sous forme de chaleur.
- L'augmentation de la masse de la levure est due à une multiplication des cellules de cette levure. Ces cellules ont pu obtenir l'énergie nécessaire à leur développement.
- Les cellules de la levure ont libéré de l'eau, c'est ce qui explique qu'à la fin de l'expérience, il y a plus d'eau produite que d'eau consommée.

Document 3:

❖ Pour mettre en évidence les voies métaboliques qui permettent aux cellules d'avoir l'énergie nécessaire aux différentes activités cellulaires, on propose l'étude des résultats de quelques expériences :

➤ **Première expérience:** La levure de bière est un champignon formé d'une seule cellule ovoïde, elle s'observe facilement au microscope (figure 1). On réalise une manipulation dont les étapes sont les suivantes :

✓ On place des levures dans un milieu de culture aéré (oxygéné) mais dépourvue de nutriments pendant deux jours, le but est que les cellules consomment tous les réserves cytoplasmiques.

✓ Le milieu de culture (qui contient des cellules de levures en suspension) est placé dans un montage EXAO qui permet la mesure des concentrations d'O₂ et de CO₂ dans le milieu de culture (figure 2).

✓ Au temps t, on injecte dans le milieu de culture une solution de glucose à 50 g/l

✓ La figure 3 montre le graphique qui apparaît sur l'écran de l'ordinateur lié au montage EXAO.

1. À partir des données du graphique de la figure 3, décrivez la variation des concentrations de l'O₂ et du CO₂.

✓ D'autres mesures ont montré qu'à la fin de cette première expérience : la quantité du glucose a diminué; la température du milieu de culture a augmenté; la masse de la levure a considérablement augmenté et il y a plus d'eau produite que d'eau consommée.

2. Interprétez ces résultats.

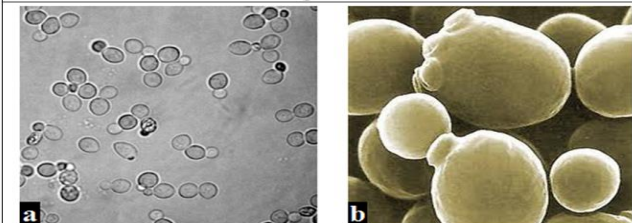
3. À partir des données précédentes, déterminez la voie métabolique utilisée par les cellules de la levure de bière pour obtenir l'énergie nécessaire à leur développement dans cette première expérience.

➤ **Deuxième expérience:** On place une suspension de cellules de levure de bière dans un récipient hermétique avec du glucose et très peu d'O₂. Un montage EXAO permet de mesurer les différents produits présents dans le récipient. Les résultats de cette deuxième expérience sont présentés par le graphique de la figure 4 (L'éthanol est un alcool qui provient de la décomposition du glucose). D'autre part, des mesures effectuées au début et à la fin de l'expérience ont montré une légère augmentation de la masse des levures.

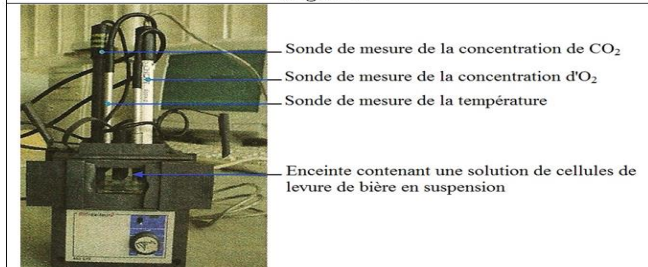
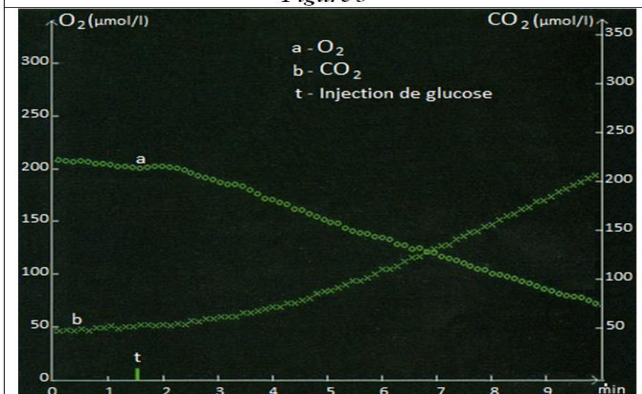
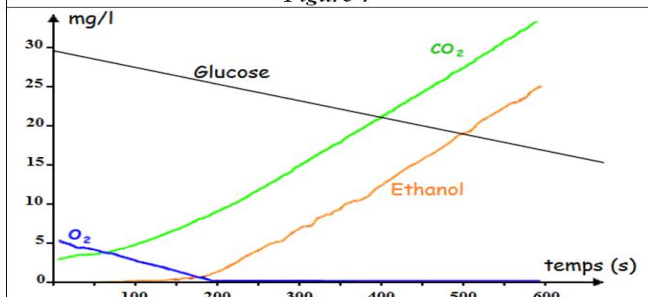
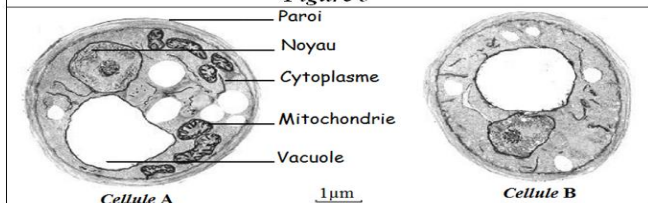
4. Analysez et interprétez les données de la figure 4. Déduisez la ou les voies métaboliques utilisées par les cellules de la levure de bière dans cette deuxième expérience.

➤ **Troisième expérience:** La figure 5 montre l'observation au microscope électronique d'une cellule de levure de bière ayant séjourné dans un milieu aérobie (cellule A), et d'une autre ayant séjourné dans un milieu anaérobie (cellule B).

5. À partir de la comparaison de la cellule A avec la cellule B, déterminez l'organite cellulaire qui peut être impliqué dans la production d'énergie en milieu aérobie.

Figure 1

a:
b:

Figure 2**Figure 3****Figure 4****Figure 5**

3. Les cellules de la levure de bière ont consommé le glucose et l'O₂, rejeté le CO₂ et libéré de l'énergie. Ces cellules ont donc utilisé la respiration cellulaire comme voie métabolique : dégradation complète du glucose en substance minérales (CO₂ et H₂O), cette dégradation qui nécessite la présence d'O₂, permet la libération de l'énergie emmagasinée dans le glucose: une partie de cette énergie est utilisée pour les réactions chimiques (métabolisme) qui permettent aux cellules de grandir, se diviser... Une autre partie de l'énergie est perdue sous forme de chaleur.

4. Analyse des données de la figure 4 :

La concentration du glucose diminue progressivement de 29 à 15 mg/l

La concentration d'O₂ diminue et devient nulle à partir de 200 s

La concentration de CO₂ augmente progressivement de 3 à 38 mg/l

À partir de 200 s, l'éthanol apparaît et sa concentration augmente progressivement jusqu'à la valeur de 25 mg/l.

Constatation :

- ❖ de 0 à 200 s: le milieu est aérobie (présence d'O₂), les cellules consomment le glucose et l'O₂ d'une part et rejettent CO₂ d'autre part, elles utilisent donc la respiration cellulaire comme voie métabolique.
 - ❖ Après 200 s: le milieu devient anaérobie (absence totale d'O₂), les cellules utilisent une autre voie métabolique ; il s'agit de la fermentation alcoolique : dégradation incomplète du glucose en éthanol et CO₂, il en résulte la libération d'une faible quantité d'énergie (la majeure partie de l'énergie du glucose reste emmagasiner dans l'éthanol qui est un résidu organique), c'est ce qui explique la faible augmentation de la masse des levures.
5. La cellule A (qui a séjourné dans le milieu aérobie) présente un grand nombre de mitochondries, alors que la cellule B (qui a séjourné dans le milieu anaérobie) ne présente pas mitochondrie. On peut donc supposer que la mitochondrie est un organelle cellulaire qui intervient dans la respiration cellulaire.

C. Conclusion

- ❖ Pour obtenir l'énergie nécessaire à leur activité et leur développement, les cellules dégradent et décomposent des substances organiques riches en énergie comme le glucose et qu'on appelle les métabolites énergétiques.
- ❖ Deux voies métaboliques permettent la libération de l'énergie emmagasinée dans le glucose, il s'agit de la respiration cellulaire et de la fermentation :
 - ✓ La respiration cellulaire se déroule obligatoirement en milieu aérobie. Au cours de ce phénomène, les cellules utilisent O₂ pour la dégradation complète du glucose en CO₂ et H₂O qui sont des substances minérales dépourvues d'énergie.
 - ✓ la fermentation se caractérise par le fait que les cellules ne consomment pas O₂, ainsi elles décomposent le glucose de manière incomplète en un résidu organique riche en énergie et un résidu minéral (ou en résidu organique uniquement).

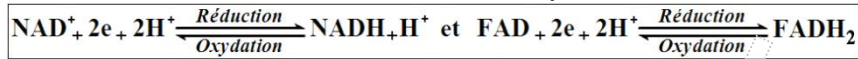
II. Étude de la glycolyse

- ❖ La respiration cellulaire ainsi que la fermentation débutent par une étape commune qui est la glycolyse. Cette étape se déroule dans le cytoplasme des cellules (hyaloplasme ou cytosol) sans consommation d'O₂.

