

AP # 4 : LA RESPIRATION

Les cellules végétales utilisent la matière produite par photosynthèse pour assurer leur croissance, réaliser des réserves (amidon polymère de glucose dans le tubercule de pomme de terre par exemple) et produire de l'énergie en oxydant du glucose. Nous savons, depuis la 2nde que ce sont les mitochondries qui produisent l'énergie nécessaires au fonctionnement cellulaire grâce à ce que l'on peut maintenant en Spécialité appeler oxydation du glucose par l'O₂ : c'est la respiration cellulaire. Joël de Rosnay a écrit dans Le macroscopie (1975) :

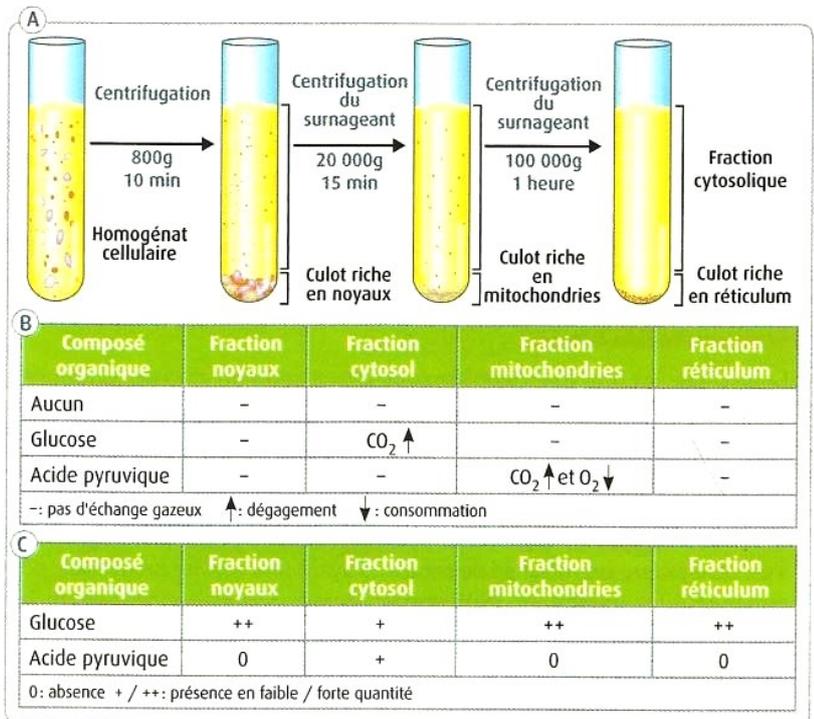
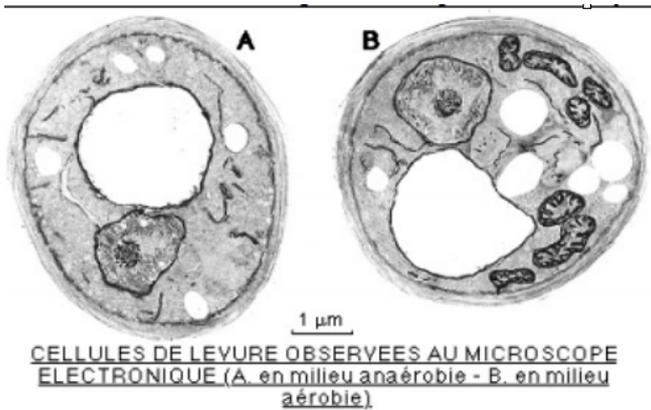
« *Tout ce qui vit utilise une molécule véhiculant une réserve d'énergie et jouant le rôle d'une sorte de batterie portable partout où la cellule a besoin de fournir un travail chimique, mécanique, ou électrique. Cette molécule s'appelle ATP.* »

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

En analysant le corpus avec le plus de rigueur et précision, vous répondrez à la problématique ci-dessus : qu'est-ce que la respiration cellulaire chimiquement ? Où a-t-elle lieu ? Correspond-elle à des réactions d'oxydoréductions comme la photosynthèse ?

Activité 1 : Mise en évidence de la respiration mitochondriale

Rappel de 2nde : observation de levures en aérobiose et anaérobiose et localisation cellulaire de la respiration



2 Une expérience pour localiser la respiration au niveau cellulaire. Des levures sont lysées et les différents compartiments cellulaires sont séparés *in vitro* par plusieurs étapes de centrifugation (A). Les échanges gazeux sont mesurés en aérobiose, en absence ou en présence de glucose ou d'acide pyruvique, sur les différentes fractions obtenues. Les résultats sont présentés dans le tableau (B). Les taux de glucose et d'acide pyruvique sont mesurés au bout de 12h dans les fractions incubées dans un milieu initialement glucosé et sans acide pyruvique. Les résultats sont présentés dans le tableau (C).

