

Chapitre 11

Le devenir de la matière organique

Cours

PLAN DU CHAPITRE

- 1 La constitution de réserves : stockage de la matière organique
- 2 L'anabolisme : synthèse de nouvelles biomolécules
- 3 Le catabolisme énergétique : étapes cytosoliques
- 4 Le catabolisme énergétique : étapes mitochondriales

ZOOM

- 1 L'ATP dans l'énergétique cellulaire
- 2 Diversité des fermentations
- 3 Comparaisons des chaînes de transport d'électrons
- 4 Mitochondries et chloroplastes

INTRODUCTION

Le chapitre 10 nous a permis de comprendre comment chaque cellule produit ou prélève de la matière organique. Ces molécules organiques simples (oses, acides aminés, acides gras...) participent alors au **métabolisme cellulaire**, qui comprend :

- l'**anabolisme** : l'ensemble des voies de synthèse de biomolécules plus ou moins complexes, notamment les polymères tels que polysides, protéines, acides nucléiques...
- le **catabolisme** : l'ensemble des voies de dégradation des biomolécules avec libération d'énergie et production de déchets.

- ➔ **Comment une cellule peut-elle stocker et déstocker de la matière organique ?**
- ➔ **Comment une cellule utilise-t-elle la matière organique dans les voies de synthèse des molécules nécessaires à sa structure et son fonctionnement ?**
- ➔ **Comment une cellule peut-elle extraire l'énergie des biomolécules et la convertir en une forme directement utilisable dans les travaux cellulaires ?**

1 La constitution de réserves : stockage de la matière organique

1.1 Le stockage dans une cellule végétale photosynthétique

Dans le stroma des chloroplastes, le cycle de Calvin permet la synthèse de trioses-phosphate (Glyceraldéhyde-3-P) à partir du CO_2 prélevé dans l'atmosphère. Ces glucides produits par la photosynthèse peuvent être soit stockés dans le chloroplaste sous forme de grains d'amidon, soit transportés vers le cytosol via un antiport triose- P/P_i (figure 11.1). Dans ce dernier cas, ils peuvent :

- être consommés par la cellule, au cours de la synthèse d'autres biomolécules (voie anabolique voir § 2) ou dans le catabolisme permettant ainsi la formation d'ATP (voir § 3) ;
- être convertis en saccharose avant d'être exportés hors de la cellule et distribués vers d'autres cellules via la sève élaborée.

Voir chapitre 10, § 2

Voir chapitre 4, § 3

Voir chapitre 9, § 2.3

Une coloration à l'eau iodée permet de mettre en évidence, au sein des cellules chlorophylliennes, un stockage des glucides sous forme de grains d'amidon. Un grossissement supérieur au MET permet de localiser ces grains d'amidon au sein du stroma des chloroplastes. Dans le chapitre 9, nous avons vu que l'amidon est un polymère d' α -glucose dont les caractéristiques en font une bonne molécule de stockage.

Le stockage est assuré par une amidon-synthase qui permet la **polymérisation** au niveau des extrémités des chaînes, en ajoutant des glucoses-phosphate activés (ADP-glucose = adénosine-diphosphate-glucose) : la rupture de la liaison avec l'ADP libère l'énergie nécessaire à l'accrochage du glucose sur l'amidon. Une autre enzyme, l'amidon-phosphorylase, catalyse la **dépolymérisation** de l'amidon et permet le déstockage des glucides en libérant des glucoses-1-P par **phosphorolyse**. Ce stockage/déstockage de l'amidon est contrôlé par la quantité de trioses-P présents et varie selon une périodicité quotidienne. Au cours de la journée, lorsque la photosynthèse est importante et les trioses-P nombreux, une partie des glucides produits est stockée, le reste étant consommé par la cellule ou exporté sous forme de saccharose. Au contraire, durant la nuit où la photosynthèse est inexistante, l'amidon est dégradé : ce déstockage permet la libération de glucides qui peuvent continuer à alimenter le métabolisme cellulaire ou être exportés vers les organes-puits.

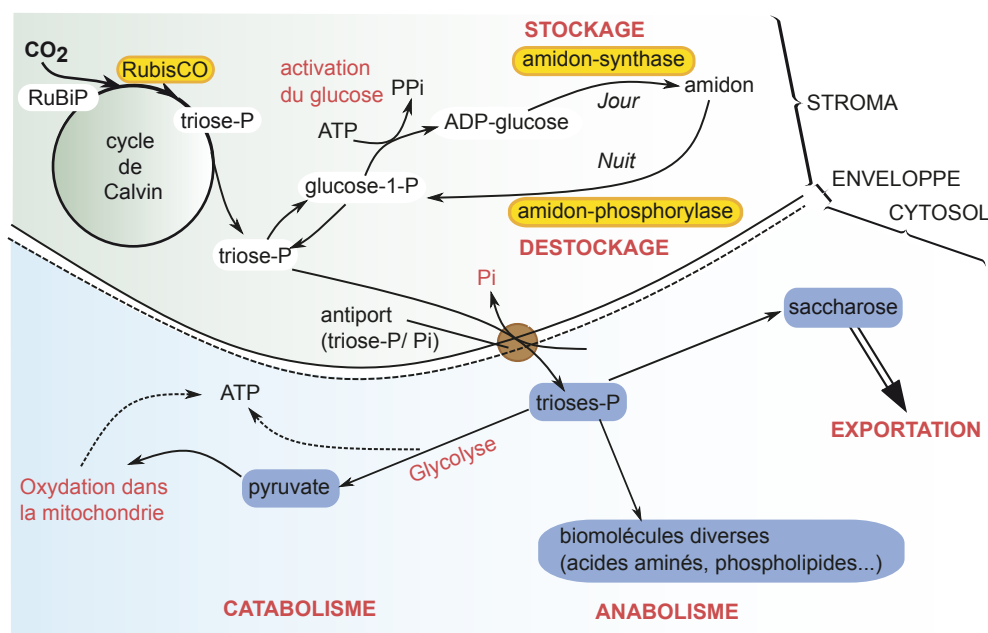


Figure 11.1 Devenirs des trioses-Phosphate produits au cours de la photosynthèse.

1.2 Le stockage dans une cellule animale, hétérotrophe

Dans les cellules animales, les glucides peuvent être stockés sous forme d'un autre polymère d' α -glucose, le glycogène, en particulier dans les cellules du foie et des muscles. Ainsi, lorsque le glucose est abondant suite à un apport alimentaire, les cellules stockent le glucose par polymérisation en glycogène. Au contraire, lorsque les besoins cellulaires sont supérieurs aux apports, entre deux repas par exemple, la dépolymérisation du glycogène libère du glucose-P, immédiatement disponible pour la synthèse d'ATP.

Deux enzymes antagonistes interviennent dans ce métabolisme du glycogène :

- la **glycogène-synthase** catalyse la réaction de polymérisation du glycogène, à partir de glucose activé (UDP-glucose) ;

Voir chapitre 9, § 2.3

- La **glycogène-phosphorylase** catalyse la réaction inverse, la dépolymérisation du glycogène par phosphorylyse selon la réaction :



Le contrôle de l'activité de ces deux enzymes permet alors le contrôle du stockage/déstockage des glucides selon les besoins de la cellule et de l'organisme.

Chez les organismes autotrophes comme hétérotrophes, la mise en réserve de matière organique est un processus qui consomme de l'ATP. Ces réserves permettent de faire face à un apport discontinu (absence de photosynthèse la nuit, prises alimentaires ponctuelles) et d'assurer une disponibilité constante de matière organique aux cellules.

Voir chapitre 12, § 3.4
Figure 12.10

2 L'anabolisme : synthèse de nouvelles biomolécules

De nombreuses biomolécules sont indispensables à la vie cellulaire :

- des molécules structurales constituant les membranes (phospholipides), les parois (cellulose)...
- des molécules intervenant dans le métabolisme : enzymes, transporteurs...
- des molécules informatives (acides nucléiques, hormones...)

La synthèse de ces molécules est réalisée dans la cellule à partir de molécules simples (oses, acides aminés...) prélevées ou synthétisées par la cellule : c'est l'**anabolisme**.

2.1 Localisation des synthèses de biomolécules dans une cellule

Les biomolécules sont synthétisées dans un compartiment particulier de la cellule (figure 11.2), puis acheminées vers leur lieu d'action. Par exemple, l'adressage des protéines amène celles-ci dans le compartiment (nucléoplasme, matrice mitochondriale...) où elles exerceront leur fonction.

Voir chapitre 14, § 4

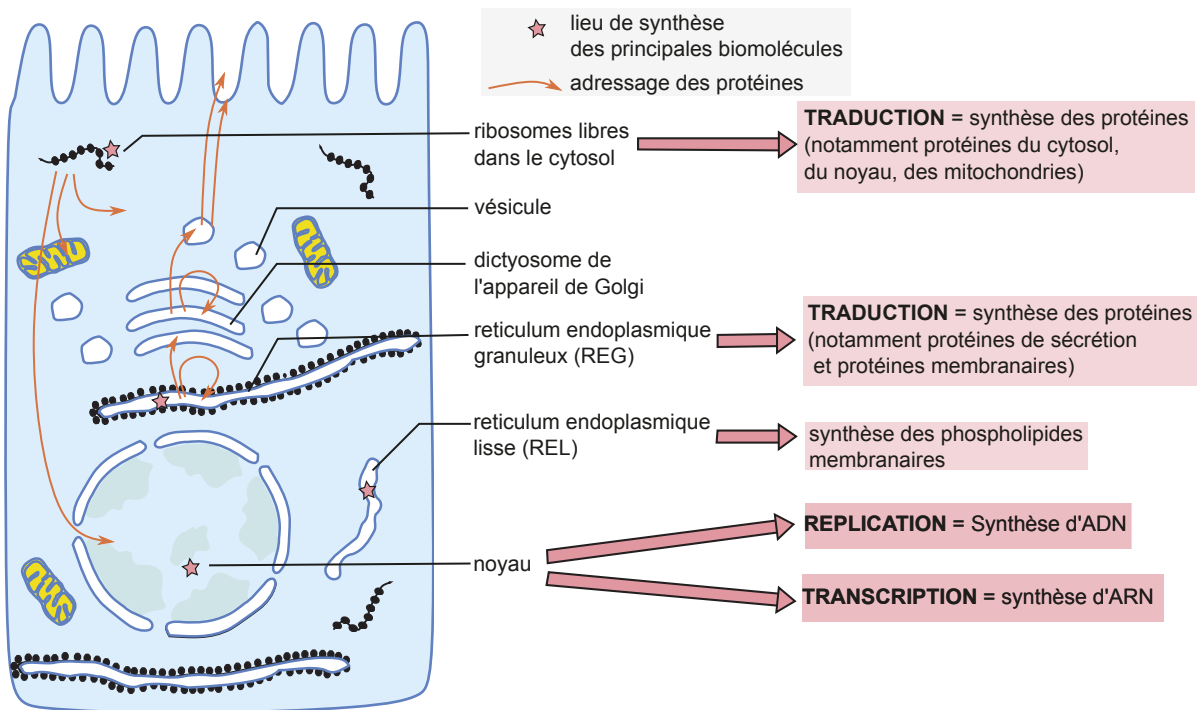


Figure 11.2 Panorama des principales biosyntheses cellulaires dans une cellule animale.