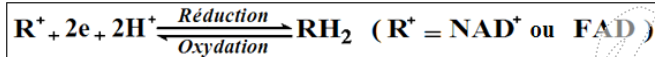
A. Quelques données sur les couples NAD^+/NADH , H^+ et $\text{FAD}^+/\text{FADH}_2$ (doc.4)

Document 4:

Les couples redox $\text{NAD}^+/\text{NADH}+\text{H}^+$ et FAD/FADH_2 jouent un rôle important dans les réactions de libération de l'énergie emmagasinée dans les substances organiques. Ce sont des transporteurs d'énergie sous forme d'électron e^- et de protons H^+ , ainsi ces molécules passent continuellement de la forme réduite à la forme oxydée et l'inverse selon les réactions suivantes:



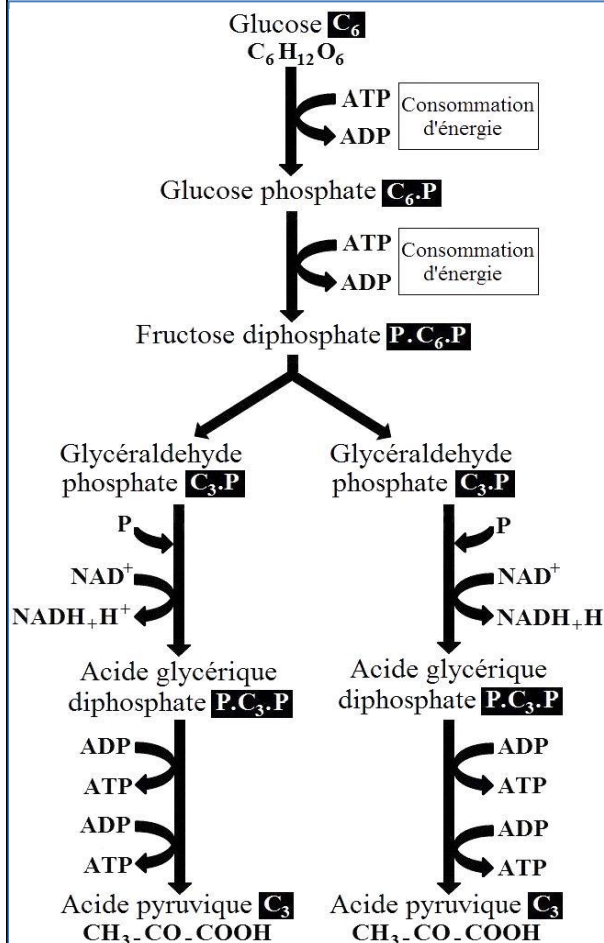
Pour simplifier on écrit ces réactions comme suit :



B. Les étapes de la glycolyse (doc.5)

❖ La glycolyse est une série de réactions chimiques, chacune d'elles est catalysées par une enzyme spécifique. On peut rassembler ces réactions chimiques en trois étapes essentielles qui sont illustrées par le document 5.

Document 5:



Première étape : Formation du fructose diphosphate avec consommation d'énergie.

Le glucose fixe un groupement phosphate issue de l'hydrolyse d'une molécule d'ATP et devient glucose phosphate. Ce dernier fixe lui aussi un groupement phosphate issue de l'hydrolyse d'une molécule d'ATP et se transforme en fructose diphosphate.

Deuxième étape : Formation de l'acide glycérique diphosphate.

La molécule du fructose diphosphate se scinde en deux molécules d'un sucre en C_3 appelé glycéraldéhyde phosphate. Chaque molécule de ce sucre fixe un groupement phosphate et subit une oxydation, elle libère des e^- et de H^+ qui sont fixés par une molécule de NAD^+ , celle-ci est réduite en $\text{NADH} + \text{H}^+$. A la suite de ces réactions le glycéraldéhyde phosphate se transforme en acide glycérique diphosphate.

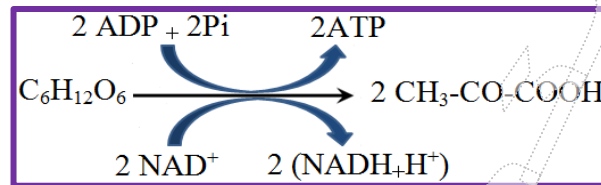
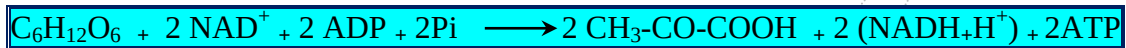
Troisième étape : Synthèse de l'ATP et formation de l'acide pyruvique

Chaque molécule d'acide glycérique diphosphate cède ses deux groupements phosphates à deux molécules d'ADP. Il en résulte la synthèse de quatre molécules d'ATP et la transformation de l'acide glycérique diphosphate en acide pyruvique.

C. Bilan de la glycolyse

❖ La glycolyse est une succession de réactions d'oxydo-réduction que le glucose subit dans le cytoplasme et dont les résultats sont les suivants :

- ✓ Oxydation d'une molécule de glucose qui se fait dégrader pour produire 2 molécules d'acide pyruvique ;
- ✓ Réduction de deux molécules de NAD^+ qui se transforment en $\text{NADH} + \text{H}^+$ (composés riches en énergie et capables de réduire d'autres substances) ;
- ✓ Synthèse de deux molécules d'ATP qui constituent le bilan énergétique de la glycolyse.
- ❖ On peut résumer le bilan global de la glycolyse comme suit :



Remarque : pour que la glycolyse puisse se poursuivre, il est nécessaire que les composés réduits NADH , H^+ soient ré- oxydés c'est-à-dire repassent à l'état oxydé NAD^+ .

III. Étude de la respiration cellulaire

A. Mise en évidence du rôle et de la structure de la mitochondrie

1. Mise en évidence du rôle de la mitochondrie

❖ Exercice (doc. 6)

Document 6:

❖ Pour mettre en évidence le rôle des mitochondries dans la respiration cellulaire, on propose les données suivantes :

➤ **Première donnée :** La figure 1 représente les étapes de l'isolement des mitochondries à partir de cellules animales :

✓ Un broyage mécanique permet la séparation des différents constituants des cellules d'un fragment de foie placé dans une solution de glucose.

✓ Une première centrifugation (5 min à 900 G) permet d'isoler les noyaux.

✓ Une deuxième centrifugation (10 min à 10 000 G) permet d'isoler les mitochondries.

➤ **Deuxième donnée :** On réalise une expérience dont les étapes sont les suivantes :

✓ Au temps t_0 , une suspension de mitochondries (isolées à partir de cellules de foie) est placée dans l'enceinte riche en O_2 d'un réacteur Biocell (appareil permettant la réalisation des expériences de biologie cellulaire).

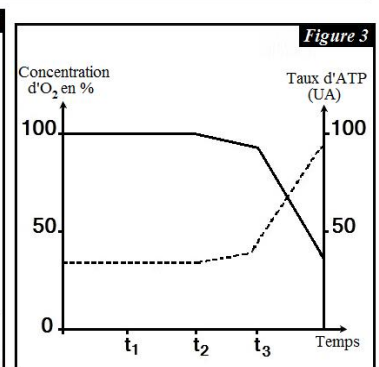
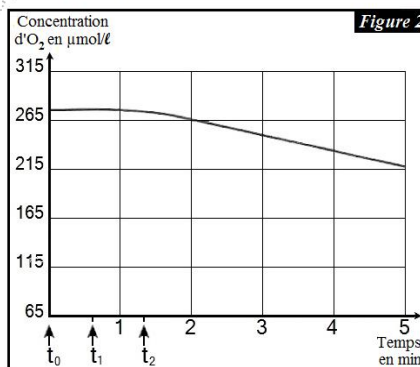
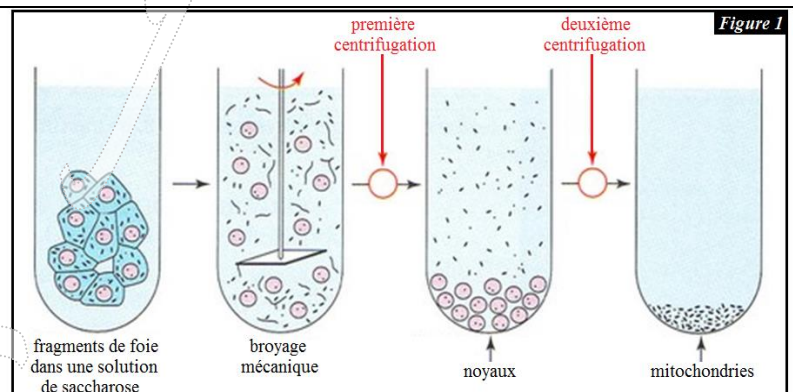
✓ On ajoute du glucose à la suspension au temps t_1 et de l'acide pyruvique au temps t_2 .

✓ On suit l'évolution de la concentration d' O_2 sur l'écran d'un ordinateur relié au réacteur Biocell. Les résultats sont traduits par le graphe de la figure 2.

1. À partir du graphe de la figure 2, décrivez l'évolution de la concentration d' O_2 , puis déduisez la nature du métabolite énergétique utilisé par les mitochondries.

➤ **Troisième donnée :** On place une suspension de mitochondries dans une solution nutritive riche en O_2 . On ajoute à la solution, du glucose au temps t_1 , de l'acide pyruvique au temps t_2 et l'ADP + Pi au temps t_3 . Le graphe de la figure 3 présente l'évolution de la concentration d' O_2 et de l'ATP tout au long de cette expérience.