document informatif : énergie potentielle chimique de quelques molécules

Glucose	2840 kJ/mol d'ATP
Ethanol	1360 kJ/mol d'ATP
Acide lactique	1340 kJ/mol d'ATP
CO ₂	0 kJ/mol d'ATP
H ₂ O	0 kJ/mol d'ATP

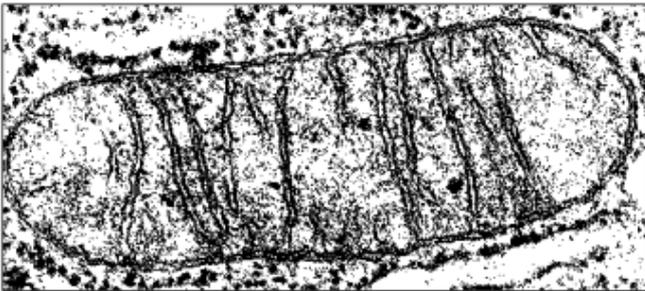
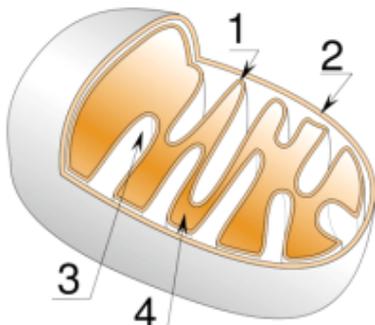
Activité 2 : la glycolyse : expériences historiques de Buchner et Meyerhof

La glycolyse est une voie hyaloplasmique d'oxydation du glucose commune à la respiration et à la fermentation. Elucidée après plus de 40 ans de recherche.

Le chimiste Eduard Buchner, qui étudie la fermentation, constate que « la complexité de la levure n'est pas indispensable à ce processus ». Il émet l'hypothèse que « le ferment actif n'est qu'une substance dissoute, sans doute une protéine » qu'il baptise la « zymase ». La « zymase » s'est révélé être un mélange de protéine ayant une activité catalytique, ou enzymes. En 1905 avait été montré que les extraits cellulaires permettant la glycolyse doivent également contenir du phosphate inorganique, de l'ADP et un oxydant R'.

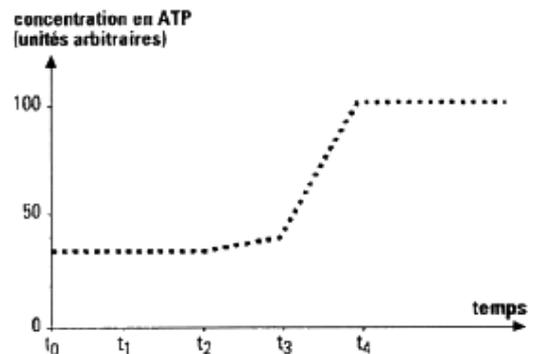
Otto Meyerhof contribue finalement à élucider les 9 étapes de la glycolyse. L'oxydation d'une molécule de glucose lors de la glycolyse produit 2 molécules d'acide pyruvique. Elle est couplé à la réduction de 2 composés R' et R'H₂ (chimiquement proches de R- et RH₂ qui interviennent dans la photosynthèse') et la phosphorylation de 2 molécules d'ADP.

Afin de mieux comprendre le rôle des différents compartiments, on réalise une expérience sur une suspension de mitochondries. On réalise une expérience sur une suspension de mitochondries, obtenue par centrifugation d'un broyat cellulaire, et placée dans une enceinte de réaction, dans un milieu approprié et bien oxygéné,

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

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

à t₀ : ajout de saccharose
à t₁ : ajout de glucose
à t₂ : ajout de pyruvate
à t₃ : ajout d'ADP + Pi* + pyruvate
à t₄ : ajout de cyanure (produit qui bloque l'activité enzymatique)
Pi* : phosphate inorganique



Activité 3 : les réactions chimiques mitochondriales

Document : Les réactions chimiques mitochondriales

Certains traitements permettent d'isoler les différentes fractions de la mitochondrie. Ces dernières sont placées en présence de pyruvate et/ou d'O₂ et la présence de CO₂ est recherchée.

Expérience 1 : Etude du dégagement de CO₂ pour différentes fractions mitochondriales

Structure étudiée	Ajout de Pyruvate	Ajout de pyruvate et d'O ₂
Membrane externe	Pas de CO ₂ produit	Pas de CO ₂ produit
Membrane interne	Pas de CO ₂ produit	Pas de CO ₂ produit
Matrice	Dégagement de CO ₂	Dégagement de CO ₂

Expérience 2: Mesures de l'absorbance à 350nm de différentes solutions

Certains composés absorbent différemment les longueurs d'onde selon qu'ils sont à l'état oxydé ou réduit. Ainsi R'H₂ absorbe les longueurs d'onde à 350 nm alors que R' ne les absorbe pas.

La réduction de composés R' en R'H₂ est recherchée en incubant différentes substances impliquées dans la respiration et en suivant l'absorbance à 350nm.

