

Thème 2: Énergie et cellule vivante

« Tout système vivant échange de la matière et de l'énergie avec ce qui l'entoure. Il est le siège de couplages énergétiques. »

Les végétaux chlorophylliens sont autotrophes au carbone: ils produisent leur propre matière organique en utilisant uniquement des matières minérales (eau, sels minéraux) et de l'énergie lumineuse lors de la photosynthèse. À l'inverse, les organismes hétérotrophes au carbone doivent prélever, dans leur environnement, de la matière organique élaborée par d'autres êtres vivants pour élaborer leur propre matière organique. La matière organique est aussi utilisée pour produire l'énergie nécessaire au métabolisme cellulaire, et aux activités consommatrices d'énergie telles que la contraction musculaire qui met en œuvre une énergie mécanique. Il existe ainsi, à l'échelle de la biosphère et des écosystèmes, un flux énergétique intimement lié aux cycles de la matière permettant de passer de l'énergie lumineuse à l'énergie chimique et mécanique.

Comment la matière organique est-elle fabriquée par les végétaux chlorophylliens puis utilisée comme source d'énergie par les cellules ?

Chapitre I: La photosynthèse: de l'énergie lumineuse à l'énergie chimique

Grâce à l'énergie lumineuse, les végétaux réalisent la photosynthèse dans leurs parties chlorophylliennes. Ils synthétisent ainsi de la matière organique à partir d'eau, de sels minéraux et de dioxyde de carbone selon la réaction suivante: $2 \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{lumière} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$

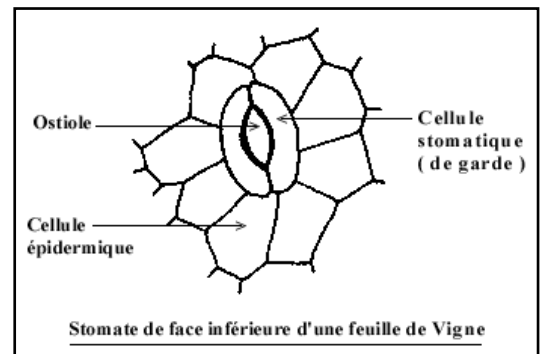
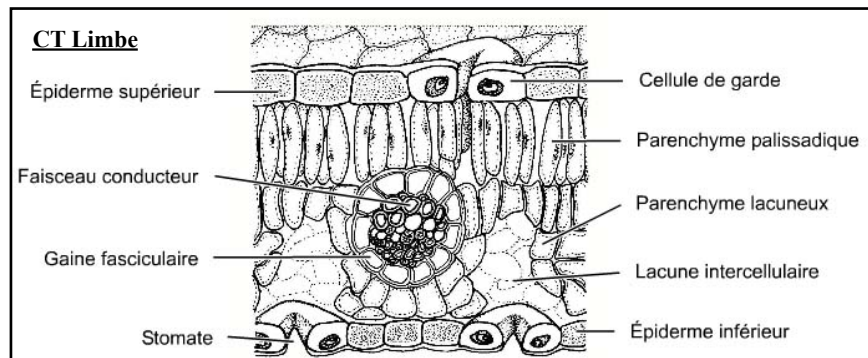
Comment l'énergie lumineuse est-elle convertie en "énergie chimique" par les cellules chlorophylliennes ?

I: La cellule chlorophyllienne et la photosynthèse

1: La feuille, un organe spécialisé dans la photosynthèse

Les feuilles présentent un rapport surface/volume très élevé: la surface est maximale et le volume est minimal grâce à une structure plate. Des coupes transversales de feuilles de végétaux montrent :

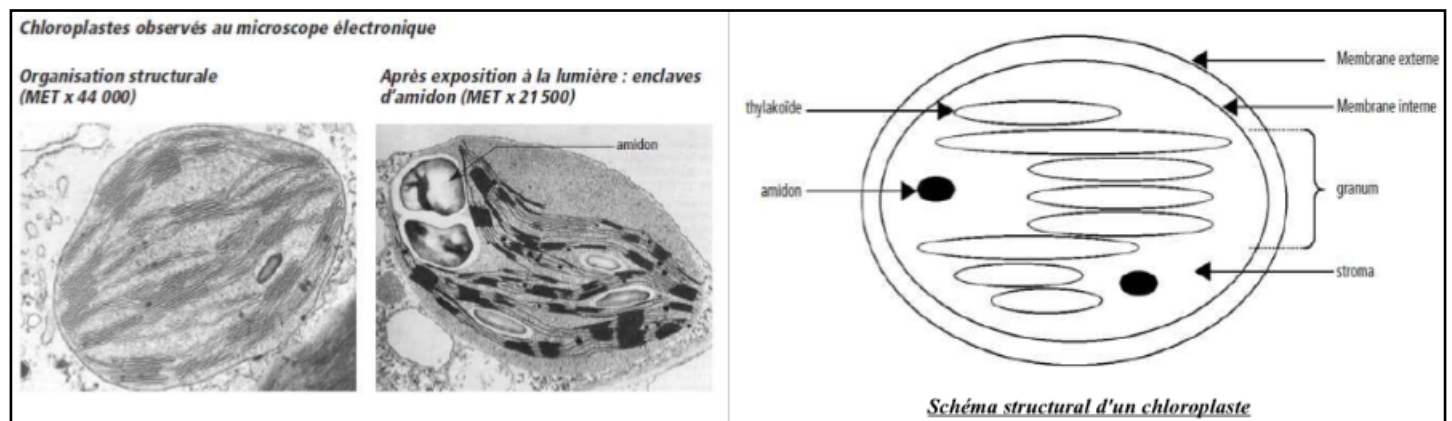
- Un épiderme supérieur formé d'une seule couche de cellules non chlorophylliennes, parfois recouvert d'une couche cireuse (protectrice), la cuticule, peu perméable aux échanges de gaz ou d'eau (évite la dessiccation).
- Un parenchyme chlorophyllien palissadique constitué de cellules riches en chloroplastes, aux parois minces et aux vacuoles bien développées: ce tissu situé dans la face supérieure de la feuille particulièrement exposée à la lumière est la zone principale de capture de l'énergie lumineuse.
- Un parenchyme chlorophyllien lacuneux dans lequel les cellules sont disjointes (méats) : c'est une surface d'échange où la capture de l'énergie lumineuse est moindre mais où la capture du CO_2 est très forte.
- Un épiderme inférieur, non chlorophyllien, recouvert de cires et régulièrement interrompu par des perforations: les stomates