2. Déterminez le rôle des mitochondries dans la respiration cellulaire à partir de l'analyse des données de la figure 3.



❖ Éléments de réponse

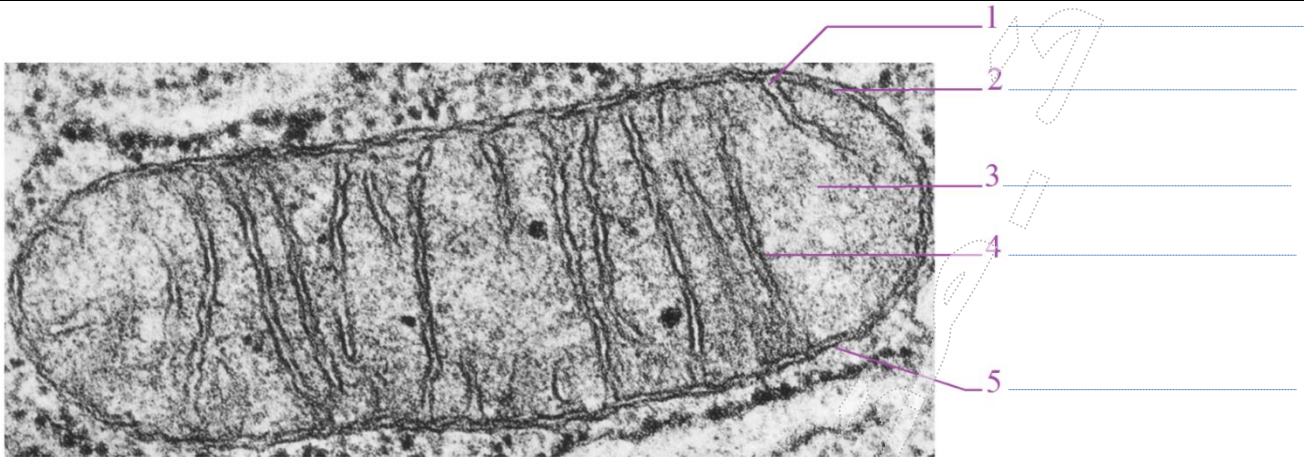
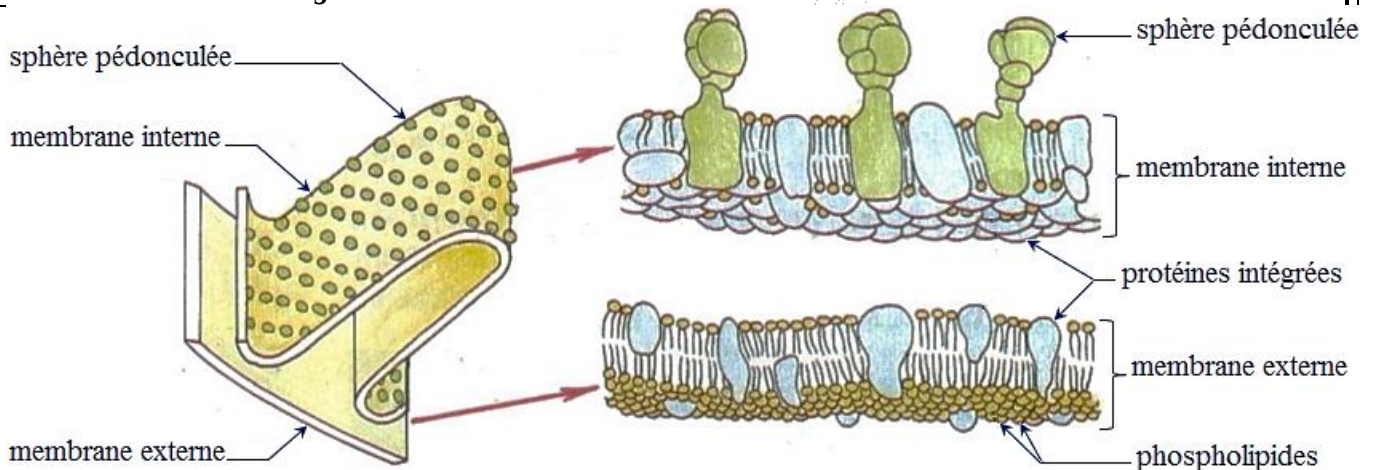
1. Analyse des données de la figure 2:

- ✓ De t_0 à t_2 , la concentration d' O_2 est restée constante à 270 $\mu\text{mol/l}$ malgré l'ajout du glucose en t_1 . Les mitochondries ne consomment pas O_2 en absence ou en présence du glucose.
- ✓ Lorsqu'on a ajouté l'acide pyruvique en t_2 , la concentration d' O_2 a diminué jusqu'à la valeur de 215 $\mu\text{mol/l}$ au temps 5 min, les mitochondries ont donc consommé l' O_2 .
 - Constatation : les mitochondries n'utilisent pas le glucose comme métabolite énergétique, mais elles utilisent l'acide pyruvique qui résulte de la glycolyse.

2. Analyse des données de la figure 3:

- De t_0 à t_2 , la concentration d' O_2 est restée constante à 100% et taux de l'ATP demeure stable à 40UA malgré l'ajout du glucose en t_1 . On déduit qu'il n'y a pas de consommation d' O_2 et pas de synthèse de l'ATP par les mitochondries.
- Lorsqu'on ajoute l'acide pyruvique en t_2 , on observe une légère diminution de la concentration d' O_2 et une légère augmentation du taux de l'ATP. On déduit qu'il y a une faible consommation d' O_2 et peu de synthèse de l'ATP par les mitochondries.
- Quand on ajoute l'ADP + Pi au temps t_3 , on remarque :
 - ✓ Une diminution importante de la concentration d' O_2 jusqu'à la valeur de 40% ;
 - ✓ Une augmentation importante du taux de l'ATP jusqu'à la valeur de 95UA.
- On déduit qu'il y a une forte consommation d' O_2 et une synthèse importante de l'ATP par les mitochondries.
 - Constatation: au niveau des mitochondries, il y a consommation de l' O_2 , de l'acide pyruvique, de l'ADP et Pi ce qui permet la synthèse de l'ATP. Cela représente des aspects d'une étape principale de la respiration cellulaire appelée oxydations respiratoires.

2. Ultrastructure de la mitochondrie (doc.7)

Document 7:**Figure 1:** Mitochondrie observée au microscope électronique**Figure 2:** Structure moléculaire des membranes de la mitochondrie**Figure 3:** Quelques caractéristiques de la mitochondrie

Parties de la mitochondrie	Quelques caractéristiques
Membrane externe	- Composée de 40% à 50% de lipides et de 50% à 60% de protéines. - Structure comparable à celle de la membrane cytoplasmique.
Membrane interne	- Grande surface grâce aux crêtes. - Composée de 20% de lipides et 80% de protéines parmi lesquelles : + des complexes enzymatiques et des transporteurs d'e^- qui forment la chaîne respiratoire ; + les sphères pédonculées qui jouent le rôle d'ATP synthétases.
Matrice	- Absence du glucose et présence de l'acide pyruvique, de l'ATP, de l'ADP et du Pi. - Présence des transporteurs des e^- et des H^+ (Les couples $NAD^+/NADH+H^+$ et $FAD/FADH_2$). - Présence d'enzymes variées comme les décarboxylases et les déshydrogénases. + Les décarboxylases catalysent la décarboxylation : réaction chimique au cours de laquelle une molécule de CO_2 est libérée à partir d'une molécule organique portant un groupement carboxyle $COOH$. + Les déshydrogénases catalysent la déshydrogénation : réaction d'oxydation d'une substance organique par enlèvement d'un ou plusieurs H^+ qui seront fixés par un accepteur (comme le NAD^+ ou le FAD).

B. Les oxydations respiratoires

1. Quel est le devenir de l'acide pyruvique ?

1.1. Mise en évidence de la dégradation complète de l'acide pyruvique dans la matrice

➤ Exercice (doc. 8)

Document 8:

❖ Pour déterminer le devenir de l'acide pyruvique (pyruvate) au niveau des mitochondries, on cultive des cellules animales dans un milieu riche en O₂ et contenant du glucose marqué par le carbone radioactif ¹⁴C.

L'observation d'échantillons de cellules cultivées à différents temps a mis en évidence l'apparition de nouvelles substances radioactives. Le tableau ci-contre montre la localisation et la concentration de ces substances radioactives en fonction du temps.

1. Déterminer le devenir du pyruvate au niveau des mitochondries à partir de l'analyse des données du tableau.

Temps	Milieu extracellulaire	Milieu intracellulaire	
		Cytoplasme	Mitochondrie
T ₀	G ⁺⁺⁺		
T ₁	G ⁺	G ⁺⁺	
T ₂		a.P ⁺⁺	a.P ⁺
T ₃			a.P ⁺⁺⁺ et a.K ⁺
T ₄	CO ₂ ⁺		a.K ⁺⁺⁺

- G : glucose

- a.P : acide pyruvique ou pyruvate

- a.K : acides du cycle de Krebs

Le nombre de «+» est proportionnel à la quantité de molécules radioactives présentes dans le milieu.

➤ Éléments de réponse

✓ Analyse et explication :

- Au temps T₀ : présence du glucose en grande quantité dans le milieu extracellulaire et son absence dans le milieu intracellulaire.
- Au temps T₁ : présence du glucose en faible quantité dans le milieu extracellulaire et en quantité moyenne dans le cytoplasme. Le glucose est donc passé du milieu extracellulaire vers le cytoplasme.
- Au temps T₂ on remarque :
 - ✓ La disparition du glucose du milieu extracellulaire ;
 - ✓ L'apparition de l'acide pyruvique en quantité moyenne dans le cytoplasme et en faible quantité dans la mitochondrie.
- ✓ Explication : au niveau du cytoplasme, le glucose subit la glycolyse ; il se décompose en pyruvate dont une partie passe dans la mitochondrie.
- Au temps T₃ on observe:
 - ✓ La disparition de l'acide pyruvique du cytoplasme et son apparition en grande quantité dans la mitochondrie ;
 - ✓ L'apparition des acides du cycle de Krebs en faible quantité dans la mitochondrie.
- ✓ Explication : l'acide pyruvique passe dans la mitochondrie où il se décompose pour donner les acides du cycle de Krebs.
- Au temps T₄ on remarque:
 - ✓ L'apparition du CO₂ en faible quantité dans milieu extracellulaire ;
 - ✓ La disparition de l'acide pyruvique et l'apparition des acides du cycle de Krebs en grande quantité dans la mitochondrie.
- ✓ Explication : au niveau de la mitochondrie (et plus précisément au niveau de la matrice), le pyruvate subit une dégradation totale dont le résultat est la formation des acides du cycle de Krebs et le rejet du CO₂ à l'extérieur de la cellule.