L'oxydation du pyruvate en CO₂ est due à un ensemble de réactions d'oxydoréduction formant une suite cyclique de réactions appelées cycle de Krebs.

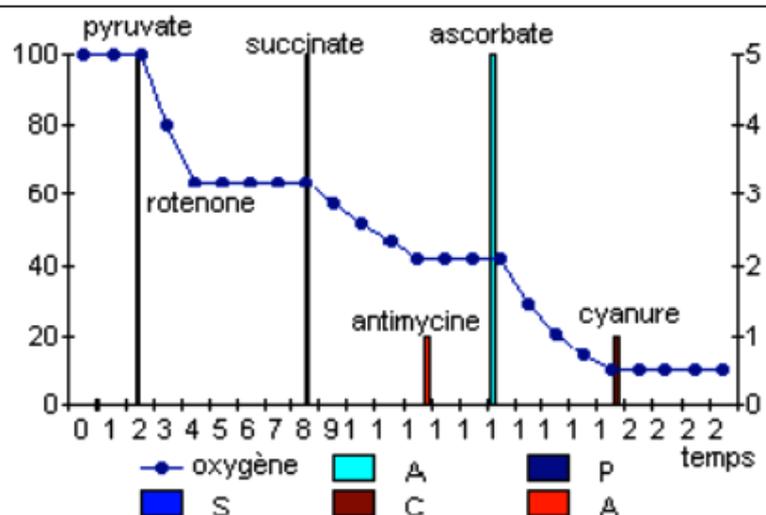
Solutions testées	Absorbance à 350nm
Composé oxydé R'	0
Composé réduit R'H ₂	0,35
Protéines de la matrice + R'	0
Protéines de la matrice + glucose + R'	0
Protéines de la matrice + pyruvate + R'	0,25

Fraction mitochondriale utilisée	Résultats
Fragments de membrane externe	Pas de production d'ATP Pas d'oxydation des composés R'H ₂ en R' (en présence de dioxygène)
Fragments de membrane interne	Production d'ATP Oxydation des composés R'H ₂ en R' (en présence de dioxygène)

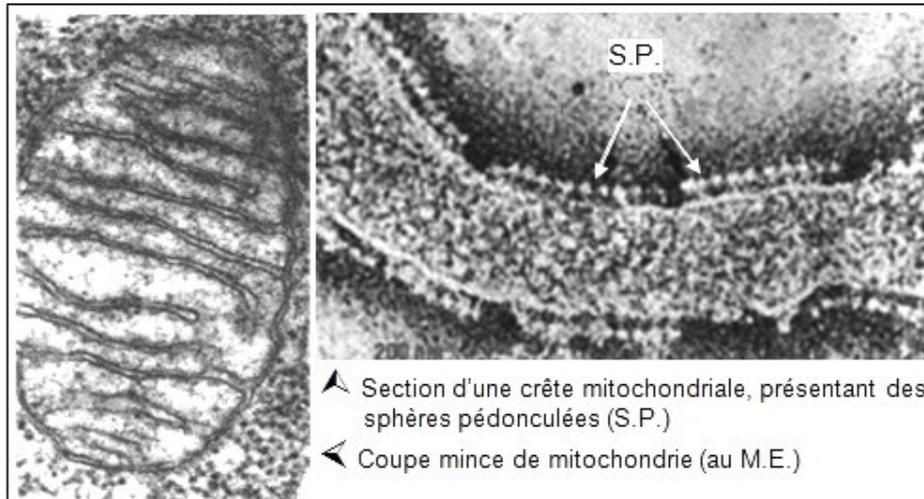
Activité 4 : les réactions chimiques de la membrane interne mitochondriale, la chaîne respiratoire

- Ajout de substrats :
 Au temps t1(0 sec) on ajoute une petite quantité de glucose (molécule en C6),
 Au temps t2 on ajoute du pyruvate (molécule en C3) ou du succinate (molécule en C4), (choisies parce que c'est notamment sous ces formes moléculaires que le glucose est transformé dans le cytoplasme).