Voir chapitre 8, § 1.2

2.2 Des interconversions entre familles de molécules

Les principales biomolécules sont construites autour d'un squelette carboné. À partir des intermédiaires des voies cataboliques (glycolyse, cycle de Krebs), différentes voies métaboliques permettent la synthèse de lipides, de nucléotides et acides nucléiques, d'acides aminés et protéines (figure 11.3). Ces interconversions entre familles de molécules se croisent au niveau de **carrefours métaboliques**, tels que le glucose-P ou l'acétyl-CoA.

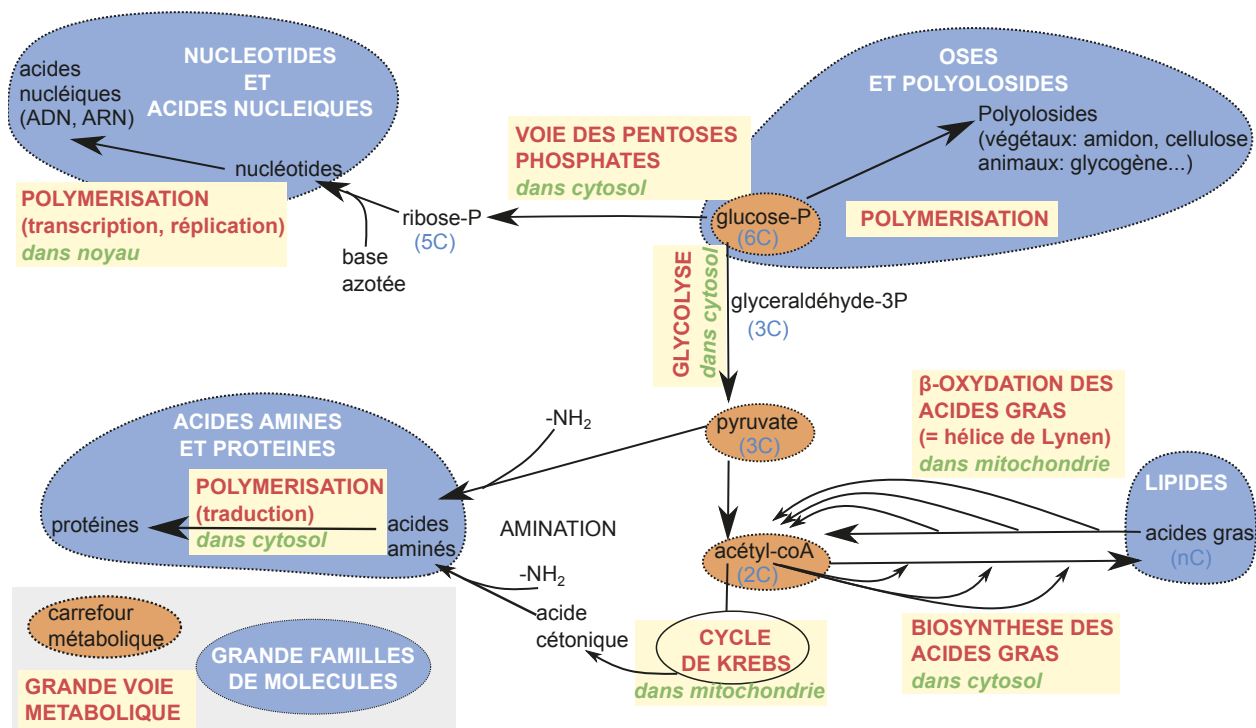


Figure 11.3 Grandes voies du métabolisme et interconversions entre familles de molécules. Ces différentes voies sont développées plus loin dans ce chapitre, ou dans les chapitres 13 et 14.

3 Le catabolisme énergétique : étapes cytosoliques

Au cours de la vie cellulaire, de nombreuses transformations sont **endergoniques** (biosynthèses, transports actifs primaires...) : ces travaux cellulaires sont couplés à une hydrolyse d'ATP qui libère l'énergie nécessaire. Ces besoins de la cellule en ATP sont couverts par le catabolisme qui permet d'extraire l'énergie de la matière organique et de la convertir en une forme directement utilisable, l'ATP.

3.1 La glycolyse : une oxydation partielle du glucose, dans le cytosol

Voie centrale et universelle du catabolisme, la glycolyse est une première étape d'oxydation du glucose qui se déroule dans le cytosol (figure 11.4).

a) Une oxydation du glucose associée à une réduction des coenzymes

Les C du pyruvate ont un nombre d'oxydation moyen de +1, contre 0 pour les C du glucose. Il y a donc eu oxydation partielle du carbone : partielle car le produit final, le pyruvate, n'est pas du C totalement oxydé et il contient donc encore de l'énergie chimique potentielle. Cette oxydation de la matière organique est associée à une réduction de 2 coenzymes redox.

ZOOM 1

L'ATP dans l'énergétique cellulaire

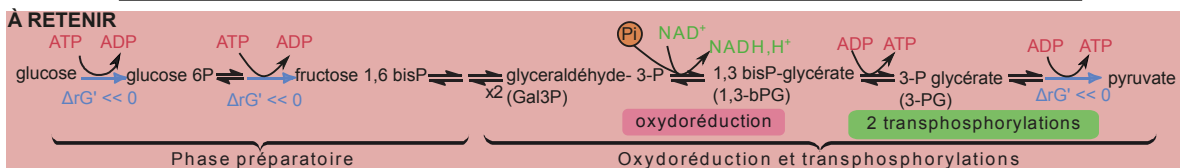
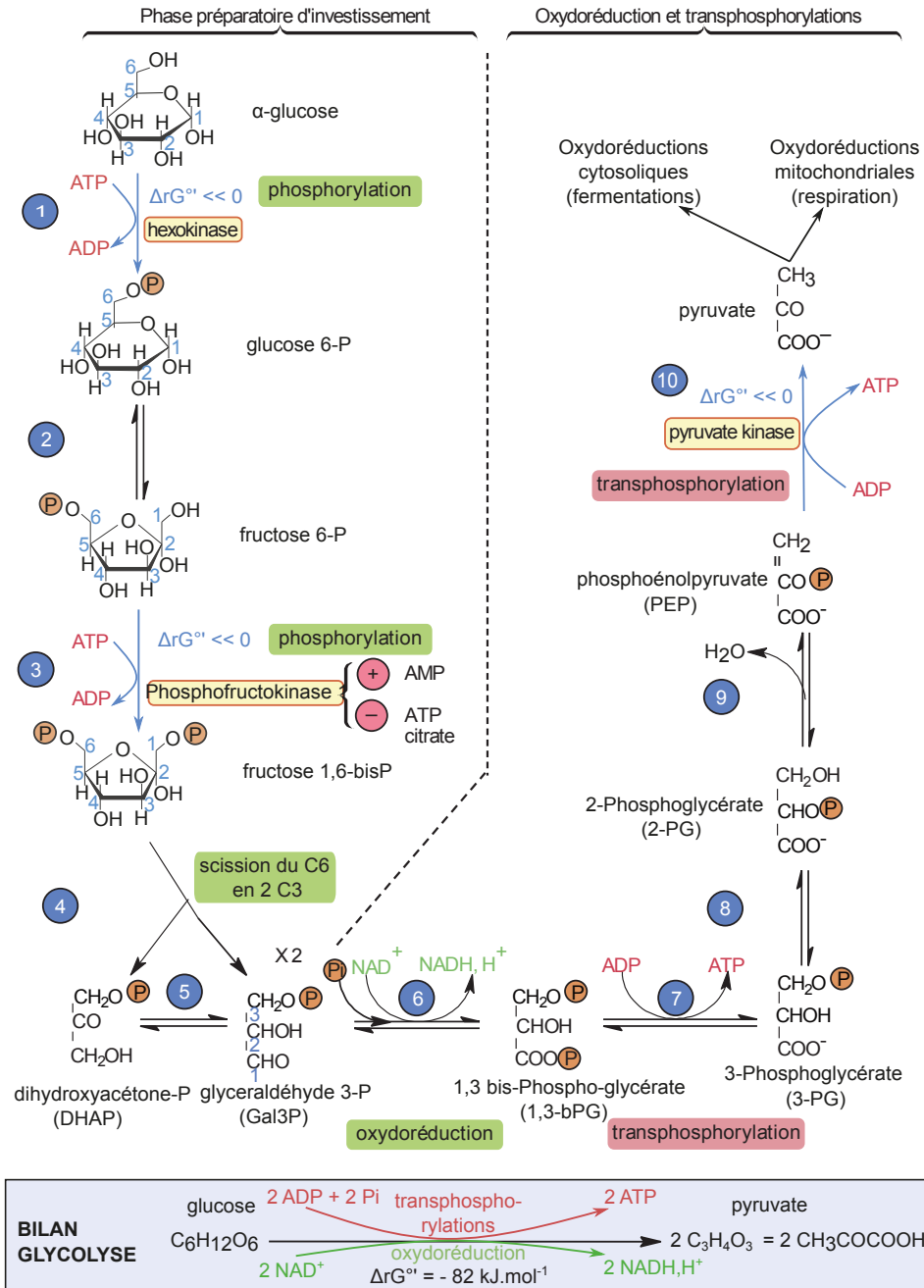


Figure 11.4 Glycolyse : étapes et bilan.

Le contrôle de la glycolyse se déroule au niveau des étapes à $\Delta rG^{\circ} \ll 0$ (indiquées en bleu).

b) Bilan de matière et d'énergie

On peut distinguer deux phases dans la glycolyse :

- une **phase préparatoire** (étapes 1 à 5) où 2 ATP sont consommés, formant ainsi des trioses-P (Glyceraldéhyde-3P), intermédiaires à haut potentiel énergétique ;
- une **phase de production d'ATP** (étapes 6 à 10) couplée à l'oxydation et la déphosphorylation de ces trioses-P.

Au final, pour 1 glucose (C6) engagé dans la glycolyse, il se forme : 2 pyruvates (C3), 2 ATP et 2 coenzymes réduites (figure 11.4).

! Attention !

Le nom de l'enzyme « pyruvate-kinase » indique qu'elle ajoute un groupement phosphate (« *kinase* ») sur le pyruvate. Ici, dans le cas de la glycolyse, elle catalyse la réaction inverse : la déphosphorylation du PEP en pyruvate.

ZOOM 1

L'ATP dans l'énergétique cellulaire

c) Une synthèse d'ATP par transphosphorylation : un couplage chimiochimique

Au cours des étapes 7 et 10, de l'ATP est formé par transfert d'un groupement phosphate depuis un intermédiaire phosphorylé vers l'ADP : ce mode de synthèse d'ATP est appelé **transphosphorylation** ou **phosphorylation liée au substrat**. Il s'agit d'un couplage chimiochimique entre une déphosphorylation exergonique de l'intermédiaire et une phosphorylation endergonique de l'ADP (figure 11.5).

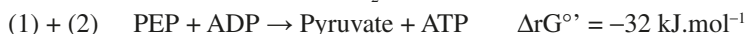
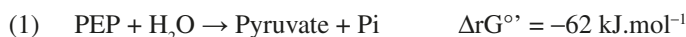


Figure 11.5 Synthèse d'ATP par transphosphorylation lors de l'étape 10 de la glycolyse.

d) L'oxydation du glyceraldéhyde-3-P (Gal3P), une réaction clef

L'étape 6 correspond à une oxydation du triose associée à une réduction de la coenzyme : ce transfert d'électrons exergonique libère une énergie qui permet la phosphorylation concomitante du triose. Cette étape aboutit donc à un acide doublement phosphorylé (le 1,3 bis-Phosphoglycérate) : ces deux groupements phosphate pourront ensuite être transférés vers l'ADP, au cours des étapes 7 et 10, permettant ainsi la synthèse de 2 ATP par transphosphorylation. NB : Les étapes 6 et 7 correspondent à celles que l'on retrouve, dans l'ordre inverse, au cours du cycle de Calvin.