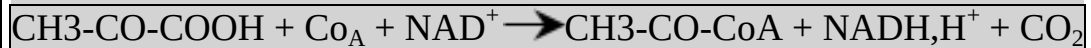
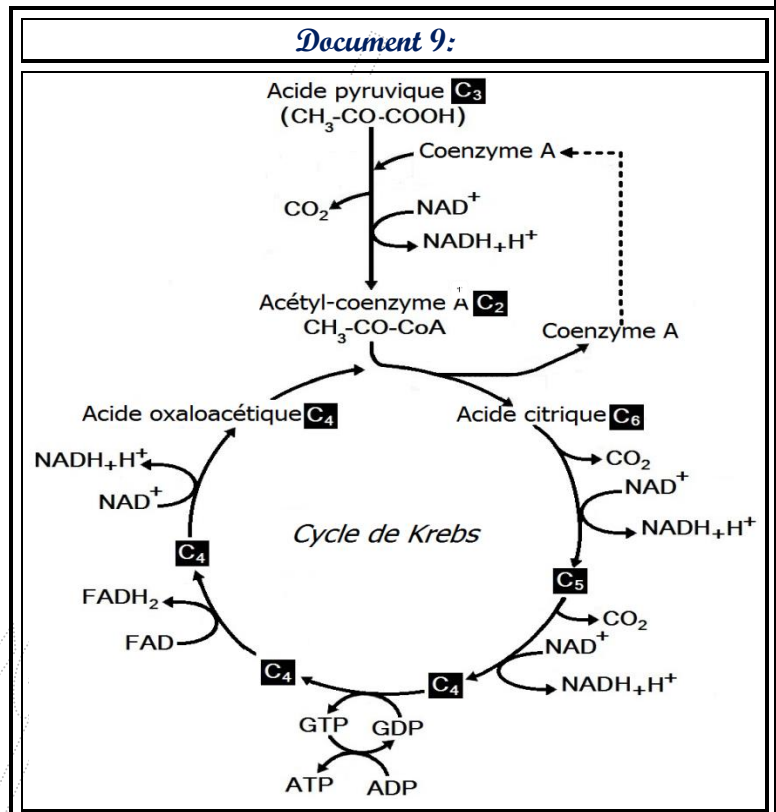
1.2. Les étapes de la dégradation de l'acide pyruvique dans la matrice (doc.9)

❖ La décomposition de l'acide pyruvique dans la matrice se fait en deux étapes qui sont la formation de l'Acétyl-coenzyme A et le cycle de Krebs.

1.2.1. Formation de l'Acétyl-coenzyme A

❖ L'acide pyruvique issu de la glycolyse passe dans la matrice de la mitochondrie où il subit les réactions suivantes catalysées par des enzymes spécifiques :

- Une décarboxylation dont le résultat est le rejet d'une molécule de CO₂ ;
- Une déshydrogénation, c'est une oxydation au cours de laquelle l'acide pyruvique perd des e⁻ et des H⁺ ; ces derniers sont fixés par une molécule de NAD⁺ qui sera réduite en NADH, H⁺.
- le fragment à deux carbones (CH₃-CO) qui reste du pyruvate et qu'on appelle l'Acétyle se lie à une molécule nommée Coenzyme A (CoA). On obtient ainsi un composé appelé l'Acétyl-coenzyme A.
- ❖ On écrit l'équation globale de l'étape de la formation de l'Acétyl-coenzyme A comme suit :



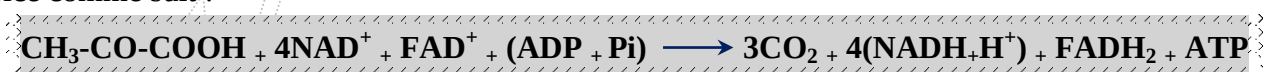
1.2.2. Cycle de Krebs

❖ L'Acétyl-coenzyme A libère le CoA et son fragment acétyle en C₂ se lie à une molécule en C₄ appelée l'acide oxaloacétique (ou oxaloacétate) ; il en résulte la formation d'un acide organique en C₆ nommé l'acide citrique (ou citrate). Ce dernier est ensuite décomposé progressivement au cours d'une succession de réactions chimiques qui régénèrent l'acide oxaloacétique, il s'agit donc d'un cycle de réactions que l'on nomme cycle de Krebs. Ce dernier se caractérise par:

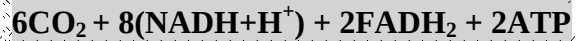
- Des réactions de décarboxylation, elles produisent le CO₂, déchet minéral qui sera rejeté ;
- Des réactions de déshydrogénation, elles libèrent des e⁻ et des H⁺ qui sont acceptés par le NAD⁺ et le FAD ; le NAD⁺ est réduit en NADH, H⁺ alors que le FAD est réduit en FADH₂.
- La synthèse d'une molécule d'ATP.
- ❖ Le bilan d'un cycle de Krebs est : **2CO₂, 3(NADH, H⁺), 1 FADH₂ et 1ATP.**

1.2.3. Bilan de la décomposition de l'acide pyruvique dans la matrice

❖ On peut écrire l'équation globale de l'étape de décomposition d'une molécule du pyruvate dans la matrice comme suit :



❖ Pour une molécule de glucose, le bilan global de la dégradation de l'acide pyruvique dans la matrice est:



2. La chaîne respiratoire : réduction d'O₂ et phosphorylation oxydative

2.1. Mise en évidence du rôle de la chaîne respiratoire

2.1.1. Exercice (doc.10)

Document 10:

❖ Pour mettre en évidence le rôle de la chaîne respiratoire dans la respiration cellulaire, on propose les données suivantes:

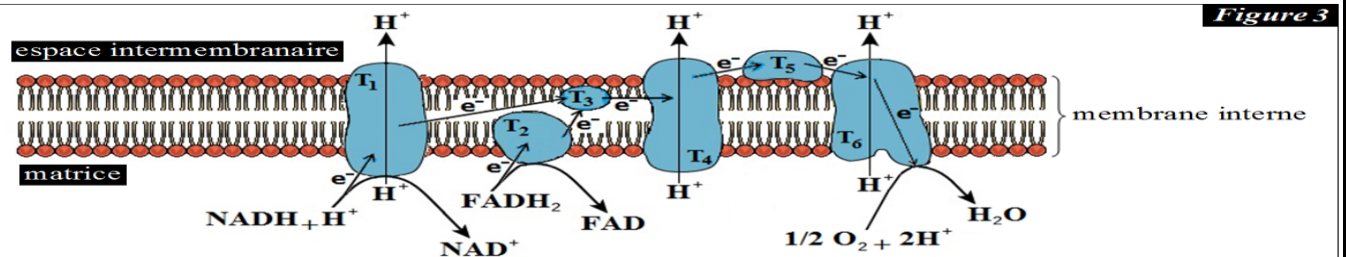
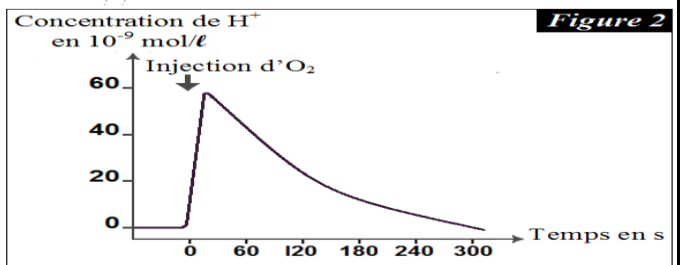
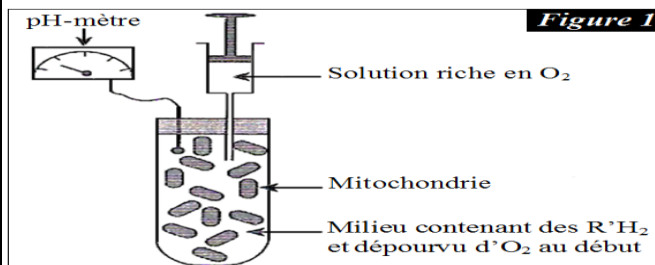
➤ **Première donnée :** On réalise l'expérience illustrée par la figure 1. On place une suspension de mitochondries dans un milieu dépourvu d'O₂ et contenant des R'H₂ (donneurs d'e⁻ et de H⁺). On suit l'évolution de la concentration de H⁺ dans le milieu avant et après l'injection d'une solution riche en O₂, les résultats sont présentés par le graphe de la figure 2.

1. Décrivez l'évolution de la concentration de H⁺ dans le milieu avant et après l'injection d'O₂.

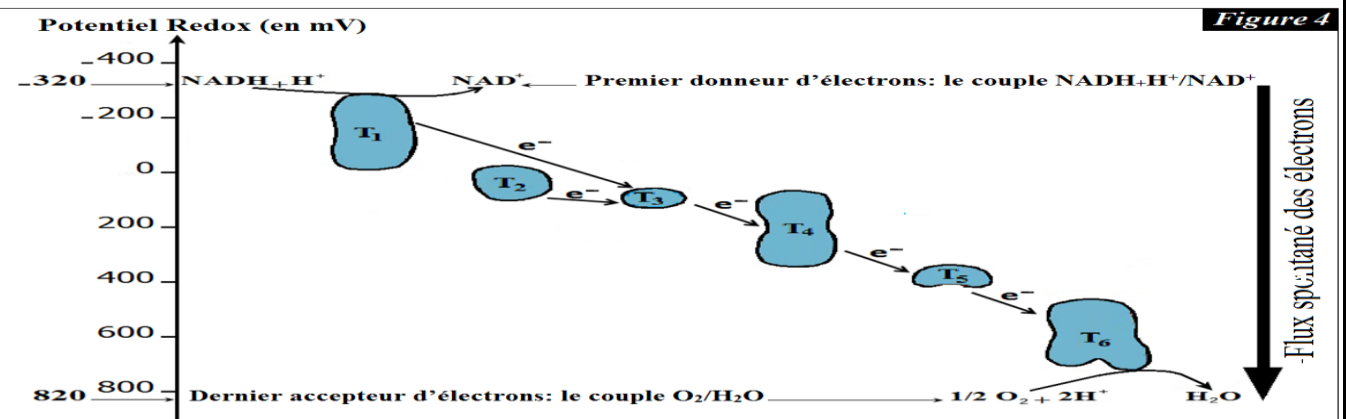
➤ **Deuxième donnée :** Les figures 3 et 4 montrent le devenir des e⁻ et des H⁺ cédés par les transporteurs réduits R'H₂ (NADH+H⁺ et FADH₂) au niveau de la chaîne respiratoire constituée des transporteurs T₁, T₂, T₃, T₄, T₅ et T₆.

2. Déterminez le ou les rôles des protéines de la chaîne respiratoire à partir de l'analyse des données des figures 3 et 4.

3. Expliquez l'augmentation rapide de la concentration de H⁺ après l'injection d'O₂ (figure 2).



- T₁ = Complexe I (C_I) : permet la réoxydation de NADH+H⁺ et transporte des protons de la matrice vers l'espace intermembranaire.
- T₂ = Complexe II (C_{II}) : permet la réoxydation de FADH₂.
- T₃ = Coenzyme Q : transporte les électrons depuis le complexe I et le complexe II vers le complexe III.
- T₄ = Complexe III (C_{III}) : transporte les électrons vers le cytochrome C et les protons de la matrice vers l'espace intermembranaire.
- T₅ = Cytochrome C : transporte les électrons depuis le complexe III vers le complexe IV.
- T₆ = Complexe IV (C_{IV}) : transporte des protons de la matrice vers l'espace intermembranaire.