Les stomates permettent les échanges gazeux entre l'atmosphère et le milieu intérieur de la plante (entrée de CO_2 , sortie d' O_2 et évaporation d'eau). Les stomates sont formés par deux cellules de garde (chlorophylliennes) entourant un orifice appelé ostiole. L'ouverture de l'ostiole est variable et peut être contrôlée. Ils s'ouvrent à la lumière et se ferment à l'obscurité ou lors de fortes chaleurs. Les stomates sont présents principalement sur les faces inférieures des feuilles afin de réaliser une économie d'eau.

2: Les chloroplastes, des organites spécialisés dans la photosynthèse

Les chloroplastes sont des organites spécifiques du règne végétal, caractéristiques des cellules chlorophylliennes où se déroule la photosynthèse. Le chloroplaste est constitué d'une double membrane, comme les mitochondries, délimitant un espace interne appelé le stroma. Dans le compartiment interne du chloroplaste se trouvent de nombreux disques ou thylakoïdes, qui, empilés, forment le Granum). Les membranes de ces thylakoïdes sont très riches en protéines (transporteurs de protons, d'électrons, ATPsynthétase) et pigments photosynthétiques.



2.1: L'absorption de la lumière par les pigments chlorophylliens

Il est possible d'extraire, par chromatographie, les différents pigments présents dans les chloroplastes d'une feuille. On distingue ainsi les chlorophylles a et b, les xanthophylles et les carotènes. Les pigments photosynthétiques sont regroupés dans la membrane des thylakoïdes en complexes pigment protéine appelés photosystèmes.

Un pigment est une substance colorée qui absorbe certaines longueurs d'ondes de la lumière et renvoie toutes les autres (ce qui détermine la couleur du végétal). En utilisant un spectromètre, on détermine le spectre d'absorption des pigments verts chlorophylliens qui absorbent la lumière pour des longueurs d'ondes de 450-500 nm (bleu) et 650-700 nm (rouge).

Le spectre d'absorption de la chlorophylle brute correspond à la combinaison des spectres d'absorption des différents pigments constituant la chlorophylle brute; la diversité des pigments permet d'élargir le spectre d'absorption de la chlorophylle brute ce qui permet à la plante d'absorber de nombreuses longueurs d'ondes différentes.

Comme le spectre d'absorption des pigments correspond au spectre d'action de la photosynthèse mis en évidence par l'expérience d'Engelmann, on peut dire que c'est l'absorption de certaines longueurs d'ondes par les pigments qui permet la photosynthèse; on parle de pigments photosynthétiques.

L'absorption de la lumière par les chloroplastes s'accompagne d'une libération de O_2 . Les expériences de Ruben montrent que le d'oxygène libéré provient de l'oxydation de l'eau. A l'obscurité, la production de O_2 cesse instantanément (Gaffron): **la lumière est indispensable pour l'oxydation de l'eau; on parle de photolyse de l'eau ou phase photochimique: $2 H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$**

2.2: La réduction du carbone

La coloration à l'eau iodée de chloroplastes préalablement éclairés révèle la présence d'amidon formant des grains d'amidon au sein du stroma (absents chez le témoin non éclairé). On en déduit que **la synthèse de molécules organique a lieu dans les chloroplastes**.

Après autoradiographie on observe une importante radioactivité au niveau des molécules organiques élaborées dans les chloroplastes des feuilles exposées à une atmosphère enrichie en $^{14}CO_2$. On en déduit que **le carbone organique constituant les molécules organiques élaborées provient du carbone minéral du CO_2 gazeux** (ou dissous pour les plantes aquatiques)

Il y a donc, dans le chloroplaste, réduction du carbone: $CO_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow CH_2O + H_2O$

A l'obscurité la fixation de CO_2 diminue progressivement (Gaffron). La réduction du carbone ne dépend donc pas directement de la lumière mais requiert la participation d'intermédiaires produits au cours de la phase photochimique; on parle d'une **phase chimique ou non photochimique**.