Voir chapitre 10, figure 10.4

3.2 Le contrôle de la glycolyse : un ajustement aux besoins cellulaires

La glycolyse constitue le point d'engagement du glucose dans le catabolisme, aboutissant à la synthèse d'ATP. Le contrôle de la glycolyse permet ainsi à la cellule d'ajuster la production d'ATP à ses besoins. Par exemple, au cours d'un effort physique, les besoins en ATP d'une cellule musculaire augmentent très rapidement : l'activation de la glycolyse permet alors de répondre quasi-instantanément à cette demande.

a) Points de contrôle et enzymes-clé

Parmi les 10 étapes de la glycolyse, la plupart sont proches de l'équilibre (ΔrG° proche de 0) : dans ce cas, la vitesse de la réaction est très dépendante de la concentration des réactifs et des produits. Ainsi, une augmentation de la concentration en réactifs provoque une accélération forte de la réaction.

En revanche, les étapes 1, 3 et 10 sont éloignées de l'équilibre ($\Delta rG^{\circ} \ll 0$). Dans ce cas, la vitesse de la réaction est essentiellement dépendante de l'activité de l'enzyme qui catalyse la

réaction. En modifiant l'activité de l'enzyme, la cellule peut alors moduler efficacement la vitesse de réaction. Ces étapes (1, 3, et 10) sont donc des **points de contrôle** de la voie métabolique, et les enzymes correspondantes (hexokinase, phosphofructokinase 1 et pyruvate-kinase) sont des **enzymes-clés**.

b) Rétrocontrôle négatif de la glycolyse au niveau de la phosphofructokinase 1 (PFK1)

La PFK1 est une **enzyme allostérique** catalysant l'étape 3. L'activité de cette enzyme est finement contrôlée par différents effecteurs allostériques, dont l'ATP qui l'inhibe.

En cas d'excès d'ATP dans la cellule, l'activité de la PFK1 chute ce qui réduit drastiquement la quantité de fructose-1,6-bisP produit. La moindre quantité de réactif provoque alors un ralentissement de l'étape 4 et ainsi de suite : le flux glycolytique chute, ce qui diminue par conséquent la quantité de pyruvate pouvant entrer dans la respiration. Ceci entraîne donc une forte diminution de la synthèse d'ATP.

À l'inverse, un déficit en ATP provoque une augmentation de la synthèse d'ATP. Ce **rétrocontrôle négatif** permet ainsi d'ajuster la production d'ATP aux besoins de la cellule.

3.3 La régénération des coenzymes au cours de la fermentation

Les fermentations sont des **voies cataboliques non oxydatives** puisque le nombre d'oxydation du carbone n'est pas modifié, bien que certaines étapes fassent intervenir des oxydations ou réductions des coenzymes. La [figure 11.6](#) présente les deux phases de la fermentation lactique qui se déroule par exemple dans des cellules de mammifères en condition anaérobie :

- Lors de la glycolyse, l'oxydation du glucose permet la production de 2 ATP. Cette phase nécessite la présence de coenzymes redox oxydées (NAD^+) capables d'accepter les électrons du glucose et d'être ainsi réduites en NADH, H^+ .
- Les coenzymes réduites (NADH) redonnent ensuite leurs électrons au pyruvate issu de la glycolyse (pyruvate réduit en lactate) : cette régénération des coenzymes oxydées (NAD^+) permet la poursuite de la glycolyse.

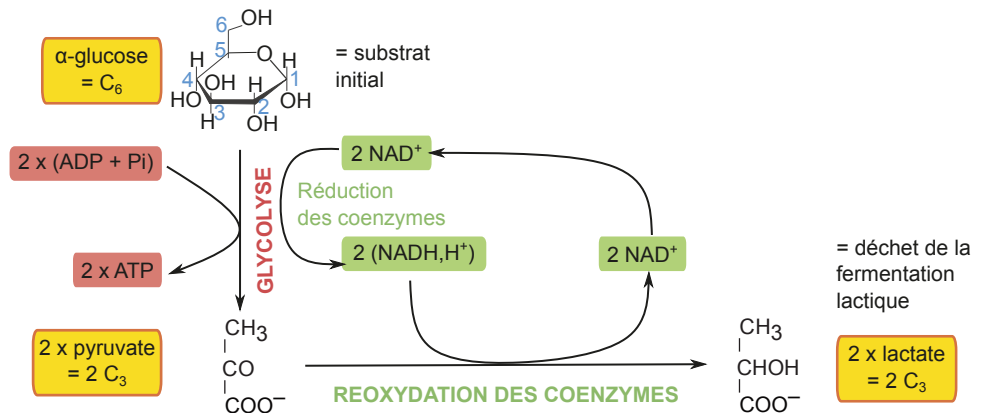
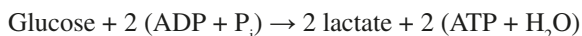


Figure 11.6 Les deux phases de la fermentation lactique.

L'équation-bilan de la fermentation lactique est la suivante :



C'est donc une voie non oxydative puisque le bilan ne fait pas apparaître de transfert d'électrons. Le lactate est un déchet de la fermentation, dont la cellule se débarrasse. Cette voie permet la

Voir chapitre 12, § 3.3
et figure 12.9

ZOOM 2

Diversité des
fermentations

synthèse de 2 ATP par molécule de glucose. Ce faible rendement énergétique est lié au fait que le déchet, le lactate, est une molécule encore réduite : une petite quantité seulement de l'énergie potentielle du glucose a donc été extraite au cours de la fermentation (voir § 4.4.b : la comparaison du rendement respiration/fermentation).

4 Le catabolisme énergétique : étapes mitochondriales

4.1 La formation d'acétyl-coA : convergence des voies cataboliques

Quel que soit le substrat énergétique initial (glucose, acide gras, acide aminé), les différentes voies cataboliques aboutissent à la formation d'acétyl-coenzyme A (acétyl-coA) qui s'engage alors dans le cycle de Krebs où il est entièrement oxydé (voir § 4.2) : c'est la convergence des voies cataboliques.

Voir figure Rabat 2 de couverture

a) La formation d'acétyl-coA à partir du pyruvate issu de la glycolyse

Le pyruvate issu de la glycolyse peut entrer, grâce à un symport H^+ /pyruvate, dans la matrice mitochondriale où il subit une **décarboxylation oxydative** catalysée par la pyruvate-déshydrogénase (figure 11.7). Au cours de cette réaction :

- l'oxydation du pyruvate est associée à la réduction d'une coenzyme, formant ainsi du pouvoir réducteur (NADH) qui sera consommé par la chaîne respiratoire (voir § 4.3) ;
- la décarboxylation provoque le passage d'un C3 (le pyruvate) à un C2 (le groupement acétyl) et une libération de CO_2 ;
- la coenzyme A fixe le groupement acétyl, ce qui permettra son transfert vers le cycle de Krebs.

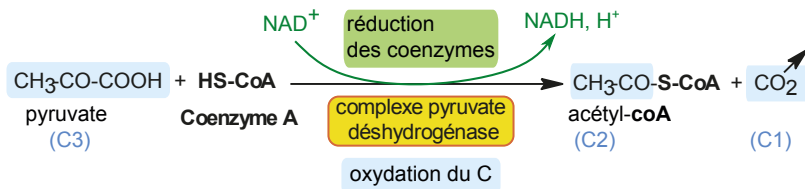


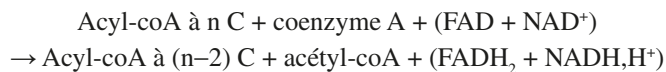
Figure 11.7 Décarboxylation du pyruvate en acétyl-coA.

Le nombre de C de chaque molécule est indiqué en bleu.

b) La formation d'acétyl-coA à partir d'un acide gras : la β -oxydation

Avec le glucose, les acides gras sont l'autre substrat énergétique majeur des cellules animales. La fixation d'un acide gras à une coenzyme A, dans le cytosol, forme un acyl-coenzyme A (acyl-coA) qui rentre dans la mitochondrie. Cela permet le transfert de la chaîne carbonée vers la matrice où elle subit une β -oxydation au cours de l'hélice de Lynen (figure 11.8).

À chaque « tour » d'hélice, une coenzyme A provoque l'oxydation de l'acyl-coA au niveau du carbone β (d'où β -oxydation), ce qui réduit la longueur du groupement acyl de 2 carbones, selon la réaction suivante :



Si on part d'un acyl-coA à 16 C (palmitoyl-coA, forme activée du palmitate), on forme après β -oxydation complète :

- 8 acétyl-coA qui s'engagent dans le cycle de Krebs ;
- 7 $FADH_2$ et 7 NADH, coenzymes réduites qui sont oxydées au niveau de la chaîne respiratoire avec formation d'ATP (voir § 4.3).

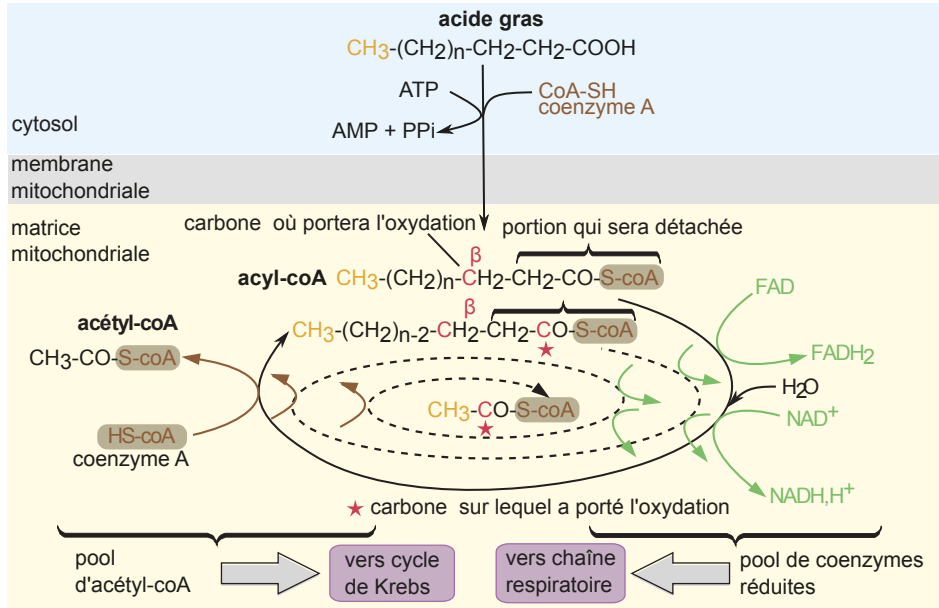


Figure 11.8 β -oxydation des acides gras.

c) La formation d'acétyl-coA à partir d'acides aminés

Lorsqu'un acide aminé s'engage dans le catabolisme, il subit une désamination (perte de son groupement amine) formant alors un acide α -cétonique (figure 11.9). Selon le radical de l'acide aminé, on obtient soit du pyruvate (à partir de l'alanine par ex.), soit de l'acétyl-coA, soit un des intermédiaires du cycle de Krebs comme l'oxaloacétate. Dans tous les cas, cette chaîne carbonée est oxydée au cours du cycle de Krebs.