Remarque : le flux spontané des électrons est accompagné d'une libération d'énergie

➤ Éléments de réponse

1. Avant l'injection d'O₂, la concentration de H⁺ est nulle.

Après l'injection d'O₂, H⁺ apparaît dans le milieu, sa concentration augmente rapidement jusqu'à la valeur de 58.10^{-9} mol/l puis elle diminue progressivement et s'annule après 32 s.

2. Analyse des données de la figure 3

➤ Au niveau de la membrane interne des mitochondries, on remarque ce qui suit:

- ✓ Le NADH+H⁺ est oxydé par le C_I alors que le FADH₂ est oxydé par le C_{II};
- ✓ Les e⁻ libérés à la suite de cette oxydation sont transportés par les enzymes de la chaîne respiratoire jusqu'à O₂, ce dernier fixe aussi les H⁺ et se transforme en H₂O.
- ✓ Certaines enzymes de la chaîne respiratoire transportent les H⁺ de la matrice vers l'espace intermembranaire.

Analyse des données de la figure 4

➤ Le flux de e⁻ dans la chaîne respiratoire s'effectue spontanément dans le sens croissant des potentiels Redox, depuis le premier donneur (le couple NADH+H⁺/NAD⁺), jusqu'au dernier accepteur (le couple O₂/H₂O).

➤ Au cours de leur transport, les e⁻ libèrent de l'énergie (qui permet aux C_I, C_{III} et C_{IV} de réaliser un transport actif des H⁺ de la matrice vers l'espace intermembranaire).

3. Injection d'O₂ → oxydation des R'H₂ → libération d'e⁻ et de H⁺ → transport des e⁻ par les transporteurs de la chaîne respiratoire avec libération d'énergie par les e⁻ → passage des H⁺ de la matrice vers l'espace intermembranaire puis à l'extérieur des mitochondries → augmentation de la concentration de H⁺

2.1.2. Conclusion

❖ La chaîne respiratoire est constituée de plusieurs transporteurs, ce sont des complexes enzymatiques qui participent à des réactions d'oxydo-réduction, ils réoxydent les composés réduits R'H₂ et transportent les e⁻ et les H⁺ cédés par ces composés jusqu'à O₂, ce dernier accepteur subit une donc une réduction et se transforme en H₂O.

❖ Le flux des e⁻ et H⁺ au niveau de la chaîne respiratoire depuis le couple R'H₂ vers le couple O₂/H₂O s'appelle l'oxydation respiratoire.

2.2. Mise en évidence du rôle des sphères pédonculées

2.2.1. Exercice (doc. 11)

➤ Éléments de réponse

Analyse des données de la figure 2 : il n'y a pas de synthèse de l'ATP dans les conditions suivantes :

- ✓ Absence des sphères pédonculées (milieu 2)
- ✓ pH_i = pH_e : l'intérieur et l'extérieur des particules submitochondriales ont la même concentration en H⁺.
- ✓ Lorsque la membrane interne des mitochondries devient perméable aux H⁺.

Constatation : les particules submitochondriales synthétisent l'ATP si les conditions suivantes sont réalisées:

- ✓ Présence de l'ADP et Pi ;
- ✓ Présence des sphères pédonculées dans les particules submitochondriales ;
- ✓ pH_i < pH_e : la concentration en H⁺ à l'intérieur des particules mitochondriales est supérieure à celle de l'extérieur ;

- ✓ Passage des H^+ de l'intérieur des particules submitochondriales vers l'extérieur par les canaux de ces particules.

Document 11:

❖ Pour mettre en évidence le rôle des sphères pédonculées dans la respiration, on réalise l'expérience présentée par la figure 1: des mitochondries isolées sont soumises à l'action d'ultrasons, elles se découpent et des fragments de leur membrane interne se retournent et forment des particules submitochondriales, il s'agit de vésicules dont les sphères pédonculées sont orientées vers l'extérieur. On place ces particules submitochondriales dans des milieux variés ; la figure 2 présente les conditions de cette expérience et les résultats obtenus.

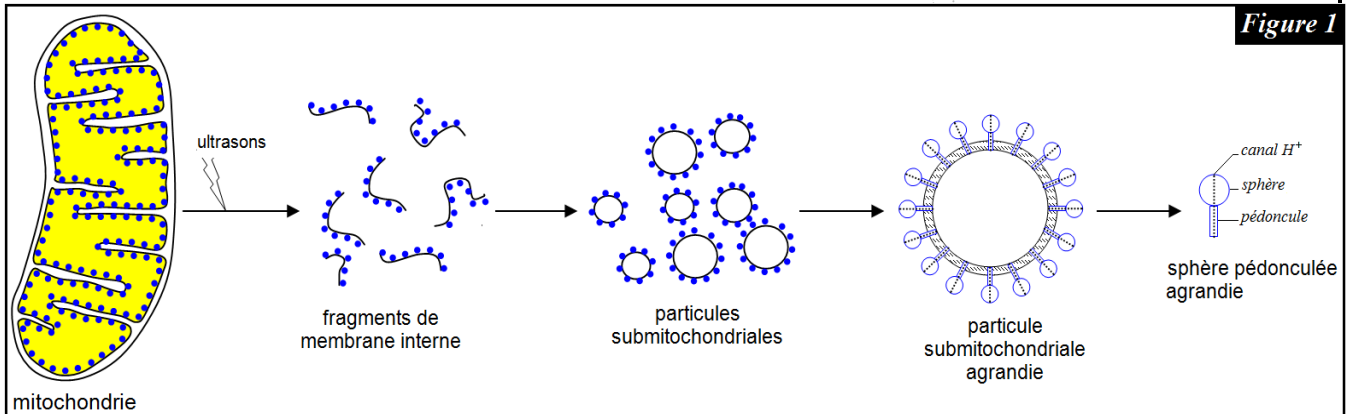


Figure 2	<i>milieu 1</i>	<i>milieu 2</i>	<i>milieu 3</i>	<i>milieu 4</i>
<i>conditions expérimentales</i>	ADP + Pi pHi = 4 pHe = 8	particule submitochondriale sans sphère pédonculée ADP + Pi pHi = 4 pHe = 8	ADP + Pi pHi = 7 pHe = 7	FCCP ADP + Pi pHi = 4 pHe = 8
<i>résultats</i>	synthèse de l'ATP	pas de synthèse de l'ATP	pas de synthèse de l'ATP	pas de synthèse de l'ATP

1. À partir de l'analyse des données de la figure 2, déterminez le rôle des particules submitochondriales mis en évidence par cette expérience.
- pHi : pH à l'intérieur des particules submitochondriales (représente le pH dans l'espace intermembranaire).
 - pHe : pH à l'extérieur des particules submitochondriales (représente le pH dans la matrice).
 - ❖ La membrane interne des mitochondries est imperméable aux H^+ , ces derniers ne peuvent passer de l'espace intermembranaire à la matrice qu'à travers des canaux situés dans les sphères pédonculées.
 - ❖ le FCCP est substance qui rend la membrane interne des mitochondries perméable aux H^+ .

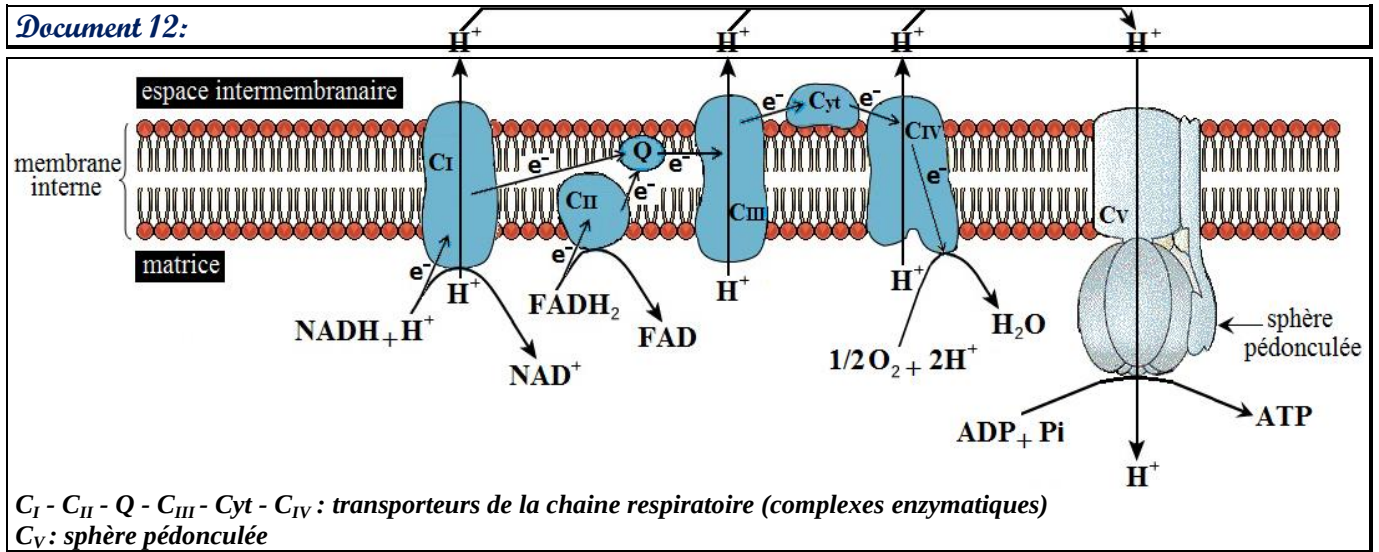
2.2.2. Conclusion

❖ Les sphères pédonculées sont des enzymes qui jouent un rôle fondamental dans la respiration cellulaire, ce sont des ATP synthétases qui catalysent la réaction de synthèse de l'ATP. Cela nécessite la formation d'un gradient de H^+ : la concentration de H^+ dans l'espace intermembranaire doit être supérieure à celle de la matrice. Le gradient de H^+ crée un flux de H^+ qui s'effectue de l'espace intermembranaire vers la matrice à travers les canaux des sphères pédonculées. Ce flux entraîne la libération d'une énergie (énergie potentielle du gradient) et l'activation des sphères pédonculées, ces dernières utilisent l'énergie libérée pour la synthèse de l'ATP à partir de la phosphorylation de l'ADP : fixation d'un phosphate inorganique (Pi) sur une molécule de l'ATP.