La photosynthèse est une réaction d'oxydo-réduction complexe qui se déroule dans les chloroplastes des tissus verts chlorophylliens. Il s'agit d'un couplage entre 2 réactions:

- **L'oxydation de l'eau qui nécessite de la lumière (phase photochimique): $2 H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$**
- **La réduction du carbone (phase non photochimique): $CO_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow CH_2O + H_2O$**

$$2 H_2O + CO_2 \rightarrow CH_2O + H_2O + O_2$$

II: La phase photochimique

L'énergie lumineuse des photons excite la chlorophylle qui transfère ses électrons via une chaîne d'accepteurs localisés dans la membrane des thylakoïdes vers un accepteur final R oxydant qui se trouve alors réduit en RH_2 . Il s'agit d'un couplage entre l'oxydation de la chlorophylle et la réduction de l'accepteur final:

- **Oxydation de la chlorophylle: $4 \text{ Chl réduites} \rightarrow 4 \text{ Chl}^* \text{ oxydées} + 4 e^-$**
- **Réduction de l'accepteur final: $2 R + 4 H^+ + 4 e^- \rightarrow 2 RH_2$**

Les chlorophylles ayant perdu un électron se retrouvent oxydées (photo-excitation). Il y a eu conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique (RH_2) grâce aux propriétés des pigments chlorophylliens.

Pour pouvoir absorber à nouveau des photons, les chlorophylles oxydées doivent revenir à leur état initial (état fondamental) en étant réduites; pour cela elles acceptent (elles arrachent) des électrons de l'eau provoquant ainsi l'oxydation de l'eau dans le lumen et la libération de dioxygène. Il s'agit d'un couplage entre la réduction de la chlorophylle et l'oxydation de l'eau:

- **Réduction de la chlorophylle: $4 \text{ Chl}^* \text{ oxydées} + 4 e^- \rightarrow 4 \text{ Chl réduites}$**
- **Oxydation de l'eau: $2 H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$**

L'oxydation de l'eau dans le lumen crée un gradient de proton (lumen fortement concentré en proton / stroma faiblement concentré). Cette force proto-motrice active une enzyme: l'ATP synthétase située sur la membrane du thylakoïde qui catalyse la phosphorylation de l'ADP adénosine diphosphate en ATP adénosine triphosphate, molécule qui stocke de l'énergie chimique. **$ADP + Pi + ATPase + \text{Énergie (F proto motrice)} \rightarrow ATP$**

La phase photochimique se déroule dans les thylakoïdes. Les photons induisent, à partir de l'excitation de la chlorophylle, des réactions d'oxydoréductions au niveau de la membrane des thylakoïdes qui aboutissent à la synthèse d'ATP et à la réduction d'un accepteur final R en RH_2 .

L'énergie des photons est ainsi convertie en énergie chimique sous forme d'ATP (dont l'hydrolyse peut libérer une grande quantité d'énergie) et de RH_2 (possédant un fort pouvoir réducteur)

Le fonctionnement de ces chaînes d'oxydoréductions nécessite une régénération de chlorophylle à l'état réduit : ceci est permis par l'oxydation de l'eau, à l'origine d'un dégagement de dioxygène.

Cette phase est résumée par les deux équations simplifiées qui suivent :

$$2 R + 2 H_2O \rightarrow 2 RH_2 + O_2$$
$$ADP + Pi \rightarrow ATP$$

III: La phase chimique

Les travaux de Calvin ont montré que la phase non photochimique, qui se déroule dans le stroma des chloroplastes, consiste en l'incorporation cyclique du CO₂ dans de nombreuses molécules carbonées.

Le cycle de Calvin Benson:

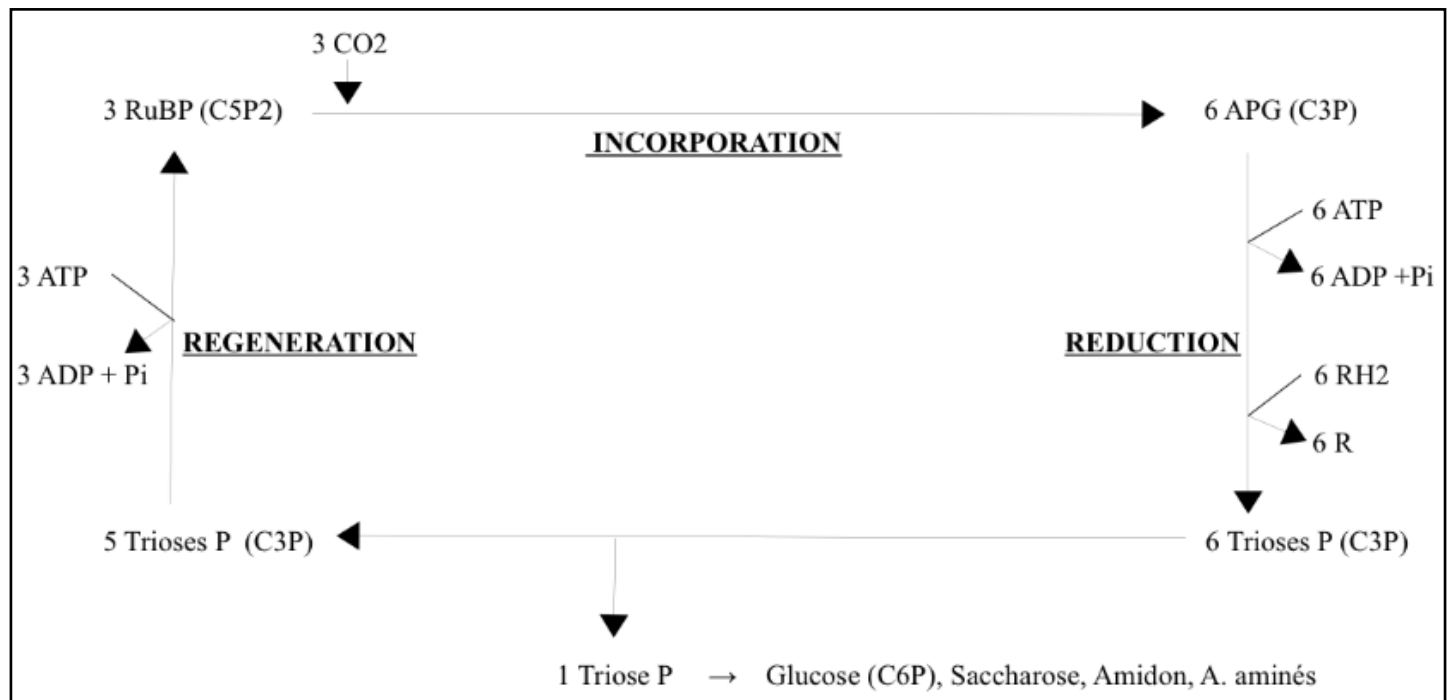
Une enzyme: la Rubisco, présente dans le stroma, permet l'**incorporation** du CO₂ sur une molécule glucidique à 5 atomes de carbone: le RuBP (C₅P₂). Il se forme alors une molécule à 6 atomes de carbone immédiatement scindée en 2 molécules à 3 atomes de carbone: l'APG (l'APG n'est pas un glucide, le CO₂ incorporé dans l'APG n'est pas encore réduit)

Le RH₂ et l'ATP produits lors de la phase photochimique permettent la **réduction** du CO₂ et la formation de molécules glucidiques à 3 atomes de carbone: les trioses P:

- L'oxydation du RH₂ fournit les électrons nécessaires à la réduction du CO₂
- L'hydrolyse de l'ATP fournit l'énergie nécessaire à la réduction du CO₂

Lors de chaque cycle un des 6 trioses P produits sort du cycle, ce qui permet (après plusieurs cycles) la production de glucose (6 atomes de carbone), puis de saccharose, d'amidon, d'acides aminés...

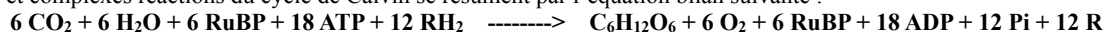
Lors de chaque cycle, 5 des 6 trioses P produits sont utilisés pour régénérer du RuBP permettant ainsi la continuité du cycle. La **régénération** du RuBP se fait selon un mécanisme complexe (hors programme) nécessitant de l'ATP



La réduction du carbone proprement dite est couplée avec l'oxydation du RH₂ et nécessite un apport d'énergie (ATP):

- **Oxydation du RH₂:** $12 \text{ RH}_2 \rightarrow 12 \text{ R} + 24 \text{ H}^+ + 24 \text{ e}^-$
- **Réduction du CO₂:** $6 \text{ CO}_2 + 24 \text{ H}^+ + 24 \text{ e}^- \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ H}_2\text{O}$
- **Hydrolyse de l'ATP:** $12 \text{ ATP} + 12 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 12 \text{ ADP} + 12 \text{ Pi} + \text{Énergie}$

Les nombreuses et complexes réactions du cycle de Calvin se résument par l'équation bilan suivante :



Les deux phases de la photosynthèse sont couplées:

- Les produits formés lors de la phase photochimique: ATP et RH₂, permettent la réduction du dioxyde de carbone dans des molécules glucidiques lors de la phase non photochimique
- L'utilisation de l'énergie chimique (hydrolyse de l'ATP et oxydation du RH₂) lors de la phase non photochimique permet la régénération d'ADP + Pi et de R utilisés lors de la phase photochimique

La réduction du dioxyde de carbone au cours de la photosynthèse est assurée dans les chloroplastes en deux phases étroitement couplées.