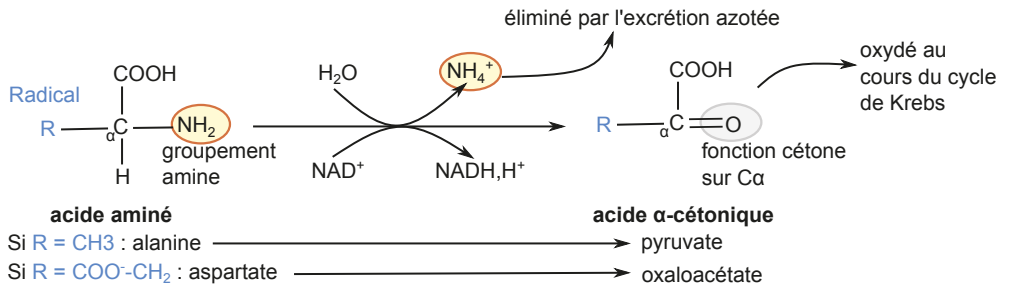


Figure 11.9 Catabolisme des acides aminés.

4.2 L'oxydation totale du carbone au cours du cycle de Krebs

Nous venons de voir que, quel que soit le substrat énergétique initial (glucose, acide gras, acide aminé), le catabolisme aboutit à la formation d'acétyl-coA. Cet acétyl-coA est alors oxydé au cours du cycle de Krebs (figure 11.10).

a) Bilan de matière et d'énergie du cycle de Krebs (figure 11.10, tableau)

La matière organique qui entre dans le cycle de Krebs (groupement acétyl de l'acétyl-coA) subit donc une **oxydation totale** puisque le carbone ressort sous forme de CO_2 , c'est-à-dire la forme la plus oxydée du C. Cette oxydation du C est associée à une réduction des coenzymes

redox, NAD^+ et FAD . De plus, un GTP est formé au cours de ce cycle. L'énergie initialement présente dans la matière organique réduite (acétyl-coA) a donc été convertie en énergie sous forme de coenzymes réduites (pouvoir réducteur) et de GTP : il s'agit donc d'un couplage chimiochimique.

b) Succession des étapes de transformation de la chaîne carbonée (figure 11.10) :

- **Entrée de l'acétyl-coA** : la réaction 1 permet la condensation d'un C2 (groupement acétyl) et d'un C4 (oxaloacétate) formant ainsi une chaîne carbonée à 6 carbones (citrate).
- **Décarboxylations oxydatives** (réactions 3 et 4) : la chaîne carbonée perd un C sous forme de CO_2 (« décarboxylation ») et cette oxydation de la chaîne est couplée à la formation de coenzymes réduites (« oxydative »).
- **Couplage chimiochimique** entre réaction d'oxydo-réduction et **transphosphorylation** (réactions 4 et 5) : lors de la réaction 4, la décarboxylation de la chaîne est couplée à la fixation d'une coenzyme A via une liaison thio-ester, formant un succinyl-coA. La rupture exergonique de cette liaison thio-ester lors de la réaction suivante est couplée à la phosphorylation du GDP .
- **Régénération de l'oxaloacétate** : lors des étapes 6 à 8, la chaîne carbonée à 4 carbones subit des oxydations permettant de régénérer l'oxaloacétate (bouclant ainsi le cycle) et de former des coenzymes réduites.

Voir chapitre 8, Zoom 3

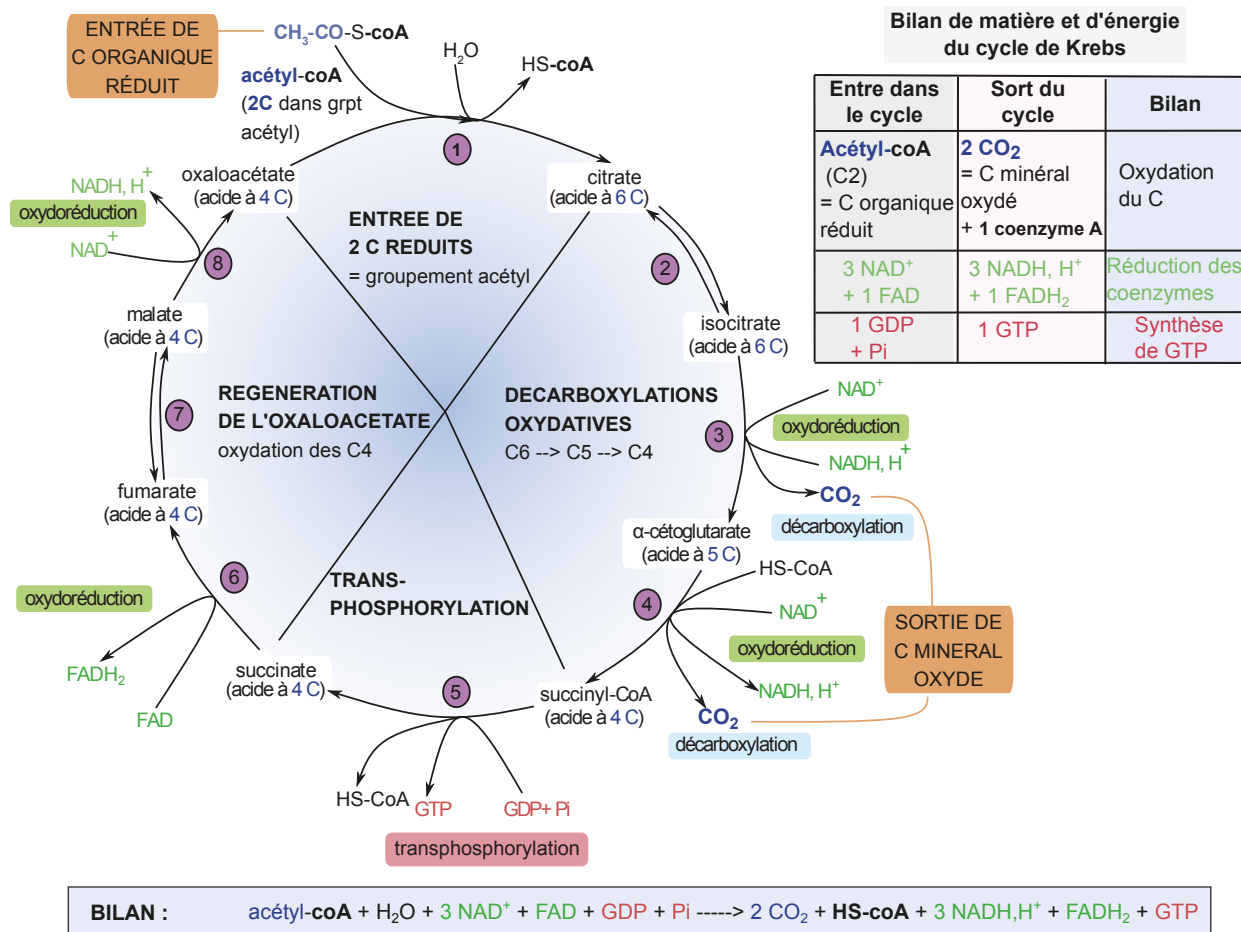


Figure 11.10 Cycle de Krebs : étapes et bilan.

4.3 La synthèse d'ATP par phosphorylation oxydative lors de la chaîne respiratoire

Au cours des différentes étapes d'oxydation de la matière organique (glycolyse, formation d'acétyl-coA, cycle de Krebs), les électrons des molécules organiques réduites ont été transférés vers les coenzymes redox. L'essentiel de l'énergie chimique potentielle contenue dans la matière organique a donc été converti en pouvoir réducteur dans les coenzymes réduites (NADH, FADH₂). Dans la membrane interne de la mitochondrie, la chaîne respiratoire permet de convertir l'énergie de ce pouvoir réducteur en ATP par **phosphorylation oxydative**, grâce à la succession de 2 couplages (figure 11.11) :

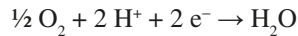
- un couplage chimioosmotique réalisé par la **chaîne de transport d'électrons** ;
- un couplage osmochimique réalisé par l'ATP-synthase.

a) Un couplage chimioosmotique au niveau de la chaîne de transport d'électrons Un transfert d'électrons des coenzymes réduites jusqu'au dioxygène

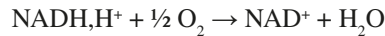
- une coenzyme réduite, le NADH (ou le FADH₂) est le **donneur initial d'électrons** : elle donne 2 électrons et se retrouve donc oxydée en NAD⁺ (ou en FAD) selon la ½ réaction redox :



- l'O₂ est l'**accepteur final d'électrons** : il se retrouve alors réduit en H₂O selon la ½ réaction redox :



Le bilan de cette chaîne de transport d'électrons est la réaction redox suivante :



Il y a oxydation des coenzymes et réduction d'O₂. Le dioxygène est donc nécessaire à la respiration en tant qu'accepteur final des électrons issus de la matière organique.

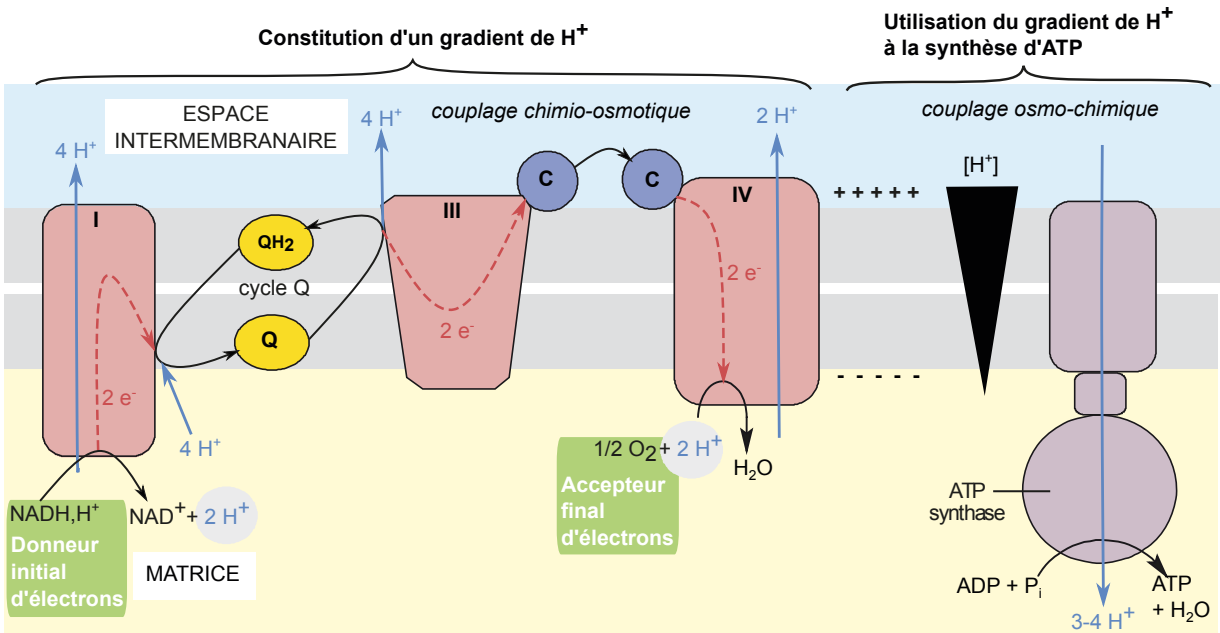


Figure 11.11 Phosphorylation oxydative par la chaîne respiratoire de la membrane interne mitochondriale.

Q = ubiquinone ; C = cytochrome c ; I, III et IV = complexes redox de la chaîne respiratoire. Non représenté ici : le FADH₂ donne ses 2 électrons à un complexe II qui les transmet ensuite à l'ubiquinone ; le reste de la chaîne est identique.