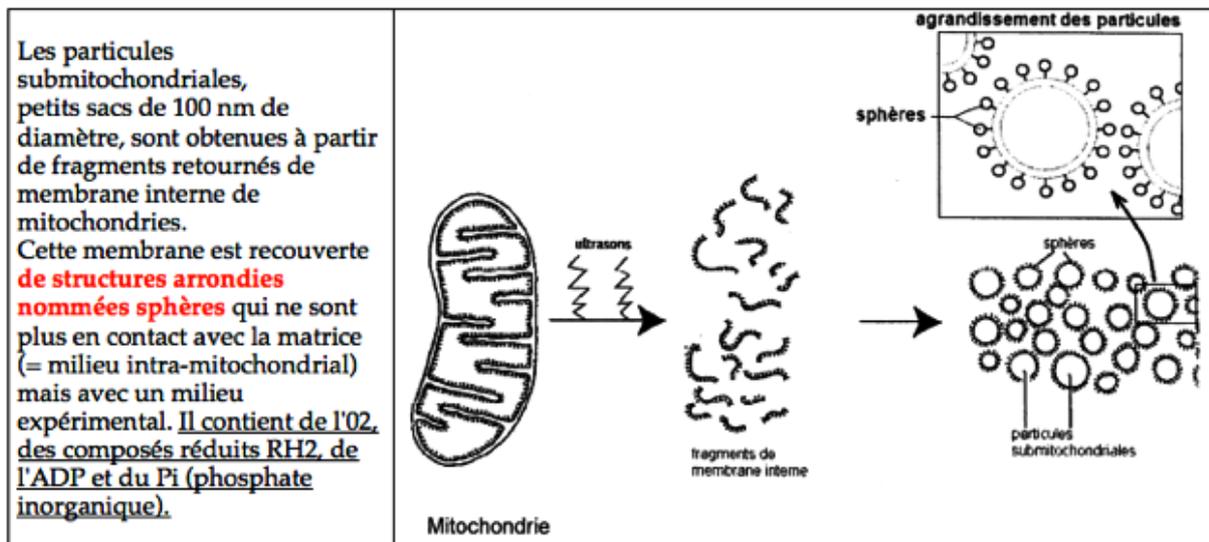
- Ajout d'inhibiteurs du fonctionnement mitochondrial :
Antimycine qui bloque des enzymes présentes dans la membrane des crêtes.
Roténone, insecticide d'origine végétale qui agit sur des enzymes présentes dans la membrane des crêtes mitochondriales.



Electronographie d'une crête mitochondriale



expérience



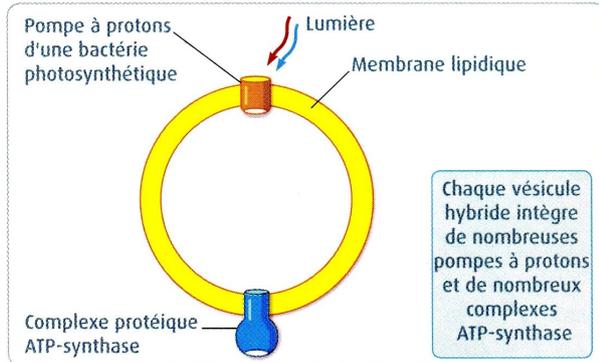
Conditions	Résultats
Particules submitochondriales	Synthèse d'ATP et réoxydation des R'H ₂ en R ⁺
Particules submitochondriales sans les sphères.	Pas de synthèse d'ATP mais réoxydation des RH ₂ en R ⁺
Particules submitochondriales sans les sphères, mais ajout de sphères isolées dans le milieu	Synthèse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

Remarque : en l'absence de composés réduits RH₂, il n'y a pas de synthèse d'ATP.

Fonctionnement de l'ATP-synthase mitochondriale Interpréter des données expérimentales

On dispose :

- de vésicules lipidiques comprenant des ATP-synthases de membranes internes mitochondriales.
- de vésicules lipidiques comprenant des pompes à protons d'une bactérie photosynthétique, activables par la lumière.



1. Organisation des vésicules hybrides.

On fait fusionner les deux types de vésicules, puis on incube les vésicules hybrides obtenues dans une solution contenant de l'ADP et des ions phosphate (doc. 1). Le tableau du doc. 2 présente les résultats de mesures de pH et de concentration en ATP, après 10 minutes d'incubation.

	pH dans les vésicules	ATP dans le milieu
Sans lumière	Neutre	Nulle
Avec lumière	Acide	Élevée

2. Résultats des mesures intravésiculaire de pH et de concentration en ATP dans le milieu d'incubation.

QUESTIONS

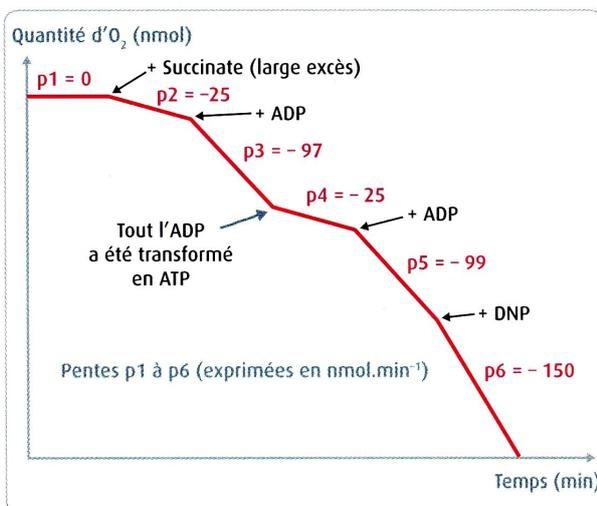
- 1 Rappelez l'origine physiologique du gradient de protons au niveau d'une mitochondrie.
- 2 Analysez les résultats expérimentaux (doc. 2) et interprétez-les.