2.3. Conclusion : mécanisme de la réduction d'O₂ et la phosphorylation oxydative (doc.12)

Document 12:



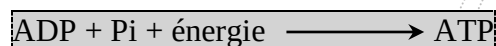
❖ Au niveau de la membrane des crêtes mitochondriales, les molécules des transporteurs réduits $R'H_2$ (formés au cours de la glycolyse et la dégradation du pyruvate dans la matrice) subissent une réoxydation par certains complexes enzymatiques de la chaîne respiratoire, il en résulte la libération d' e^- et de H^+ ainsi que la régénération des transporteurs oxydés NAD^+ et FAD qui sont indispensables pour la poursuite de la glycolyse et du cycle de Krebs :



❖ Les e^- cédés par les $R'H_2$ réoxydés sont transportés par les enzymes de la chaîne respiratoire (à la suite d'une succession de réactions d'oxydo-réduction) jusqu'à O_2 , ce dernier accepteur est réduit selon la réaction suivante:



❖ Au cours du transport des e^- par la chaîne respiratoire, certains complexes enzymatiques de cette chaîne utilisent l'énergie libérée par les e^- pour pomper des H^+ de la matrice vers l'espace intermembranaire. Il s'établit ainsi un gradient de H^+ : la concentration de H^+ dans l'espace intermembranaire devient supérieure à celle de la matrice. Il en résulte la création d'un flux de H^+ qui passent de l'espace intermembranaire vers la matrice à travers les canaux des sphères pédonculées, ces dernières s'activent et utilisent l'énergie du flux de H^+ pour la synthèse de l'ATP à partir de la phosphorylation de l'ADP :



❖ Les H^+ qui retournent à la matrice réagissent avec O_2^- pour former l'eau selon la réaction suivante :



Remarque :

❖ On écrit l'équation globale de la réduction d' O_2 comme suit : $\frac{1}{2} O_2 + 2e^- + 2H^+ \longrightarrow H_2O$

❖ La phosphorylation de l'ADP ne peut avoir lieu que si les transporteurs réduits $R'H_2$ sont réoxydés ; cette réoxydation nécessite la présence d' O_2 (dernier accepteur des e^- et des H^+). D'autre part, la phosphorylation de l'ADP active la réoxydation des $R'H_2$, on parle phosphorylation oxydative.

Constatation : la réoxydation des R'H₂, la réduction d'O₂ et la phosphorylation de l'ADP sont des réactions couplées qui dépendent les unes des autres.

C. Le bilan énergétique de la respiration cellulaire

➤ Exercice (doc. 13)

Document 13:

❖ Pour déterminer le bilan énergétique de la respiration cellulaire, on propose les données suivantes :

➤ **Première donnée :** au cours de la phosphorylation oxydative, la réoxydation d'une molécule de NADH+H⁺ permet la synthèse de trois molécules d'ATP, alors que la réoxydation d'une molécule de FADH₂ permet la synthèse de deux molécules d'ATP.

➤ **Deuxième donnée :** Les molécules de NADH+H produites dans le hyaloplasme lors de la glycolyse passent facilement à travers la membrane externe de la mitochondrie qui est très perméable. Ceci n'est pas le cas de la membrane interne, obligeant le NADH+H⁺ à transmettre ses électrons riches en énergie à d'autres molécules de transfert, différentes selon la navette :

- ✓ **La navette malate-aspartate :** Les électrons de NADH+H sont transférés à une substance appelée l'oxaloacétate pour former ce qu'on appelle le malate, ce dernier passe dans la matrice où il retransmet ses électrons au NAD⁺ afin de reformer le NADH+H⁺. Cette navette est plus particulièrement présente au niveau du cœur et du foie
- ✓ **La navette glycérol 3-phosphate :** Les électrons de NADH+H⁺ sont transférés au glycérol 3-phosphate qui retransmet ses électrons au FAD pour former le FADH₂. Cette navette est plus particulièrement présente au niveau des muscles squelettiques et du cerveau.

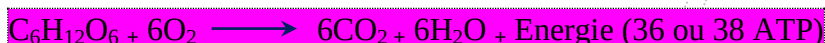
1. À partir des données précédentes et de vos acquis, déterminez le bilan énergétique de la respiration cellulaire (calculez le nombre de molécules d'ATP synthétisées au cours de la respiration cellulaire lors de la consommation d'une molécule de glucose).

➤ Éléments de réponse

- ✓ 38 ATP en cas de l'intervention de La navette malate-aspartate.
- ✓ 36 ATP en cas de l'intervention de La navette glycérol 3-phosphate

D. Conclusion sur la respiration cellulaire

❖ La respiration cellulaire est une voie métabolique productrice d'énergie, elle se déroule en milieu aérobie et au cours de laquelle les cellules consomment O₂ pour oxyder le glucose et le dégrader complètement en substances minérales sans énergie (CO₂ et H₂O), cela permet la libération de l'énergie contenue dans le glucose et son utilisation dans la synthèse de 36 ou 38 ATP. On peut résumer les différentes réactions chimiques de la respiration cellulaire par l'équation globale suivante :



❖ Les étapes de la respiration cellulaire sont les suivantes :

- ✓ La glycolyse qui se déroule dans le cytoplasme ;
- ✓ La dégradation complète de l'acide pyruvique qui se déroule dans la matrice des mitochondries, elle comprend la formation de l'Acétyl-coenzyme A et le cycle de Krebs.
- ✓ La réduction d'O₂ et la phosphorylation oxydative qui se déroulent dans la membrane interne des mitochondries.

❖ Les différentes étapes de la respiration cellulaire sont dépendantes les unes des autres :

- ✓ La glycolyse produit le pyruvate qui entre dans la mitochondrie pour se décomposer et alimenter le cycle de Krebs ;
- ✓ La glycolyse et cycle de Krebs produisent les transporteurs réduits R'H₂ qui seront réoxydés dans la chaîne respiratoire ;
- ✓ La chaîne respiratoire régénère les transporteurs d'e⁻ et de H⁺ à l'état oxydé R⁺ (NAD⁺ et FAD), ce qui permet le maintien de la glycolyse et du cycle de Krebs.

IV. La fermentation.

A. Étude de quelques exemples.

1. La fermentation alcoolique.

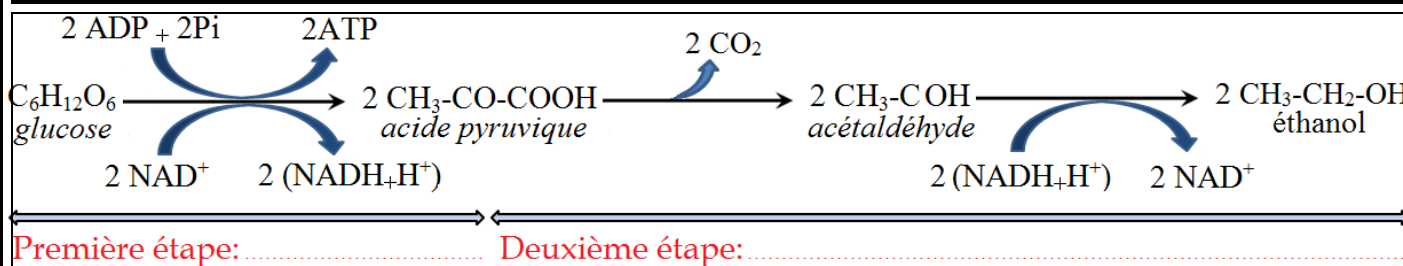
1.1. Mise en évidence de la fermentation alcoolique.

❖ Voir l'exercice du document 3.

1.2. Les étapes de la fermentation alcoolique (doc.14)

❖ La fermentation alcoolique se déroule dans le cytoplasme en deux étapes

Document 14:



❖ Première étape : La glycolyse.

❖ Deuxième étape : Conversion de l'acide pyruvique en éthanol.

❖ L'acide pyruvique issu de la glycolyse subit une décarboxylation, il se transforme en acétaldéhyde avec libération d'une molécule de CO_2 . L'acétaldéhyde est ensuite réduit, il fixe des e^- et des H^+ provenant de la réoxydation de $NADH+H^+$ issu de la glycolyse, il en résulte la conversion de l'acétaldéhyde en éthanol.

1.3. Quelques caractéristiques de la fermentation alcoolique

❖ Au cours de la fermentation alcoolique, le dernier accepteur des e^- et des H^+ est l'acétaldéhyde.

Le bilan énergétique de la fermentation alcoolique est $2ATP$. On écrit l'équation globale de la fermentation alcoolique comme suit :



❖ **Définition :** la fermentation alcoolique est une voie métabolique réalisée par certains micro-organismes comme la levure de bière en milieu anaérobie (absence d' O_2), elle permet la décomposition partielle du glucose en éthanol et CO_2 avec production d'une faible quantité d'énergie sous forme de deux ATP .

2. La fermentation lactique

2.1. Mise en évidence de la fermentation lactique

❖ Exercice (doc.15)

❖ Éléments de réponse

1. Pendant le jour 1, le pH reste constant à la valeur 6,8.

Du jour 2 au jour 6, le pH diminue progressivement jusqu'à la valeur 4,8.

À partir du jour 6, la valeur du pH reste constante à 4,8.

Constatation : l'acidité du lait a augmenté.

2. Les lactobacilles utilisent le glucose (issu de la décomposition du lactose) comme métabolite énergétique, elles réalisent des réactions chimiques en anaérobie qui permettent la transformation du glucose en acide lactique. Ce dernier provoque l'augmentation de l'acidité du lait et sa transformation en yaourt (à cause de la coagulation des protéines du lait). Ce phénomène s'appelle la fermentation lactique.

Document 15:

On met 125 ml du lait frais dans un becher et on mesure le pH du lait quotidiennement pendant 10 jours avec un pH-mètre (figure 1), les résultats sont traduits par le graphe de la figure 2.