Aspect énergétique du transport d'électrons

Pour une réaction redox : $\Delta rG' = -nF\Delta E'$ (n = nombre d'électrons transférés)

$$E'_{(\text{NADP}^+/\text{NADPH,H}^+)} \approx -0,3 \text{ V} \text{ et } E'_{(\frac{1}{2}\text{O}_2/\text{H}_2\text{O})} \approx +0,8 \text{ V}$$

$$\Rightarrow \Delta E' = E'_{\text{receveur}} - E'_{\text{donneur}} \approx +1,1 \text{ V} \Rightarrow \Delta rG' < 0$$

Ce transfert d'électrons à travers la chaîne est donc **exergonique**.

La figure 11.12 présente la succession de transferts d'électrons sur une échelle des potentiels redox. On constate que chaque transfert est exergonique et libère donc une petite quantité d'énergie. Cette énergie est utilisée dans la translocation endergonique des protons, de la matrice vers l'espace inter-membranaire (figure 11.11). Dans le cas de l'oxydation d'un NADH, 10 H⁺ sont transférés (4 au niveau du complexe I, 4 via l'ubiquinone et 2 au niveau du complexe IV) ; dans le cas de l'oxydation du FADH₂ qui libère moins d'énergie, seuls 6 H⁺ sont transportés (voir QCM à partir de documents en fin de ce chapitre). La chaîne de transport d'électrons réalise donc un **couplage chimioosmotique** entre l'oxydation des coenzymes et la translocation de H⁺ : l'énergie contenue dans les coenzymes réduites est ainsi convertie en gradient de protons.

Comme celle des chloroplastes et celle des eubactéries nitrifiantes, la **chaîne de transport d'électrons** des mitochondries associe donc un transfert d'électrons et une translocation de protons.

ZOOM 3
Comparaison des chaînes de transport d'électrons

ZOOM 4
Mitochondries et chloroplastes

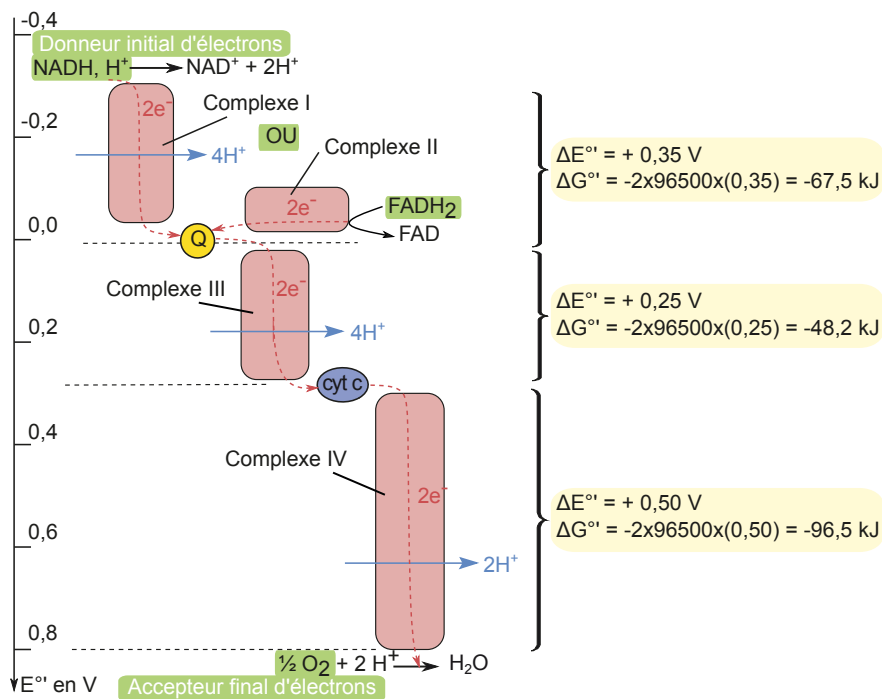


Figure 11.12 Échelle des potentiels redox et chaîne respiratoire.

Chaque flèche rouge représente le transfert de 2 électrons entre 2 groupements porteurs d'électrons. Sur une échelle des potentiels redox avec l'axe orienté vers le bas, un transfert d'électrons représenté « vers le bas » est exergonique.

Remarque sur l'origine des protéines mitochondriales

La plupart des protéines mitochondriales (enzymes du cycle de Krebs, protéines de la chaîne respiratoire...) proviennent de l'expression d'un gène nucléaire suivie de l'adressage de la protéine vers la mitochondrie. Quelques protéines (NADH-déshydrogénase, ATP-synthase...) sont issues de l'expression, dans la matrice, de gènes mitochondriaux.

Voir chapitre 10,
§ 3.3

Voir chapitre 7,
Zoom 2

b) Un couplage osmochimique par l'ATP-synthase

L'oxydation des coenzymes réduites par la chaîne respiratoire a donc permis l'accumulation de H⁺ dans l'espace intermembranaire, c'est-à-dire la formation d'un gradient de protons.

Comme dans le cas des chloroplastes, les protons reviennent ensuite vers la matrice mitochondriale selon un flux exergonique à travers l'ATP-synthase. La rotation du rotor de l'ATP-synthase qui en résulte permet alors la synthèse endergonique d'ATP par les sous-unités catalytiques α-β. Ce couplage osmochimique permet donc de convertir l'énergie du gradient de protons en ATP. Calculons ici le **rendement** de la conversion énergétique, défini par la relation :

$$\text{rendement d'une conversion} = \frac{\text{quantité d'énergie formée}}{\text{quantité d'énergie consommée}}$$

Sur le modèle de l'ATP-synthase bactérienne, on évalue que la synthèse d'un ATP nécessite le flux de 3 ou 4 protons (on calcule ici pour un flux de 4 H⁺).

- D'après la loi de Nernst, ΔG' associé au flux d'1 H⁺ = RTlnC₂/C₁ + zFΔE' ≈ -21 kJ.mol⁻¹
- **énergie consommée** = 4 × (ΔG' associé au flux d'1 H⁺) ≈ -84 kJ.mol⁻¹
- **énergie formée** = ΔrG' associé à la synthèse d'un ATP ≈ +55 kJ.mol⁻¹
- ⇒ rendement ≈ 70 %

70 % de l'énergie libérée par le flux de protons est donc convertie en ATP. Les 30 % restants sont dissipés sous forme de chaleur.

4.4 Bilan énergétique de la respiration

a) Les conversions énergétiques au cours de la respiration

La respiration consiste donc en une **oxydation totale** de la matière organique par l'O₂ (figure 11.13.a). Le carbone est alors rejeté sous sa forme la plus oxydée, le CO₂, déchet de la respiration. Cette oxydation complète permet d'extraire la totalité de l'énergie chimique contenue dans le substrat initial (soit 2 880 kJ.mol⁻¹ dans le cas du glucose) et de la convertir en ATP.

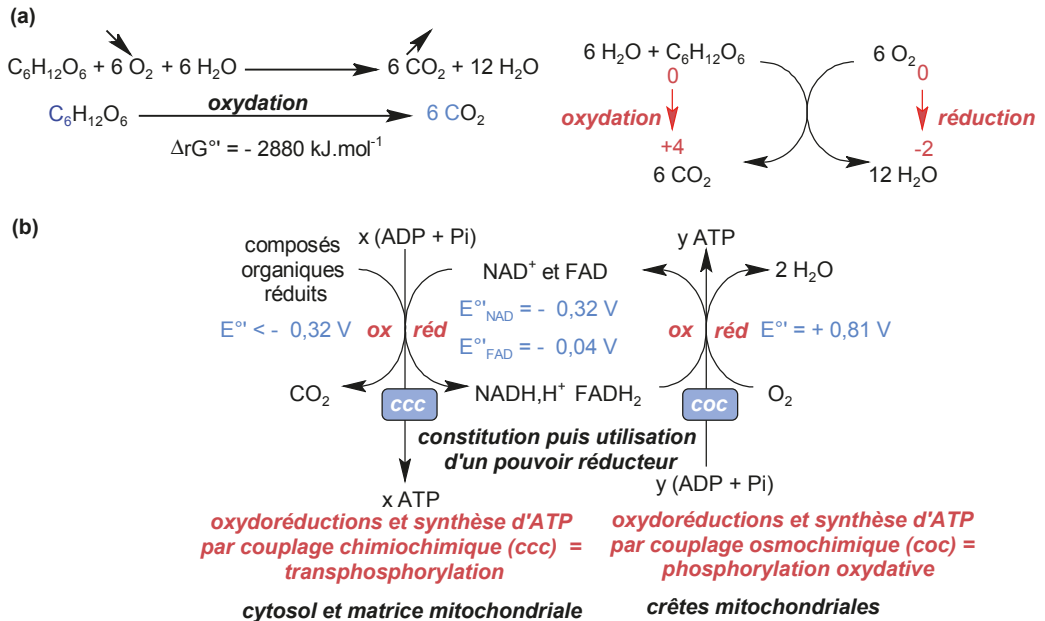


Figure 11.13 Oxydoréductions au cours de la respiration.

(a) Bilan redox de la respiration ; (b) rôle d'intermédiaire des coenzymes d'oxydoréduction.

ZOOM 1
L'ATP dans
l'énergétique cellulaire

Au cours de la respiration, il y a deux modes de synthèse d'ATP (figure 11.13.b) :

- par **transphosphorylation**, au cours de la glycolyse ;
- par **phosphorylation oxydative**, au cours de la chaîne respiratoire.

Au sein de la mitochondrie, la conversion de l'énergie chimique de la matière organique en énergie chimique de l'ATP est réalisée par une succession d'étapes de **conversions énergétiques** présentées par la figure 11.14.

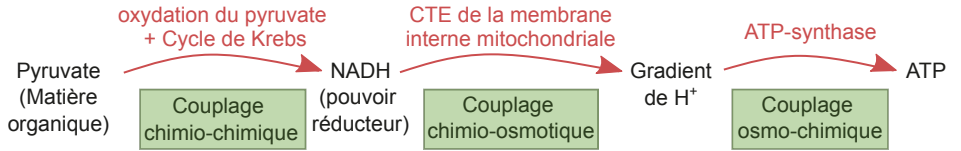


Figure 11.14 Conversions énergétiques dans la mitochondrie au cours de la respiration. Les différentes formes d'énergie au sein de la mitochondrie apparaissent en noir.

b) Quantification du rendement de la respiration

Nombre d'ATP produit par la respiration selon le substrat initial

La respiration permet la synthèse d'environ 38 ATP au cours de l'oxydation d'un glucose (figure 11.15). Calculons le rendement de cette conversion énergétique :

- énergie libérée par l'oxydation totale du glucose : $\Delta rG^{o'} = -2\ 820\ \text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- énergie formée sous forme de 38 ATP : $\Delta rG^{o'} \approx 38 \times 30 = 1\ 140\ \text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- rendement de la conversion $\approx 1\ 140 / 2\ 820 \approx 40\ \%$