Le flux d'électrons le long de la chaîne respiratoire S'informer et raisonner

On suit l'évolution de la concentration d'O₂ dans une suspension de mitochondries initialement dépourvue de substrat respiratoire. On teste les effets d'un ajout successif de différentes substances :

- le succinate, molécule organique dont l'oxydation au cours du cycle de Krebs est couplée à la production de R'H₂.
- l'ADP.
- le 2,4 dinitrophénol (DNP), substance liposoluble qui rend les membranes perméables aux protons.

Le doc. 2 fournit des éléments utiles à l'interprétation des résultats.



1. Effets du succinate, de l'ADP et du DNP sur la consommation d'O₂ par des mitochondries.

Un oxygramme mitochondrial est une représentation graphique de la concentration d'O₂ en fonction du temps, dans une suspension de mitochondries. La pente de la courbe correspond à la vitesse de consommation d'O₂, qui traduit le flux d'électrons le long de la chaîne respiratoire.

À tout instant, ce flux d'électrons dépend :

- de la quantité de composé R'H₂ disponible (plus R'H₂ est abondant, plus le flux est élevé, toutes conditions identiques par ailleurs).
- de la différence de concentration en protons de part et d'autre de la membrane interne mitochondriale (plus le gradient de proton est important, moins le flux est élevé).

2. Interprétation d'un oxygramme mitochondrial.

QUESTIONS

- 1 Rappelez à quelle étape de la respiration cellulaire l'O₂ est utilisé, et précisez son devenir. Justifiez que la consommation d'O₂ soit un indicateur du flux d'électrons dans la chaîne respiratoire.
- 2 Décrivez l'effet du succinate, de l'ADP, et du DNP sur la consommation d'O₂.
- 3 Proposez une interprétation de ces résultats (votre réponse peut prendre la forme d'un schéma annoté localisant l'effet des 3 molécules ajoutées).

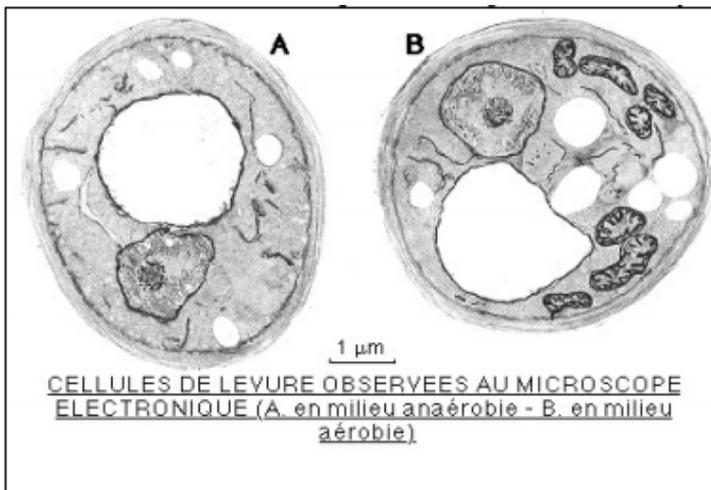
Corrigé de l'AP # 4 : LA RESPIRATION

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

En analysant le corpus avec le plus de rigueur et précision, vous répondrez à la problématique ci-dessus : qu'est-ce que la respiration cellulaire chimiquement ? Où a-t-elle lieu ? Correspond-elle à des réactions d'oxydoréductions comme la photosynthèse ?

Activité 1 : Mise en évidence de la respiration mitochondriale

Rappel de 2nde : Observation de levures en aérobiose et anaérobiose



En généralisant, des observations de tissus variés, dans des conditions physiologiques différentes, montrent que plus une cellule est active, plus elle possède de mitochondries et plus les crêtes de leurs membranes internes sont développées.

Les levures en anaérobiose présentent des mitochondries peu développées. Sachant que l'activité d'une cellule nécessite de l'énergie, on peut supposer que les mitochondries sont impliquées dans les mécanismes qui produisent de l'énergie → **Respiration.** (et plus précisément, les membranes internes).

Les levures sont des champignons unicellulaires dépourvus de chlorophylle. Comme les cellules animales, elles sont hétérotrophes et consomment des substances organiques qui peuvent être soit stockées, soient puisées dans le milieu. Nous savons que la respiration est un phénomène qui consomme du dioxygène et rejette du dioxyde de carbone. Nous savons aussi que ces échanges de gaz s'accompagnent de l'oxydation de nutriments organiques, comme le glucose. L'observation au microscope électronique de levures ayant séjourné dans des conditions aérobies. En généralisant, des observations de tissus variés, dans des conditions physiologiques différentes, montrent que plus une cellule est active, plus elle possède de mitochondries et plus les crêtes de leurs membranes internes sont développées. Les levures en anaérobiose présentent des mitochondries peu développées. Sachant que l'activité d'une cellule nécessite de l'énergie, on peut supposer que les mitochondries sont impliquées dans les mécanismes qui produisent de l'énergie Respiration. (et plus précisément, les membranes internes).