La phase photochimique correspond à la conversion de l'énergie des photons en énergie chimique sous forme d'ATP et de RH₂ : la chlorophylle a, excitée par les photons, devient un puissant réducteur qui alimente une chaîne d'oxydoréductions localisée dans la membrane des thylakoïdes. Les électrons et protons nécessaires à la régénération de la chlorophylle a oxydée sont fournis par l'eau, l'oxydation de cette dernière étant à l'origine du dioxygène libéré. La phase non photochimique utilise l'ATP et le RH₂ produits lors de la phase photochimique pour permettre la réduction du dioxyde de carbone dans le stroma ; celui-ci est incorporé dans des molécules organiques grâce à l'activité de la carboxylase.

C'est ainsi que le carbone minéral est intégré dans la matière organique des végétaux photo-autotrophes, eux-mêmes à la base de la majeure partie des chaînes alimentaires, les organismes hétérotrophes consommant, directement ou indirectement, cette matière organique qui leur fournit les constituants et l'énergie nécessaires à leur métabolisme.



Chapitre 2: Respiration cellulaire, fermentations et production d'ATP

Toutes les cellules vivantes, qu'elles soient autotrophes ou hétérotrophes, utilisent la matière organique ("Énergie chimique") pour produire l'énergie nécessaire à leur métabolisme.

Comment la matière organique est elle utilisée pour produire l'énergie nécessaire au métabolisme des cellules ?

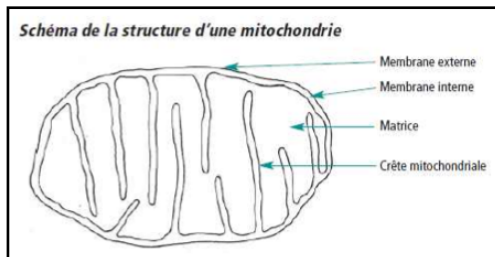
A: En aérobie, la respiration est une oxydation complète du glucose

1: Les mitochondries: des organites spécialisés

Mise en évidence de la respiration mitochondriale

Des mitochondries isolées ne consomment pas de O₂ lorsqu'elles sont placées dans un milieu contenant du glucose; en revanche elles consomment du O₂ si l'on ajoute du pyruvate dans le milieu. Les mitochondries ne peuvent pas utiliser directement le glucose pour respirer. Le glucose doit être préalablement dégradé dans le cytoplasme en pyruvate qui est ensuite utilisé par les mitochondries: c'est la respiration cellulaire. L'étape de dégradation du glucose en pyruvate est la glycolyse.

Structure des mitochondries

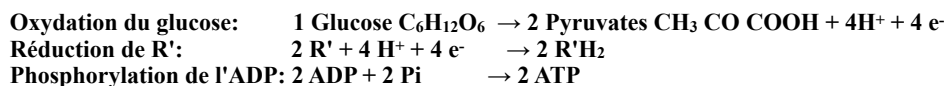


La mitochondrie est un organite cellulaire clos de quelques micromètres de long sur 0,5 à 1 µm de diamètre. Les mitochondries sont limitées par une double membrane (enveloppe) qui délimite un espace interne: la matrice, isolée du cytoplasme. La membrane interne émet de nombreux replis transversaux dans la matrice, appelés crêtes mitochondriales.

2: La glycolyse

C'est l'oxydation du glucose en pyruvate; elle a lieu dans le cytoplasme

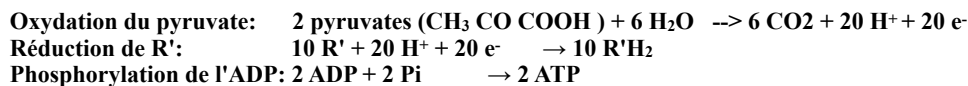
Elle aboutit à la production de deux molécules de pyruvate à partir d'une molécule de glucose. Cette réaction est une déshydrogénation et correspond à une oxydoréduction : le glucose est oxydé tandis qu'un composé R' (proche des composés R impliqués dans la photosynthèse) est réduit en R'H₂. Cette oxydoréduction libère de l'énergie utilisée à la synthèse d'ATP par couplage des réactions.



Bilan: 1 glucose (C₆H₁₂O₆) + 2 R' + 2 ADP + 2 Pi → 2 pyruvates (CH₃ CO COOH) + 2 R'H₂ + 2 ATP

3: Le cycle de Krebs: oxydation complète du pyruvate dans la matrice des mitochondries

Grâce aux enzymes de la matrice, le pyruvate est totalement oxydé : du dioxyde de carbone est libéré et des composés R' sont réduits en R'H₂. Cette oxydoréduction libère de l'énergie utilisée à la synthèse d'ATP par couplage des réactions.

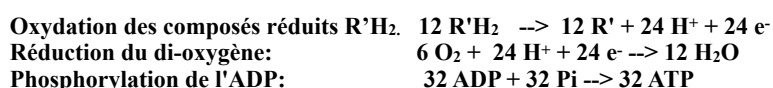


Bilan: 2 CH₃ CO COOH + 6 H₂O + 10 R' + 2 ADP + 2 Pi → 6 CO₂ + 10 R'H₂ + 2 ATP

4: L'oxydation des composés R'H₂

Les composés réduits R'H₂ formés au cours des étapes précédentes sont oxydés grâce à des molécules spécialisées de la membrane interne formant une chaîne respiratoire : il s'agit de transporteurs d'électrons qui assurent une série d'oxydoréductions à partir des composés réduits R'H₂, l'accepteur final étant le dioxygène. Il y a régénération des composés oxydés R' utilisés lors des étapes précédentes.