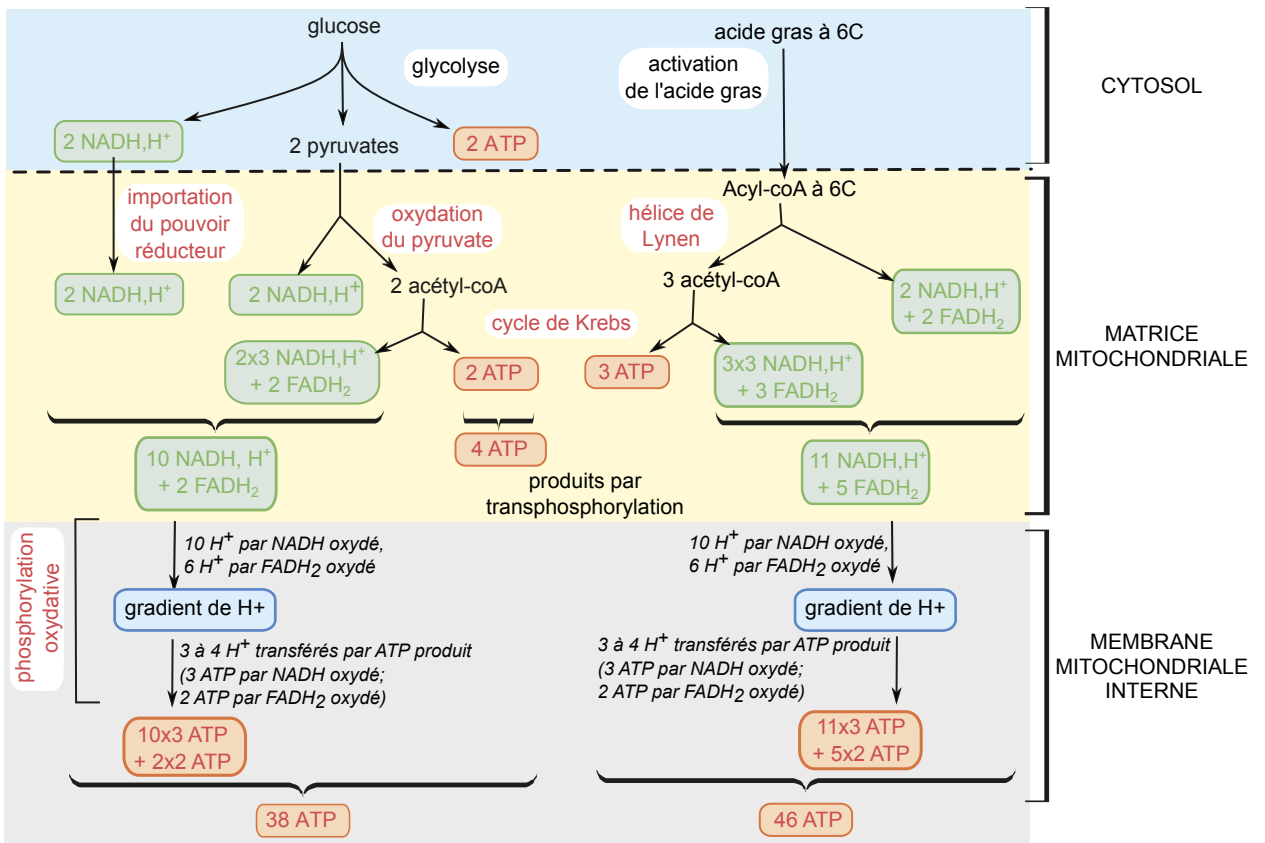


Figure 11.15 Bilan quantifié du catabolisme : comparaison de l'oxydation d'un glucose et d'un acide gras à 6 C.

Le rendement de la respiration est donc excellent puisque 40 % de l'énergie initialement présente dans le glucose a été convertie sous une forme d'ATP, les 60 % restant étant perdu sous forme de chaleur.

Dans le cas de l'oxydation d'un acide gras à 6 carbones (même nombre de C que le glucose), la synthèse est de 46 ATP (figure 11.15). Cette production supérieure d'ATP est liée au fait que le carbone est sous une forme plus réduite dans un acide gras ($-\text{CH}_2-$) que dans un glucose ($-\text{CHOH}-$), le substrat initial contenant alors plus d'énergie chimique potentielle.

Comparaison des rendements énergétiques de la fermentation et de la respiration

Dans le cas de la respiration, l'oxydation totale du glucose permet la production de 38 ATP, soit un rendement autour de 40 %, comme nous venons de le voir.

Dans le cas de la fermentation, seuls 2 ATP sont produits (lors de la glycolyse) au cours de la dégradation d'un glucose. Le rendement énergétique est donc de l'ordre de 2 % ($2 \times 30 / 2820$), soit un rendement beaucoup plus faible que celui de la respiration.

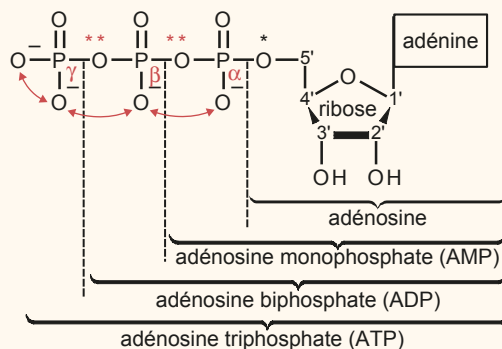
Ce faible rendement de la fermentation est lié au fait que le produit final de la fermentation (l'acide lactique dans le cas de la fermentation lactique) est une molécule organique encore réduite, qui contient donc encore de l'énergie chimique. Alors que dans la respiration, le produit final, le CO_2 est du carbone totalement oxydé qui ne contient donc plus du tout d'énergie récupérable.

ZOOM 1

L'ATP dans l'énergétique cellulaire

Un nucléotide dont l'hydrolyse est exergonique

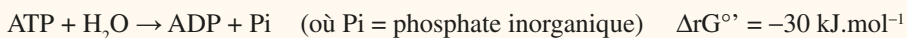
L'adénosine triphosphate (ATP) est un nucléotide avec l'adénine comme base azotée et 3 groupements phosphate (notés α , β et γ). La répulsion électrique entre les charges négatives des groupements phosphate rend les liaisons instables.



La molécule d'ATP.

Le symbole * désigne la liaison ester stable ; le symbole ** désigne les deux liaisons instables entre groupements phosphate ; les doubles flèches rouges figurent les répulsions électrostatiques.

L'hydrolyse de l'ATP en ADP, par rupture de la liaison entre les phosphates β et γ , est alors exergonique :



Moins fréquemment, il peut aussi y avoir hydrolyse de l'ATP avec rupture de la liaison entre les phosphates α et β :



Le potentiel de transfert du groupement phosphate (figure ci-après) correspond à l'énergie nécessaire à la fixation du groupement phosphate : c'est donc l'opposé du ΔrG° d'hydrolyse.

L'utilisation d'ATP dans les travaux cellulaires

L'ATP est une petite molécule omniprésente dans les cellules, bien qu'en faible concentration (de l'ordre de 1 à 2 mmol.L⁻¹). L'ATP constitue la **monnaie énergétique** de la cellule car l'énergie libérée lors de son hydrolyse est utilisée dans de nombreux travaux cellulaires endergoniques. Ainsi, les transformations cellulaires ci-dessous sont couplées à une hydrolyse d'ATP :

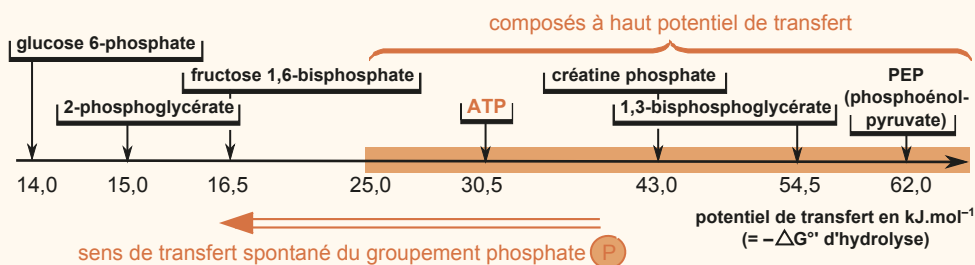
- les transports actifs : flux endergonique de molécules contre leur gradient ;
- nombreuses biosynthèses (traduction, cycle de Calvin, synthèse d'amidon...);
- mouvements au sein de la cellule (déplacement d'organites, dynamique du cytosquelette...).

Deux modes de synthèse d'ATP

La faible quantité d'ATP dans une cellule (correspondant à quelques secondes ou minutes de fonctionnement) rend nécessaire une synthèse permanente d'ATP, qui peut se faire par 2 modes :

• Transphosphorylation (ou phosphorylation liée au substrat)

La figure ci-dessous montre que l'ATP a un potentiel de transfert du groupement phosphate intermédiaire. L'ADP peut donc récupérer spontanément un groupement phosphate provenant de molécules à plus haut potentiel de transfert, telles que le PEP, comme au cours de l'étape 10 de la glycolyse : $ADP + PEP \rightarrow ATP + \text{pyruvate}$ (voir § 3.1).



Échelle des potentiels de transfert du groupement phosphate.

• Conversion de l'énergie d'un gradient de protons par une ATP-synthase

Associées aux chaînes de transport d'électrons (de la mitochondrie, du chloroplaste ou des membranes bactériennes) qui forment des gradients de H⁺, des ATP-synthases couplent le flux exergonique de H⁺ à une synthèse d'ATP (par phosphorylation de l'ADP). Ainsi, la chaîne respiratoire de la mitochondrie permet la synthèse d'ATP couplée à une oxydation des coenzymes : ce mode de synthèse est appelé **phosphorylation oxydative**. La chaîne photosynthétique des thylakoïdes utilise l'énergie des photons lors de cette synthèse d'ATP : on parle de **photophosphorylation**.

La membrane interne de la mitochondrie est perméable à l'ATP (grâce à un antiport ATP/ADP) ce qui n'est pas le cas de celle du chloroplaste : l'ATP synthétisé par les ATP-synthases peut donc être exporté de la mitochondrie vers le cytosol. Au contraire, l'ATP synthétisé au niveau des thylakoïdes reste dans les chloroplastes où il est consommé au cours de la phase chimique de la photosynthèse.

Voir chapitre 10,
§ 3.3

ZOOM 2

Diversité des fermentations

Les fermentations sont des voies cataboliques **cytosoliques** aboutissant à la production d'ATP à partir d'un substrat glucidique, et ne faisant pas intervenir d'oxydant externe (O_2 par exemple) car un résidu de la molécule organique joue en général le rôle d'accepteur final des électrons. Ces fermentations permettent donc à des cellules (notamment des microorganismes) de produire de l'ATP y compris en absence d' O_2 , ce qui rend possible la colonisation de milieux anaérobies. Le rendement de ces fermentations est faible : la production d'ATP par molécule de glucide fermentée est limitée, ce qui est souvent compensé par la dégradation rapide d'une grande quantité de substrat. Il existe une grande diversité de fermentations selon les déchets formés. Certaines sont utilisées par l'homme pour la transformation et la conservation des aliments.

La fermentation lactique

La dégradation de glucose aboutit alors à la formation d'acide lactique (voir § 3.3). Cette voie peut être réalisée par des bactéries (comme les bactéries lactiques *Lactobacillus bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus*), mais aussi par des cellules de mammifères telles que les hématies (qui ne possèdent pas de mitochondries) ou les cellules musculaires lors d'un effort physique.

La fermentation lactique est notamment utilisée dans la fabrication des yaourts et des fromages. Le lactose est fermenté par les bactéries lactiques, provoquant alors une acidification du milieu qui aboutit à la coagulation des caséines du lait et permet d'éliminer d'autres bactéries, éventuellement pathogènes.