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

L'observation au ME de levures ayant séjourné dans des conditions aérobies révèle donc de nombreuses mitochondries au sein de leur hyaloplasme et des crêtes mitochondriales internes plus développées.

Les levures ayant séjourné dans des conditions anaérobies (sans dioxygène) montrent des mitochondries peu abondantes et de petites tailles qui ne possèdent pas de crêtes.

expérience de localisation de la respiration cellulaire

objectif de l'expérience	séparer les différents compartiments intracellulaires pour localiser la respiration cellulaire condition initiale commune : milieu initialement glucosé.
C	<p>tableau B : - pour la fraction noyau + RE : aucun échange ne se produit, avec ou sans glucose ou acide pyruvique et le taux de glucose initialement mis dans le milieu reste le même.</p> <ul style="list-style-type: none"> - pour la fraction cytosolique + glucose, on a un dégagement de CO₂ - pour la fraction mitochondrie + acide pyruvique : on a consommation de O₂ et dégagement de CO₂. <p>Ce sont les 2 seuls cas où l'on observe des échanges</p> <ul style="list-style-type: none"> - pour la fraction cytosol avec dégagement du CO₂ avec glucose, après 12 heures, on a diminution du taux de glucose initialement mis en milieu et faible présence d'acide pyruvique. <p>Pour la fraction mitochondries, le taux de glucose en milieux reste le même.</p>
I	<p>1/ la localisation de la glycolyse est hyaloplasmique (dans le cytosol, = le cytoplasme sans ses organises)</p> <p>2/ l'acide pyruvique est produit dans la fraction cytosolique par consommation de glucose (= glycolyse)</p> <p>3/ La fraction mitochondriale est elle le lieu de la respiration cellulaire.</p>
conclusion	Ces résultats sont en faveur du modèle suivant : la glycolyse, cytosolique, correspond à la dégradation du glucose en acide pyruvique. L'acide pyruvique est ensuite pris en charge par les mitochondries, et son utilisation s'accompagne d'un dégagement de dioxyde de carbone et d'une consommation de dioxygène, échanges gazeux caractéristiques de la respiration.

document informatif : énergie potentielle chimique de quelques molécules

D'après le tableau de l'énergie potentielle chimique de certaines molécules, on observe que le glucose possède une énergie potentielle chimique environ deux fois plus importante que l'éthanol et l'acide lactique, tandis que le CO₂ et l'H₂O ne produisent pas d'énergie chimique ⇒ **donc on peut supposer que le glucose est une des molécules étroitement impliqué dans la respiration cellulaire et la création d'énergie.**

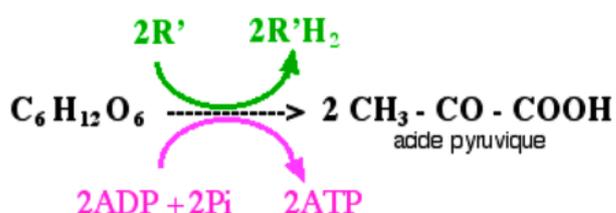
expérience

objectif de l'expérience	
C / I	<ul style="list-style-type: none"> - l'injection de glucose à to, n'induit aucune variation de la [O₂] : il n'est pas le substrat des réactions consommant l'O₂ - les injections de pyruvate et succinate induisent une diminution de l' O₂ ; ce sont des substrats utilisés dans les mitochondries - la respiration, oxyde non pas le glucose mais des substrats qui résultent de premières réactions qui se déroulent dans le cytoplasme. Une première étape se déroule donc dans le cytoplasme, elle semble viser à dégrader le glucose (glycolyse) - l'injection d'inhibiteurs enzymatiques se traduit par un arrêt de la consommation d' O₂ ; il existe dans la membrane interne des mitochondries des enzymes qui catalysent les réactions de la respiration, à partir des substrats formés dans le cytoplasme.
conclusion	Une 2ème étape se déroule donc dans la membrane interne des mitochondries et mobilise des enzymes.

Activité 2 : la glycolyse : expériences historiques de Buchner et Meyerhof

La glycolyse est une voie cytoplasmique d'oxydation anaérobie du glucose commune à la respiration et la fermentation.