L'énergie libérée au cours de ces réactions d'oxydoréduction sert à la synthèse d'ATP à partir d'ADP et Pi : il y a couplage énergétique. Ceci est possible car coexistent au sein de la membrane interne des mitochondries des enzymes catalysant les réactions d'oxydoréduction et des ATP synthases.



Bilan: 12 R'H₂ + 6 O₂ + 32 ADP + 32 Pi → 12 R' + 12 H₂O + 32 ATP

5: Bilan de la dégradation du glucose par respiration

Production d'ATP

Pour une molécule de glucose dégradée, il y a :

- 2 molécules d'ATP produites par glycolyse
- 2 molécules d'ATP produites lors de l'étape se déroulant dans la matrice
- 32 molécules d'ATP produites par couplage avec les oxydoréductions au niveau des crêtes mitochondriales.

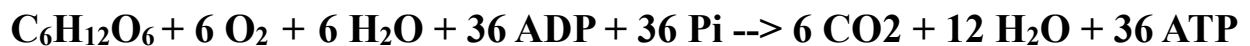
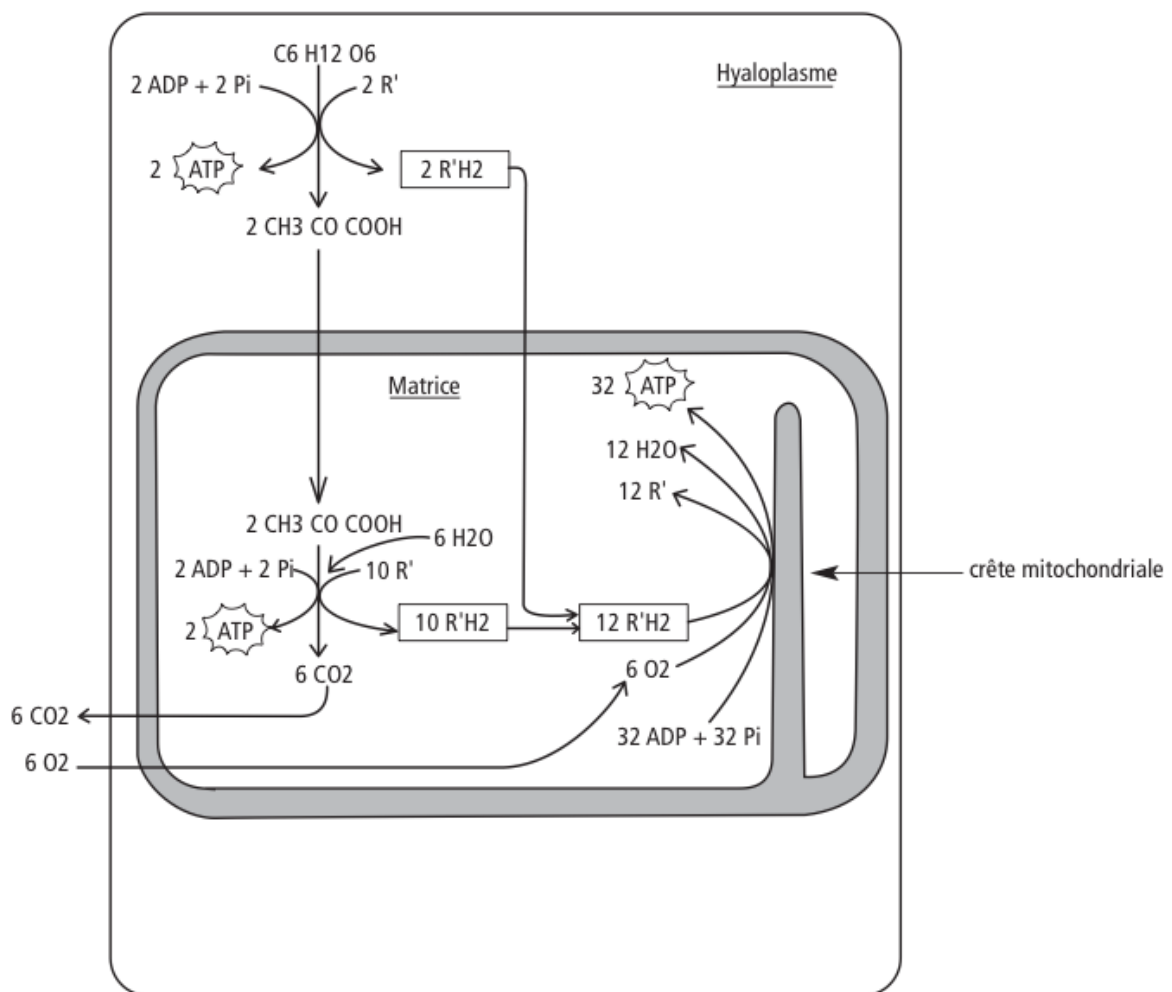
Soit : 36 molécules d'ATP

Rendement énergétique:

- L'oxydation complète d'une molécule de glucose libère 2840 kJ/mol
- La respiration produit 36 molécules d'ATP renfermant chacune 30 kJ/mol soit 1080 kJ/mol de glucose

Le rendement est donc de 1080/2840 , soit 40 %

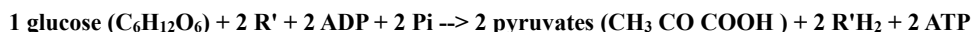
Schéma bilan de la respiration cellulaire:



B: En anaérobie, la fermentation est un processus de synthèse d'ATP peu efficace

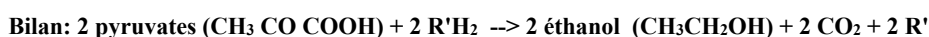
La dégradation du glucose lors de la respiration cellulaire, qui permet la production de 36 molécules d'ATP par molécule de glucose oxydée, nécessite du dioxygène. Cependant, certaines cellules peuvent vivre en anaérobiose en réalisant une fermentation.

La dégradation d'une molécule de glucose par fermentation débute également par la glycolyse qui aboutit à la production de deux molécules de pyruvate, deux molécules de composés réduits $R'H_2$ et la synthèse de deux molécules d'ATP.

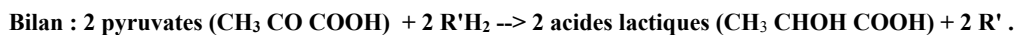
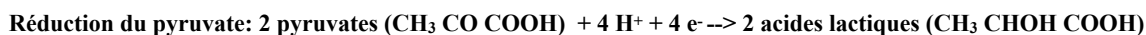
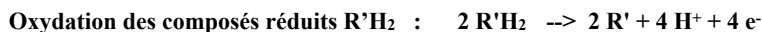


En l'absence de dioxygène, le pyruvate est partiellement décarboxylé par fermentation dans le cytoplasme:

La fermentation éthylique est réalisée par des levures. Les levures possèdent l'équipement enzymatique capable d'hydrolyser le saccharose et le maltose pour former du glucose et du fructose. Le plus fréquemment du glucose ($C_6H_{12}O_6$) est détruit et de l'éthanol (CH_3-CH_2-OH) est produit. Les applications commerciales de la fermentation alcoolique sont connues depuis l'antiquité: c'est ainsi que le pain, le vin et la bière sont fabriqués.



La fermentation lactique est réalisée par certains champignons et bactéries (utilisés pour la fabrication du yaourt ou du fromage) et par les cellules musculaires (voir cours suivant). Du glucose est détruit et de l'acide lactique ($CH_3-CHOH-COOH$) est produit.



C: Conclusion

Toutes les cellules utilisent des nutriments organiques pour produire l'ATP nécessaire à leur métabolisme. Les cellules autotrophes utilisent les molécules organiques qu'elles ont élaborées elles mêmes lors de la photosynthèse. Les cellules hétérotrophes utilisent les molécules organiques élaborées par d'autres cellules ou d'autres organismes.

Les cellules utilisent deux grands mécanismes de production d'ATP en fonction des conditions du milieu et / ou de leur équipement cellulaire et enzymatique:

- Dans le cytoplasme, la glycolyse produit 2 molécules d'ATP pour une molécule de glucose oxydée en 2 pyruvates.
- Dans les mitochondries des cellules eucaryotes, en présence de dioxygène (aérobie), la respiration mitochondriale permet la production de 34 ATP supplémentaires pour 2 pyruvates intégralement oxydés
- Dans le cytoplasme de certaines cellules, en l'absence de dioxygène (anaérobie), la fermentation ne produit pas d'ATP supplémentaires mais permet de régénérer des composés R' oxydés indispensables à la continuité de la glycolyse qui constitue alors la seule source d'ATP pour ces cellules

| | Fermentation lactique | Fermentation éthylique | Respiration |
|--------------------------------------|---|-------------------------|---|
| Localisation | Cytoplasme (Bactéries. Cellules musculaires) | Cytoplasme (Levures) | Cytoplasme et mitochondries |
| Condition | Anaérobie | Anaérobie | Aérobie |
| Production de CO₂ | 0 | 2 | 6 CO ₂ libérés (décarboxylation complète du glucose) |
| Production de R'H₂ | 2 | 2 | 12 |
| Production d'ATP | 2 | 2 | 36 |
| Bilan énergétique | 60/2840 = 2 % | 2 % | 40 % |

Chapitre 3: L'utilisation de l'ATP par la fibre musculaire: de l'énergie chimique à l'énergie mécanique

Les cellules ont besoin d'énergie pour leur fonctionnement; l'énergie permet le travail cellulaire:

- Travail chimique: les réactions du métabolisme (principalement celles de l'anabolisme) nécessitent de l'ATP (réactions endergoniques)
- Travail électrique: production de l'influx nerveux
- Travail photonique: production de lumière (exemple des lucioles)
- Travail thermique: production de chaleur
- Travail mécanique: mouvements: mouvements cellulaires (cellules sentinelles, spermatozoïdes); mouvements des organites (cyclose des chloroplastes); mouvements plus complexes: le travail musculaire.