La fermentation alcoolique

La dégradation du glucose aboutit à la formation d'éthanol (alcool à 2 C) et de CO_2 selon la réaction : $\text{Glucose} \rightarrow 2 \text{ éthanol} + 2 \text{ CO}_2$

Comme lors de la fermentation lactique, la glycolyse est suivie d'une phase de réoxydation des coenzymes, durant laquelle le pyruvate est décarboxylé puis réduit en éthanol. La fermentation alcoolique peut être réalisée par des levures (champignons unicellulaires, comme la levure de boulanger *Saccharomyces cerevisiae*) en condition anaérobie.

La fermentation alcoolique est utilisée dans la fabrication des boissons alcooliques, telles que la bière et le vin, dans lesquelles l'éthanol provient de la fermentation des sucres présents dans les céréales ou le raisin. Cette fermentation est également utilisée dans la fabrication du pain où elle permet la levée de la pâte grâce au CO_2 qui en est issu.

Les fermentations de la panse des ruminants

La panse de la vache est un milieu anaérobie : les nombreux micro-organismes (ciliés, bactéries, champignons) qui y vivent, participent à la digestion, en réalisant notamment diverses fermentations. Le pyruvate issu de la glycolyse peut alors être transformé en acides gras volatils (AGV) à 2 C (acétate), 3 C (propionate) ou 4 C (butyrate) selon les fermentations. Ces AGV sont alors absorbés par la paroi de la panse et constituent un apport d'énergie majeur pour la vache.

Voir chapitre 1,
Zoom 2

ZOOM 3

Comparaison des chaînes de transport d'électrons (CTE)

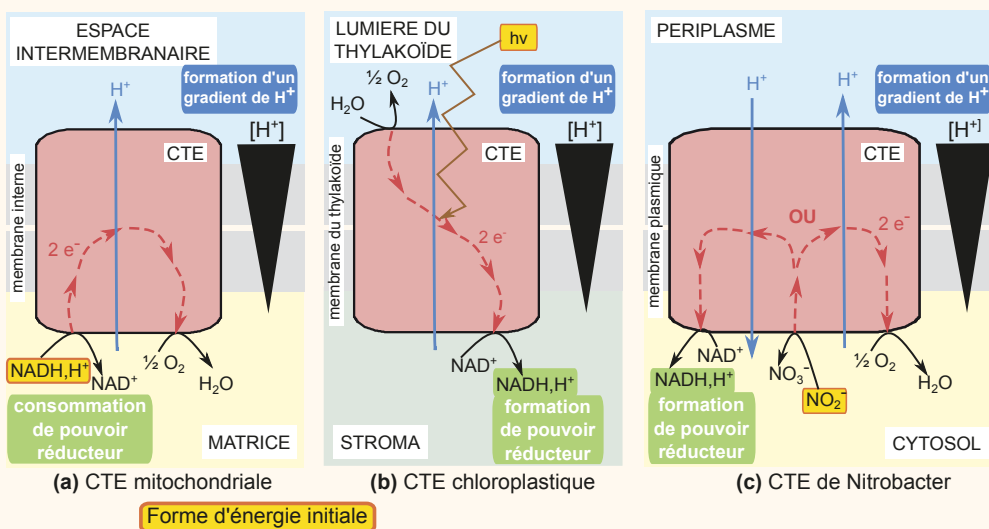
Les constituants d'une chaîne de transport d'électrons (CTE)

Les CTE sont constituées d'un ensemble de **transporteurs d'électrons** associés à la membrane, molécules capables de fixer ou relâcher un électron (c'est-à-dire d'être réduites ou oxydées) :

- des **complexes protéiques** : on y trouve des protéines fer-soufre ou des cytochromes dans lesquelles un atome de fer est capable de capter ou relâcher un électron ;
- des **transporteurs d'électrons mobiles** : soit hydrophobes tels que les quinones (qui diffusent au sein de la bicouche de phospholipides), soit hydrophiles tels que le cytochrome c ou la ferrédoxine (qui diffusent en dehors de la membrane).

Les électrons qui entrent dans la CTE sont donc transférés d'un groupement porteur d'électrons à un autre. La fluidité membranaire permet le déplacement des porteurs d'électrons au sein de la bicouche de phospholipides.

Chaîne respiratoire, chaîne photosynthétique et CTE des bactéries nitrifiantes



Forme d'énergie initiale

Comparaison des CTE des mitochondries, des chloroplastes et des bactéries nitrifiantes. Dans les chapitres 10 et 11, ont été étudiées les CTE des mitochondries, des chloroplastes et des bactéries nitrifiantes. Dans les 3 cas, les CTE couplent :

- un **transfert d'électrons** depuis un donneur initial jusqu'à un accepteur final, en passant par différents groupements porteurs d'électrons ;
- une **translocation de protons** à l'origine d'un gradient de protons qui permet ensuite la synthèse d'ATP par l'ATP-synthase.

Ces CTE diffèrent par :

- la **forme d'énergie** utilisée : pouvoir réducteur des coenzymes (chaîne respiratoire), énergie lumineuse (chaîne photosynthétique), énergie du NO_2^- (CTE des bactéries nitrifiantes) ;
- le fait qu'elles produisent des **coenzymes réduites** (CTE du chloroplaste et de *Nitrobacter*, associées à l'autotrophie) ou les oxydent (CTE de mitochondrie, associée à l'hétérotrophie).

Les fortes similitudes entre ces CTE sont liées à l'origine bactérienne de ces organites. En effet, les mitochondries et les chloroplastes dérivent de bactéries ancestrales ayant été intégrées à une cellule eucaryote par endosymbiose.

Voir chapitre 7, Zoom 1

Voir chapitre 10, § 3.2 et 4.1 et chapitre 11, § 4.3

Voir chapitre 10, § 3.3

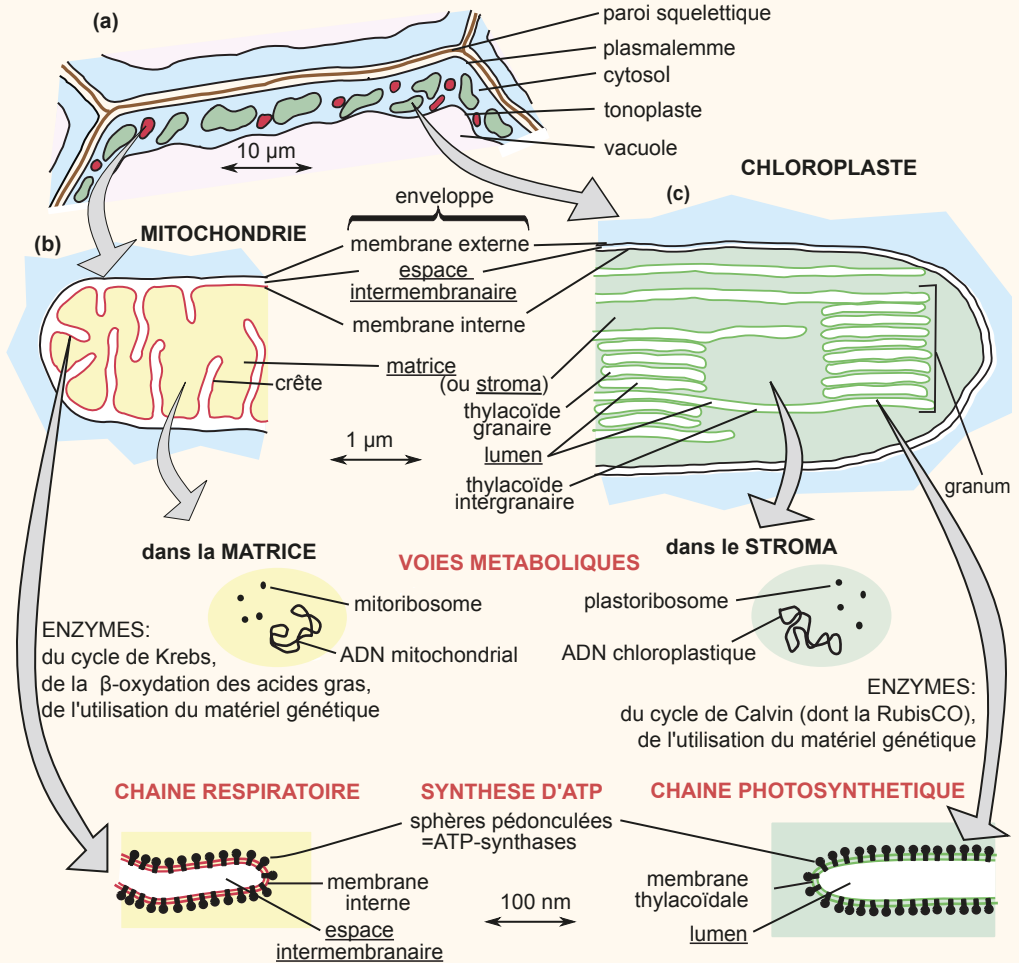
Voir ouvrage de 2^e année

ZOOM 4

Mitochondries et chloroplastes

Des organites pluricompartimentés

Mitochondries et chloroplastes sont des organites présentant des membranes internes qui délimitent des compartiments spécialisés : une division du travail est ainsi possible entre leurs compartiments.



Mitochondries et chloroplastes, des organites compartimentés. Les différents compartiments des mitochondries et des chloroplastes sont soulignés dans les légendes.

Des organites résultant d'une endosymbiose

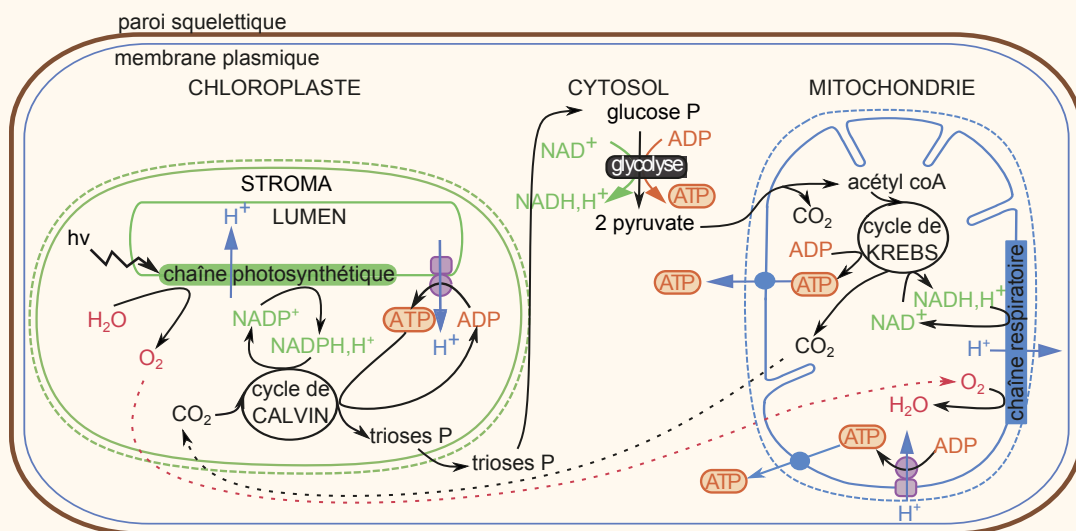
Les mitochondries dérivent d'un événement unique d'**endosymbiose** au cours duquel une bactérie a été endocytée dans une cellule eucaryote ancestrale avant d'être progressivement intégrée au métabolisme cellulaire : c'est là l'origine des mitochondries de l'ensemble des cellules eucaryotes actuelles. Il en est de même des chloroplastes qui dérivent de l'endosymbiose d'une cyanobactérie.