1. Décrivez l'évolution du pH du lait à partir du graphe de la figure 2.

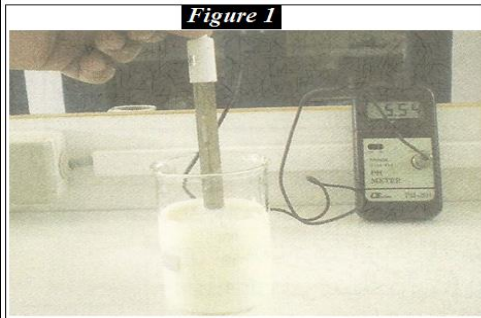
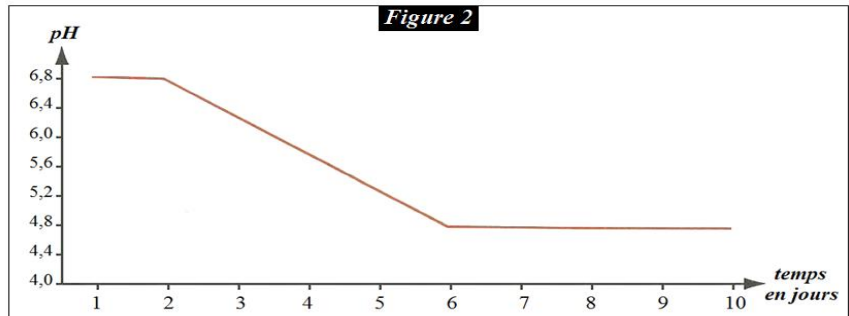
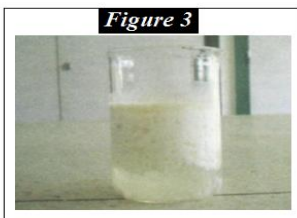
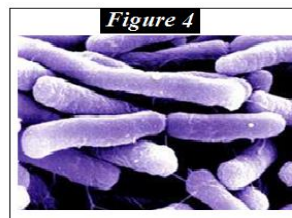
Pour expliquer l'évolution du pH du lait, on propose les données suivantes :

le lait contient le lactose, c'est un diholoside formé par l'union d'une molécule de glucose et d'une molécule de galactose.

à la fin de l'expérience, on note un changement de l'aspect du lait (figure 3) ; il devient un yaourt (lait caillé), d'autre part l'analyse chimique de ce yaourt met en évidence la présence d'une substance acide qui est l'acide lactique.

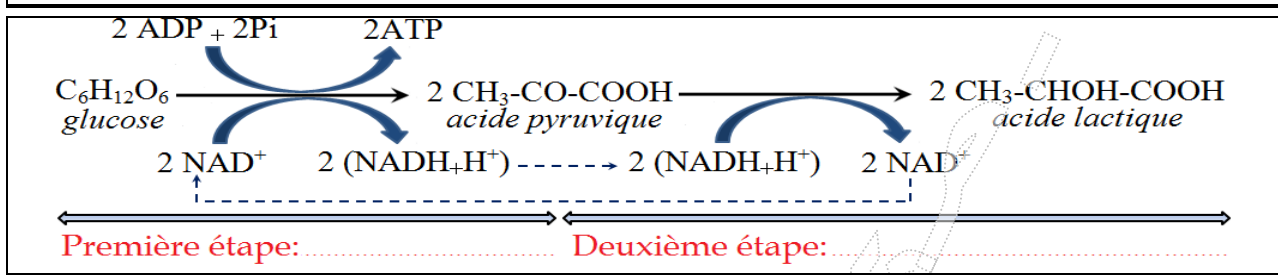
le lait frais contient des bactéries appelées les lactobacilles (figure 4), ces bactéries ont la capacité de former l'acide lactique à partir du glucose.

2. A partir des données précédentes, expliquez l'évolution de l'acidité du lait présentée par le graphe de la figure 2.

**Figure 1****Figure 2****Figure 3****Figure 4**

2.2. Les étapes de la fermentation lactique. (doc.16)

❖ La fermentation alcoolique se déroule dans le cytoplasme en deux étapes

Document 16:

- ✓ Première étape : La glycolyse.
- ✓ Deuxième étape : Transformation de l'acide pyruvique en acide lactique.
- ✓ L'acide pyruvique subit une réduction, il fixe des e^- et des H^+ provenant de la réoxydation de $\text{NADH} + \text{H}^+$ issu de la glycolyse, il en résulte la conversion de l'acide pyruvique en acide lactique.

2.3. Quelques caractéristiques de la fermentation alcoolique

- Au cours de la fermentation lactique, le dernier accepteur des e^- et des H^+ est l'acide pyruvique.
- Le bilan énergétique de la fermentation alcoolique est 2ATP.
- On écrit l'équation globale de la fermentation lactique comme suit :



➤ Définition : la fermentation lactique est une voie métabolique anaérobie réalisée par certaines bactéries (ainsi que les cellules musculaires de l'Homme des animaux), elle permet la décomposition partielle du glucose en acide lactique avec production d'une faible quantité d'énergie sous forme de deux ATP.

B. Définition de la fermentation

❖ La fermentation est une voie métabolique productrice d'énergie, c'est une suite de réactions chimiques anaérobies au cours desquelles un métabolite comme le glucose est décomposé partiellement, il en résulte la production d'un résidu organique et une faible quantité d'énergie sous forme ATP (car le résidu organique contient encore beaucoup d'énergie chimique potentielle).

V. Le rendement énergétique de la respiration et de la fermentation

❖ Exercice (doc. 17)

❖ Éléments de réponse

1. Pour la respiration, on a deux cas :

- ✓ Cas de 38 ATP comme bilan énergétique : $r = 40,81 \%$
- ✓ Cas de 36 ATP comme bilan énergétique : $r = 38,66 \%$
- ✓ Pour la fermentation alcoolique, $r = 2,15 \%$

2. Le rendement énergétique de la respiration est très supérieur à celui de la fermentation (alcoolique et lactique). On peut expliquer la différence constatée comme suit :

Pour la respiration :

Consommation d'O₂ → dégradation complète du glucose → bilan énergétique élevé (36 ou 38 ATP) → rendement énergétique élevé (40 %).

- Pour la fermentation :

Pas de consommation d'O₂ → dégradation incomplète du glucose → production d'un déchet organique riche en énergie (éthanol, acide lactique ...) → bilan énergétique très faible (2 ATP) → rendement énergétique très faible (2 %).

3. Pour la respiration :

- ✓ - cas de 38 ATP : $2840 \times 159 = 1681 \text{ kJ}$
- ✓ - cas de 36 ATP : $2840 \times 98 = 1742 \text{ kJ}$

Pour la fermentation alcoolique : $2840 \times ((2 \times 1360) + 61) = 59 \text{ kJ}$

Document 17:

Des mesures calorimétriques variées ont permis de calculer l'énergie globale que l'on peut extraire d'une mole de glucose à 37°C :

- l'oxydation complète d'une mole de glucose en présence d'O₂ dans une chambre calorimétrique libère 2840 kJ ;
- l'oxydation d'une mole de glucose en absence d'O₂ dans une chambre calorimétrique libère 140 kJ ;
- l'énergie contenue dans les déchets minéraux (CO₂ et H₂O) est 0 kJ ;
- l'énergie emmagasinée dans une mole de l'éthanol est 1360 kJ ;
- l'hydrolyse d'une mole d'ATP libère 30,5 kJ.

1. Calculez le rendement énergétique de la respiration et de la fermentation alcoolique. Le rendement énergétique est le % que représente l'énergie produite sous forme d'ATP par rapport avec la quantité globale de l'énergie emmagasinée dans le glucose ; on calcule le rendement énergétique en utilisant la formule suivante :

$$r = \frac{e}{E} \times 100$$

r : rendement énergétique en %

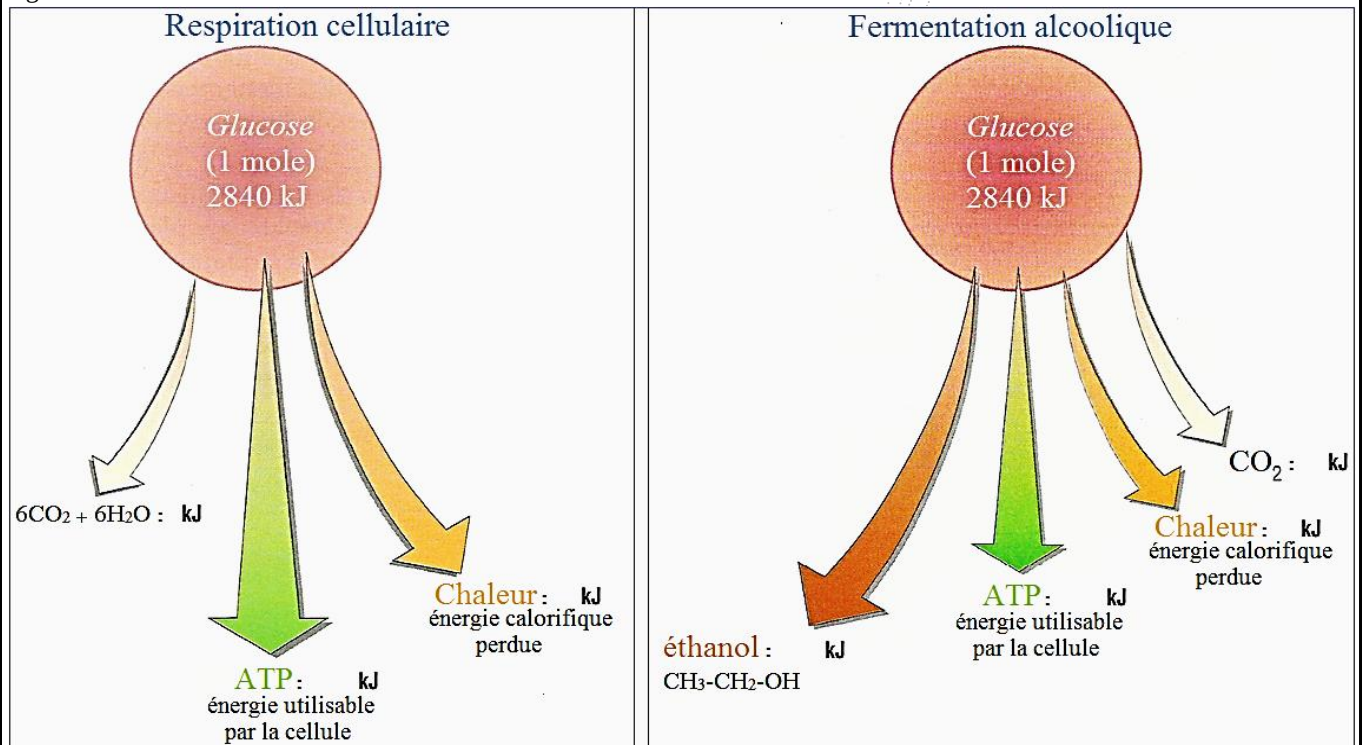
e : énergie contenue dans le nombre d'ATP issu de la respiration et de la fermentation

E : énergie globale emmagasinée dans une mole de glucose

2. Comparez le rendement de la respiration avec celui de la fermentation, puis expliquez la différence constatée.

Au des réactions métaboliques de la respiration et de la fermentation, une partie de l'énergie contenue dans les métabolites organiques est dissipée (perdue) sous forme de chaleur

3. Calculez la quantité d'énergie perdue sous forme de chaleur au cours de la respiration et la fermentation, puis complétez la figure ci-dessous.