L'oxydation du glucose accompagnée de la réduction d'un transporteur R = le NAD se fait selon l'équation-bilan : Glucose + 2 (ADP + Pi) + NAD ⇒ 2 molécules d'acide pyruvique + 2 ATP + 2 NADH,H⁺



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

I : d'après les résultats obtenus, on en déduit que :

- la production d'ATP, via la respiration nécessite, nécessite pyruvate (substrat) + ADP + Pi
- les réactions de la respiration, se déroulant dans la membrane des crêtes mitochondriales, catalysées par des enzymes et utilisant un substrat provenant de réactions cytoplasmiques, produisent de l'ATP (énergie)

Activité 3 : les réactions chimiques mitochondriales

I :

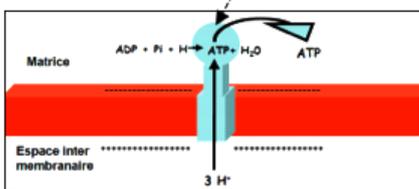
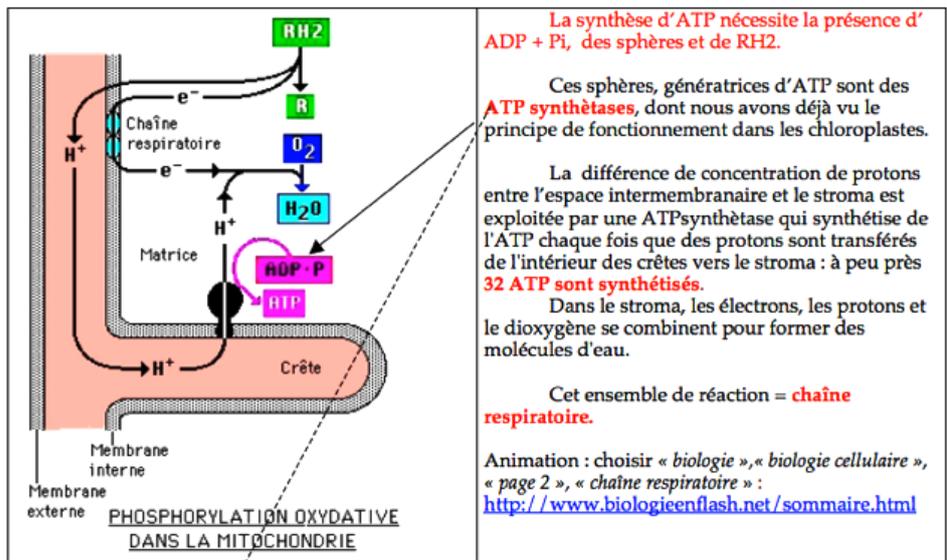
expérience 1	la mitochondrie produit du CO ₂ matriciel avec du pyruvate en anaérobiose ou aérobiose contrairement aux membranes.
expérience 2	les composés réduits RH ₂ absorbent à 350nm et les protéines matricielles combinées au pyruvate et à R absorbent à 350nm ⇒ donc cela signifie que cette solution "protéines matricielles + pyruvate + R " permettent la production du RH ₂ , composé réduit, ce qui n'est pas le cas pour les autres solutions.

En présence d'O₂, la membrane externe mitochondriale ne produit pas d'ATP et n'oxyde pas les molécules RH₂ alors que la membrane interne produit de l'ATP et oxyde les composés RH₂.

Activité 4 : les réactions chimiques de la membrane interne mitochondriale, la chaîne respiratoire

Le cyanure bloque le transfert d'électrons au sein de la chaîne respiratoire, Et cela empêche la consommation de dioxygène.

<http://www.edumedia-sciences.com/fr/media/191>



Electronographie d'une crête mitochondriale : elle nous montre que des sphères pédonculées sont présentes. Ce sont des enzymes : les ATP synthases, intervenant dans la synthèse de l'ATP. Donc, une production d'ATP a lieu au niveau des crêtes mitochondriales.

FONCTIONNEMENT DE L'ATP-SYNTHASE MITOCHONDRIALE

1. Dans la mitochondrie, le gradient de protons est généré lors du flux d'électrons dans la chaîne respiratoire de la membrane interne. Il est donc une conséquence de la réoxydation des composés $R'H_2$ issus de la glycolyse et du cycle de Krebs.

2. À l'obscurité, le pH dans les vésicules hybrides reste neutre, alors qu'à la lumière, ce pH devient acide (il diminue). Cela montre que les pompes à protons bactériennes sont orientées de telle façon qu'elle prélèvent des protons en dehors des vésicules et les libèrent dans le milieu intravésiculaire.

À la lumière (mais pas à l'obscurité), de l'ATP apparaît dans le milieu d'incubation. Cet ATP est issu de la phosphorylation de l'ADP disponible. Elle a lieu au niveau des complexes protéiques ATP-synthase. Ces complexes couplent un flux de protons (ici, un flux sortant) avec la synthèse de l'ATP. Il y a donc le même couplage entre gradient protonique et synthèse d'ATP que dans les mitochondries, mais l'origine du gradient protonique est différente.

6 Le flux d'électrons le long de la chaîne respiratoire

① L' O_2 est consommé en tant qu'accepteur final des électrons de la chaîne respiratoire. Il est réduit en H_2O . La consommation d' O_2 reflète donc l'intensité du flux d'électrons dans la chaîne respiratoire.