De nombreux arguments valident cette théorie endosymbiotique. Le **génom**e des mitochondries et des plastes s'apparente au génome bactérien : molécule d'ADN circulaire non associée à des histones, en plusieurs copies identiques, et se dupliquant indépendamment du cycle cellulaire. Les mitochondries et les plastes sont capables de synthétiser une partie de leurs protéines, grâce à des **ribosomes** similaires aux ribosomes bactériens. D'ailleurs, les **phylogénies** des ARNr 16S conduisent à placer mitochondries et plastes au sein des eubactéries, et non au sein des eucaryotes. Enfin, les **membranes** internes des mitochondries et des plastes présentent des similitudes biochimiques (composition lipidique) avec les membranes bactériennes.

Des organites complémentaires dans les cellules autotrophes

La figure ci-dessous montre la complémentarité fonctionnelle entre chloroplastes et mitochondries, au sein d'une cellule eucaryote photosynthétique. Si ces organites sont tous deux capables de synthétiser l'ATP, la membrane interne des chloroplastes est imperméable à l'ATP, contrairement à celle des mitochondries. L'ATP synthétisé par la membrane des thylakoïdes reste donc au sein du stroma où il permet la synthèse de matière organique au cours du cycle de Calvin. À l'inverse, l'ATP synthétisé par la mitochondrie est exporté vers le cytosol, à travers un antiport ATP/ADP, où il permet la réalisation des travaux cellulaires endergoniques.

De plus, la matière organique produite par les chloroplastes (trioses-P) peut, après glycolyse, être réoxydée dans les mitochondries au cours du catabolisme. O₂, déchet de la photosynthèse du chloroplaste, peut être utilisé par les mitochondries comme accepteur d'électrons, tandis qu'à l'inverse, CO₂, déchet de la respiration mitochondriale, peut être utilisé par les chloroplastes comme source de carbone minéral.



Complémentarité fonctionnelle entre chloroplastes et mitochondries dans une cellule eucaryote photosynthétique.

Réviser

Résumé

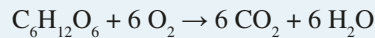
La matière organique prélevée ou synthétisée par une cellule peut être :

- soit stockée, permettant ainsi de faire face aux fluctuations de l'approvisionnement ;
- soit utilisée au cours de la synthèse des molécules nécessaires à la structure et au fonctionnement de la cellule, c'est l'**anabolisme** ;
- soit dégradée au cours d'une **voie catabolique** (fermentation ou respiration). L'énergie chimique contenue dans la matière organique est alors convertie en ATP, avec un rendement plus ou moins efficace. Cette voie produit également des déchets (CO_2 , NH_4^+ , ...) qui ne sont pas utilisables par les cellules animales hétérotrophes pour le carbone et l'azote et sont donc éliminés.

L'ATP peut être produit par différents modes de synthèse :

- la **transphosphorylation** : un phosphate inorganique (P_i) est transféré sur l'ADP à partir d'un intermédiaire phosphorylé.
- la phosphorylation de l'ADP par l'**ATP-synthase**, à partir de l'énergie du gradient de protons formé au niveau d'une chaîne de transport d'électrons. Dans le cas de la chaîne photosynthétique qui utilise l'énergie lumineuse, on parle de **photophosphorylation**. Dans le cas de la chaîne respiratoire qui récupère de l'énergie en oxydant le pouvoir réducteur, on parle de **phosphorylation oxydative**.

La respiration est une oxydation totale du carbone par le dioxygène, réaction fortement exergonique permettant la synthèse d'environ 38 ATP :



La fermentation est une dégradation de molécules organiques à l'issue de laquelle les déchets sont encore partiellement réduits. Le rendement de la fermentation (lactique par exemple) est donc inférieur à celui de la respiration et n'aboutit à la synthèse que de 2 ATP par molécule de glucose :



Attention

- Pour les grandes voies métaboliques (glycolyse, cycle de Krebs...), privilégier la compréhension des grandes étapes (aspect énergétique, oxydation-réduction...) à l'apprentissage systématique de chaque réaction.
- Être capable de proposer une **comparaison des chaînes de transport d'électrons** de la mitochondrie et du chloroplaste, en montrant leurs points communs (transfert d'électrons, translocations de protons, associées à l'ATP-synthase) et leurs différences (donneurs et accepteurs d'électrons, consommation ou production de pouvoir réducteur, place par rapports aux cycles).

Figure de synthèse : voir Rabat 2 de couverture

S'entraîner

QCM de connaissances

- 1 L'acétyl-coenzyme A :
 - a. Peut être formé par oxydation d'un acide gras.
 - b. Est produit au cours de la glycolyse.
 - c. Est consommé au cours du cycle de Krebs.
 - d. Est une chaîne à 6 carbones, portée par une coenzyme.
- 2 La glycolyse :
 - a. Peut être activée quand les besoins cellulaires en ATP augmentent.
 - b. Se déroule dans la matrice mitochondriale.
 - c. Provoque une oxydation du carbone et aboutit à une libération de CO_2 .
 - d. Est une oxydation du glucose associée à une réduction de coenzymes redox.
- 3 Le pouvoir réducteur :
 - a. Est consommé par le cycle de Krebs.
 - b. Est consommé par le cycle de Calvin.
 - c. Est produit par la chaîne respiratoire.
 - d. Est consommé par la chaîne respiratoire.
- 4 Dans une cellule végétale autotrophe, les trioses-P issus du cycle de Calvin :
 - a. Peuvent être oxydés par le catabolisme oxydatif, permettant la formation d'ATP.
 - b. Sont une association de 3 oses reliés par des groupements phosphate.
 - c. Sont des oses à 3 carbones, portant un groupement phosphate.
 - d. Peuvent être stockés sous forme de glycogène au niveau des chloroplastes.

QCM à partir de documents

Phosphorylation oxydative dans la mitochondrie (d'après sujet de CAPES externe 2004)

NB : pour cet exercice, on conseille de se remémorer la figure 11.12.

Une suspension de mitochondries est introduite au temps zéro dans un milieu tamponné préalablement oxygéné et présentant un excès de phosphate inorganique Pi . Grâce à une électrode de Clark, on suit l'évolution de la concentration en dioxygène du milieu (figure 11.16) pendant que la suspension est soumise à divers traitements (a, b, c).

Dans les 3 cas (a, b et c), on ajoute une quantité précise d'ADP ($90 \mu\text{mol}$) d'une part et un donneur d'électrons en excès d'autre part. Ce donneur d'électrons peut être soit le NADH (**traitement a** où le malate va libérer du NADH), soit le FADH_2 (**traitement b** où le succinate va libérer du FADH_2), soit un mélange « ascorbate + TMPD » qui va donner directement les électrons à la cytochrome c de la chaîne respiratoire (**traitement c**).

- 1 Suite aux différents traitements (a, b et c) :
 - a. Les électrons sont transférés du donneur d'électrons jusqu'à l'ADP.
 - b. La concentration en O_2 diminue du fait de la réduction de l' O_2 en H_2O .
 - c. La réaction s'arrêtera lorsqu'il n'y aura plus d'ADP.
 - d. La réaction s'arrêtera lorsqu'il n'y aura plus de donneur d'électrons.
- 2 À propos des réactions redox qui ont lieu suite aux différents traitements (a, b et c), on peut dire que :
 - a. La consommation de $15 \mu\text{mol}$ d' O_2 , suite au traitement a, signifie que $30 \mu\text{mol}$ de NADH ont été oxydés.

- b. Suite au traitement b, les électrons passent par les complexes II, III et IV.
 - c. Suite au traitement c, les électrons traversent les complexes III et IV.
- 3 L'analyse des résultats permet de déduire que :
- a. L'oxydation d'un NADH permet la synthèse de 3 ATP.
 - b. L'oxydation d'un FADH₂ permet une synthèse d'ATP plus importante que l'oxydation d'un NADH.
 - c. Le transfert d'électrons à travers le complexe IV ne permet pas la synthèse d'ATP.

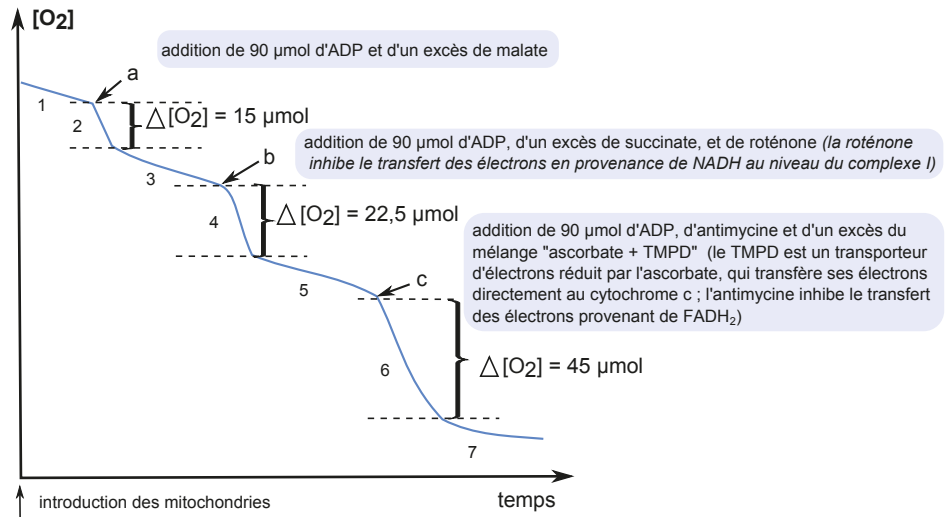


Figure 11.16 Suivi de la concentration en dioxygène dans une suspension de mitochondries soumise à divers traitements (a, b et c) en présence d'un excès de Pi.

On souhaite maintenant calculer les variations d'enthalpie libre ΔG' associées aux réactions qui ont lieu au niveau de la chaîne respiratoire. On rappelle quelques valeurs :

$$E'(\text{NAD}^+/\text{NADH}, \text{H}^+) = -0,3 \text{ V} \quad E'(\text{FAD}/\text{FADH}_2) = -0,05 \text{ V} \quad E'(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}) = +0,8 \text{ V}$$

$$[\text{H}^+]_{\text{matrice mitochondriale}} = 10^{-8} \text{ mol.L}^{-1}, \text{ noté } C_1 \quad [\text{H}^+]_{\text{espace intermembranaire}} = 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}, \text{ noté } C_2$$

$$\Delta E_{\text{membrane interne}} = -150 \text{ mV} \quad F = 96\,500 \text{ C.mol}^{-1} \quad R \approx 8 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1} \quad T = 298 \text{ K}$$

- 4 Parmi les affirmations ci-dessous, lesquelles sont exactes :
- a. La variation d'enthalpie libre ΔG' associée au flux d'un proton de la matrice vers l'espace intermembranaire est de l'ordre de +20 kJ.mol⁻¹.
 - b. La variation d'enthalpie libre ΔG' associée à l'oxydation d'un NADH par l'O₂ est de l'ordre de -210 kJ.mol⁻¹.
 - c. La variation d'enthalpie libre ΔG' associée à l'oxydation d'un FADH₂ par l'O₂ est de l'ordre de -100 kJ.mol⁻¹.
- 5 Le nombre maximal théorique de protons qui peuvent être transférés par la chaîne respiratoire est de :
- a. 6 lors de l'oxydation d'un NADH.
 - b. 8 lors de l'oxydation d'un FADH₂.

Question de synthèse courte

Les coenzymes d'oxydo-réduction dans le métabolisme énergétique.