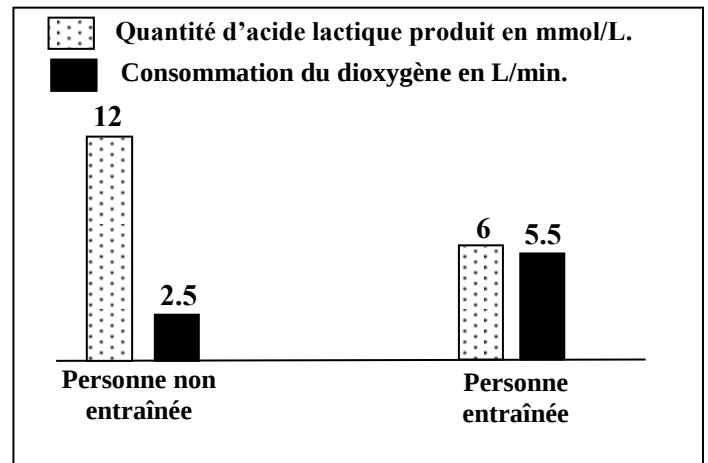
➤ **Exercice d'application** (Nor.Pc.2016)

➤ Afin d'étudier l'effet du manque d'exercices sportifs et du tabagisme (usage du tabac) sur les réactions responsables de la libération de l'énergie au niveau du muscle squelettique strié, on propose l'étude des données suivantes :

❖ Le manque d'exercices sportifs chez l'Homme augmente sa fatigabilité. Pour expliquer l'origine de cette fatigabilité, une comparaison de certaines caractéristiques des mitochondries a été effectuée chez deux personnes, l'une entraînée pour un exercice physique de puissance donnée et l'autre non entraînée. Le document 1 résume les résultats obtenus, alors que le document 2 donne les résultats de la comparaison de la production d'acide lactique et la consommation du dioxygène chez ces deux personnes.

	Personne entraînée	Personne non entraînée
Volume total des mitochondries par rapport au volume de la cellule musculaire	11%	5%
Activité des enzymes mitochondriales	importante	faible

Document 1



Document 2

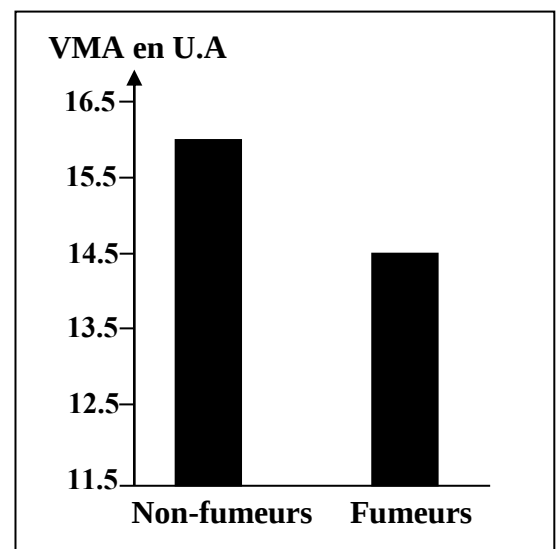
❖ **Remarque :** le phénomène de la fatigue musculaire est lié à la baisse des réserves d'ATP au niveau des fibres musculaires.

1. En **exploitant** les données des documents 1 et 2, **expliquez** l'augmentation de la fatigabilité observée chez la personne non entraînée. (1 pt)

❖ Pour mettre en évidence l'effet du tabagisme sur l'effort musculaire, un groupe d'élèves fumeurs a été soumis à un test de l'endurance. Ce test consiste à courir avec une vitesse qui croît progressivement de 1km/h toutes les deux minutes jusqu'à la fatigue totale. Ceci permet de déterminer la vitesse maximale aérobie (VMA) exprimant le volume maximal de dioxygène consommé par l'individu testé. Le document 3 représente les résultats, en unités arbitraires, obtenus chez ce groupe d'élèves comparés à un groupe témoin composé d'élèves non-fumeurs.

3. En **utilisant** le document 3, **comparez** l'endurance des élèves fumeurs à celle des élèves non-fumeurs.

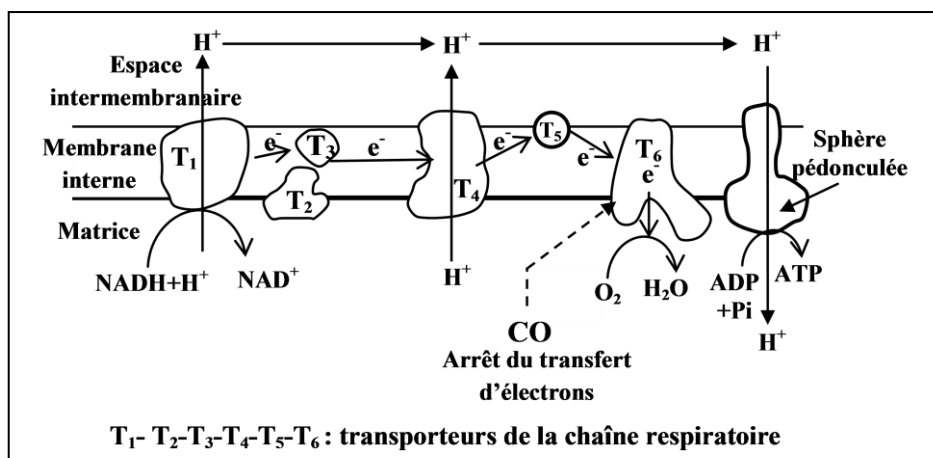
❖ La fumée de la cigarette contient le monoxyde de carbone (CO) qui se fixe sur le même site de fixation du dioxygène au niveau de l'hémoglobine. Le document 4 présente les résultats de mesure de la quantité du monoxyde de carbone transporté dans le sang et la quantité du dioxygène fixé sur l'hémoglobine chez des élèves fumeurs et des élèves non-fumeurs. Le document 5 montre le site de fixation du monoxyde de carbone au niveau de la chaîne respiratoire.



Document 3

❖ **Remarque** : l'hémoglobine est une protéine qui se trouve dans les globules rouges. Cette protéine joue un rôle important dans le transport du dioxygène vers les cellules.

	Quantité du dioxygène en mL/ g de l'hémoglobine	Quantité du monoxyde de carbone en mL/100mL du sang
Non-fumeurs	1.328	0.280
Fumeurs	1.210	2.200

Document 4Document 5

3. À l'aide des documents 4 et 5, **expliquez** comment agit le monoxyde de carbone sur le fonctionnement de la chaîne respiratoire et sur les réactions de libération d'énergie au niveau des mitochondries chez les élèves fumeurs. (1.5pt)

❖ Les **fumeurs** se plaignent souvent de crampes musculaires. Pour expliquer l'origine de ces crampes, on a mesuré, chez des élèves fumeurs et d'autres non-fumeurs, la concentration sanguine de l'acide lactique et du pH sanguin au niveau du sang veineux partant du muscle avant et après un exercice physique. Les résultats de ces mesures sont présentés dans le document 6.

	Avant l'effort musculaire	Après l'effort musculaire	
		Non-fumeurs	fumeurs
L'acide lactique au niveau du sang veineux	50 mg/L	150 mg/L	500 mg/L
pH du sang veineux	7.4	7.38	7.35

Document 6

4. En **exploitant** le document 6 et en vous **basant** sur vos réponses précédentes, **expliquez** la faible endurance et les crampes musculaires fréquentes chez les élèves fumeurs. (2 pts)

➤ Éléments de réponses (Nor.Pc.2016)

1	* Comparaison : Par rapport à l'individu entraîné, on observe chez l'individu non entraîné : - une diminution du volume globale des mitochondries accompagnée d'une réduction de l'activité enzymatique mitochondriale. - une augmentation de la quantité de l'acide lactique produit accompagnée d'une baisse de la consommation d'oxygène. * Explication : le non entraîné utilise principalement la voie anaérobie comme source de renouvellement de l'ATP → faible productivité d'ATP → fatigabilité élevée.
2	Chez les élèves fumeurs, la VMA est estimée à 15.8 UA, alors qu'elle est de 14.5 UA chez les non fumeurs, d'où la faible endurance des fumeurs par rapport à celle des non fumeurs.
3	* Par rapport aux élèves non fumeurs, on observe chez les élèves fumeurs une diminution du volume du dioxygène fixé à l'hémoglobine, et une augmentation du volume du monoxyde de carbone transporté par le sang. * Fixation du monoxyde de carbone sur le complexe T6 → arrêt du transfert d'électrons à travers les complexes de la chaîne respiratoire → absence du gradient des H⁺ → arrêt de production d'ATP par les sphères pédonculées.
4	- Après un effort musculaire on observe chez les fumeurs une augmentation importante de l'acide lactique et une diminution remarquable du pH au niveau du sang veineux partant du muscle. - Chez les fumeurs, le muscle reçoit une quantité importante du monoxyde de carbone au lieu du dioxygène → fixation du CO sur le complexe T6 → diminution de la synthèse de l'ATP par voie aérobie → utilisation de la fermentation lactique → production de l'acide lactique → diminution du pH du sang veineux partant du muscle → diminution de l'activité enzymatique du métabolisme énergétique → faible production d'ATP → fatigue et crampes musculaires.