② Le succinate induit une faible consommation d' O_2 ($25 \text{ nmol} \cdot \text{min}^{-1}$). L'ajout d'ADP (le succinate étant encore disponible car fourni en large excès) fait augmenter cette consommation ($97 \text{ nmol} \cdot \text{min}^{-1}$) jusqu'à ce que tout l'ADP ait été phosphorylé en ATP. Le DNP permet d'atteindre une consommation d' O_2 de $150 \text{ nmol} \cdot \text{min}^{-1}$.

③ Le succinate est une molécule organique dont l'oxydation au cours du cycle de Krebs est couplée à la production de $R'H_2$. L'ajout de succinate au milieu, initialement dépourvu de substrat respiratoire, provoque une augmentation de la concentration de $R'H_2$, donc un flux de protons le long de la chaîne respiratoire (voir doc. 2), et une consommation d' O_2 , accepteur final de ces électrons.

La phosphorylation de l'ADP est couplée à un flux de protons de l'espace intermembranaire vers la matrice des mitochondries, au niveau des ATP-synthases. L'ajout d'ADP fait diminuer la différence de concentration en protons de part et d'autre de la membrane, ce qui accélère le flux de protons le long de la chaîne respiratoire (voir doc. 2), et donc la consommation d' O_2 .

Le DNP rend les membranes perméables aux protons. Comme dans le cas de l'ajout d'ADP, le gradient protonique est alors dissipé et il ne limite plus le flux de protons. Mais il n'y a pas d'ATP formé dans ces conditions, puisque le flux de protons n'est plus canalisé au niveau des ATP-synthases.

a/ la glycolyse, dans le cytoplasme

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

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

0.

Quelques caractéristiques :

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

b/ Les réactions se poursuivent dans la matrice

La dégradation des métabolites amorcée dans le cytoplasme, se poursuit dans les mitochondries : dans la matrice, l'acide pyruvique est totalement dégradé sous l'action d'enzymes (décarboxylases et déshydrogénases): du dioxyde de carbone est libéré, les transporteurs de protons et d'électrons sont réduits (R'H₂) et de l'ATP est produit.

L'acide pyruvate st littéralement « broyé » au cours d'un cycle de réactions nommé « cycle de Krebs »

au cours duquel des carbones sont « arrachés » : décarboxylations (2 CO₂), ainsi que des hydrogènes :

déshydrogénations (2 RH₂)

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

c) ...puis dans les crêtes mitochondriales.

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

Au niveau de la membrane interne (crêtes) les molécules de transporteurs réduits (RH₂) sont régénérées (R+) grâce à des molécules spécialisées (enzymes) qui constituent la chaîne respiratoire et assurent une série de réactions d'oxydo-réduction. Le dioxygène constitue l'accepteur final de protons et d'électrons: lui-même réduit, il permet la formation de molécules d'eau. Les protons apportés par les transporteurs d'hydrogène sont transférés du stroma vers l'intérieur des crêtes (contre leur gradient de concentration), alors que les électrons sont transférés vers le stroma. De ce fait l'intérieur des crêtes devient acide (la concentration en protons a

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

BILAN : C₆H₁₂O₆ + 6 O₂ + 38 ADP + 38 Pi ----> 6 CO₂ + 6 H₂O + 38 ATP

Les RH₂ n'apparaissent pas dans le bilan car la chaîne respiratoire réoxyde les 12 RH₂ par molécule de glucose produits lors de la glycolyse (2 RH₂ par molécule de glucose) et du cycle de Krebs (2 x 5 = 10 RH₂ par molécule de glucose).

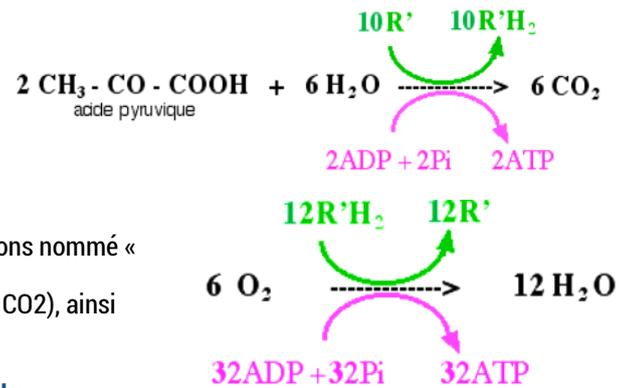


Tableau bilan :

	nom	localisation	Substrat(s) utilisé(s)	Produit(s) formé(s)	Nombre d'ATP formés
Première étape	glycolyse	hyaloplasme	1 glucose R'	2 pyruvates R'H ₂	2
Deuxième étape	Décarboxylations oxydatives	Matrice de la mitochondrie	2pyruvates R'	6CO ₂ R'H ₂	2
Troisième étape	Chaîne respiratoire	Crêtes mitochondriales	R'H ₂ 602	R' 12H ₂ O	32

BILAN : schéma :