Comment l'énergie chimique des molécules organiques est-elle convertie en énergie mécanique par les cellules musculaires ?

I: Le métabolisme des fibres musculaires

1: Les fibres musculaires consomment de l'ATP

L'étude de la contraction des myofibrilles in vitro (Document 1 page 52) montre que la contraction n'est possible qu'en présence d'ATP qui est alors hydrolysé en ADP + Pi. L'étude de la composition chimique d'un muscle frais avant et après contraction montre que les réserves d'ATP sont très faibles (4 à 6 mmol/kg) mais constantes dans le muscle. Cette faible réserve est à peine suffisante pour assurer une seconde d'effort; il doit donc exister un ou des mécanismes de régénération de l'ATP dans les fibres musculaires.

2: Les différentes voies de régénération de l'ATP dans les cellules musculaires

La voie de la phosphocréatine

La phosphocréatine est une molécule phosphorylée présente dans la cellule musculaire. Son hydrolyse (exergonique) est couplée à la phosphorylation de l'ADP (endergonique) et permet donc la synthèse d'ATP (Document 3 page 54). Ce couplage, très rapide, ne nécessite ni oxygène ni organites spécialisés, mais le stock de phosphocréatine est épuisé en moins de 20 secondes lors d'un travail musculaire.

La voie de la fermentation lactique

La fermentation lactique permet de produire rapidement de l'ATP, sans nécessiter d'apport accru en di-oxygène. Les réserves de glycogène musculaires fournissent le glucose nécessaire. Ce mécanisme consomme cependant beaucoup de réserves glucidiques pour une faible production d'ATP (2 ATP par mole de glucose), et produit de l'acide lactique qui abaisse le pH musculaire (ce qui provoque fatigue, points de côtés..)

La voie de la respiration

La respiration est le mécanisme le plus efficace pour produire durablement de l'ATP avec un rendement élevé. Cependant cette voie de production de l'ATP est limitée par l'approvisionnement en di-oxygène qui dépend lui-même des capacités respiratoires et circulatoires de l'individu.

3: Des mécanismes complémentaires

Au cours d'un effort, les réserves d'ATP et de phosphocréatine, instantanément mobilisées, permettent de réaliser immédiatement le travail musculaire. La fermentation lactique prend alors le relais, permettant le maintien du travail musculaire en attendant que le système cardio-vasculaire s'adapte pour assurer un apport accru en di-oxygène, indispensable au métabolisme respiratoire.

II: L'ATP et la contraction musculaire

Un muscle est un assemblage de fibres musculaires. Chaque fibre musculaire est une cellule géante (syncytium), de plusieurs centimètres de long.

Le cytoplasme contient des réserves de glycogène (polymère de glucose) et selon les fibres, plus ou moins de mitochondries:

Les fibres de types I, riches en mitochondries, utilisent principalement la voie respiratoire ce qui leur permet de se contracter longtemps mais lentement (temps d'adaptation). Les fibres de type II pauvres en mitochondries, utilisent principalement la voie de la fermentation lactique ce qui leur permet de se contracter rapidement mais peu longtemps. Un muscle squelettique est un assemblage de fibres de types I et II.

Chaque fibre musculaire renferme un grand nombre de myofibrilles chacune formées d'une succession de sarcomères. Chaque sarcomère est un assemblage de deux types de filaments de nature protéique: les filaments fins d'actine, et les filaments épais de myosine. Les filaments épais de myosine possèdent des extrémités globuleuses: les têtes de myosine qui peuvent se fixer ou se détacher des filaments fins d'actine.

Les cycles successifs d'attachement - détachement actine / myosine provoquent le glissement des filaments à l'origine du raccourcissement du sarcomère et de la myofibrille. Le raccourcissement coordonné des différentes myofibrilles et des différentes fibres musculaires permet la contraction du muscle et le mouvement.

Le raccourcissement des sarcomères nécessite de l'ATP:

- La fixation d'une molécule d'ATP sur la tête de myosine induit la rupture du complexe myosine - actine
- L'hydrolyse de l'ATP en ADP et Pi induit un changement de conformation de la tête de myosine et permet la formation d'un complexe entre la tête de myosine et la molécule d'actine suivante
- La libération de l'ADP + Pi induit le pivotement de la tête de myosine ce qui entraîne le glissement du filament d'actine par rapport au filament de myosine vers le centre du sarcomère.

Le détachement induit par la fixation de l'ATP sur la tête de myosine est nécessaire à la poursuite du cycle et donc à la contraction musculaire; mais il est aussi nécessaire à la décontraction musculaire, ce qui explique la rigidité cadavérique (en l'absence d'ATP le muscle ne peut se contracter davantage, et il ne peut pas non plus se décontracter)

Le sarcomère est donc l'unité contractile et structurale du muscle strié. Le glissement relatif des filaments protéiques d'actine et de myosine constitue le mécanisme moléculaire à la base de la contraction musculaire. Le mouvement des myofilaments est couplé à l'hydrolyse de l'ATP qui fournit ainsi l'énergie nécessaire au travail mécanique.