

Couplages et conversions énergétiques

Les êtres vivants accomplissent en permanence des fonctions utilisant de l'énergie telles que le transport de substances, la synthèse de macromolécules, ou encore le mouvement. Cette énergie provient de la **conversion** de sources variées comme la lumière ou les nutriments organiques. Les conversions aboutissent à des formes d'énergie utilisables et pouvant être stockées par la cellule : les formes chimiques qui dominent sont des coenzymes de transfert comme l'adénosine triphosphate (ATP) et les coenzymes d'oxydo-réduction (sous leur forme réduite). Des gradients ioniques entre deux compartiments séparés par une membrane sont également sources d'énergie potentielle.

Le sujet propose ici une réflexion sur la notion de couplage énergétique et son importance dans les conversions d'énergie. Les formes d'énergie que nous aborderons seront chimiques (en distinguant natures rédox et chimiques pures) mais aussi osmotiques, lumineuse et mécaniques.

Comment sont assurés les couplages réactionnels ? Par quels mécanismes les enzymes assurent-elles les conversions d'énergie ? En quoi ces conversions sont-elles impliquées dans l'activité cellulaire ?

Pour répondre à cette question, nous analyserons d'abord quelques grandes conversions énergétiques mettant en jeu une enzyme spécifique, avant de montrer l'importance et les modalités des couplages assurant en premier lieu l'approvisionnement des cellules en énergie puis son utilisation dans l'activité cellulaire.

1. Les enzymes, agents essentiels de couplage dans les conversions énergétiques

1.1. Couplage de réactions exergoniques et endergoniques par une enzyme

Les réactions chimiques mises en jeu dans les fonctions cellulaires ne sont pas spontanées dans leur grande majorité : elles requièrent un **couplage énergétique**, c'est-à-dire l'association d'une réaction libérant de l'énergie avec une autre qui en consomme.

- Le complexe d'oxydation de l'eau (COE) est un domaine enzymatique du photosystème II. Il convertit l'énergie lumineuse en énergie rédox : le transfert d'un électron de l'eau se fait vers la plastoquinone malgré le potentiel rédox défavorable, grâce à l'énergie de résonance des pigments issue de l'énergie lumineuse captée.
- L'ATP synthase convertit l'énergie d'un gradient de protons en énergie chimique sous forme d'ATP : le couplage chimio-osmotique (avec une phase mécanique)

idée = optimisation du couplage par proximité physique et régulation spatiale dans une enzyme

BILAN : Les réactions du métabolisme sont rendues possible grâce à des **enzymes**, indispensables actrices du métabolisme, capables d'associer spatialement deux réactions thermodynamiquement opposées. Elles jouent ainsi un rôle central dans les couplages énergétiques.

Argumentation

Les chloroplastes sont les organites où sont réalisées les réactions de la photosynthèse. Ils contiennent de petits espaces clos, délimités par une membrane, les thylakoïdes : ils sont le siège de la production des coenzymes utilisés (ATP et NADPH, H⁺) lors du cycle de Calvin à l'origine des sucres.

L'expérience de Jagendorf décrite ici a été réalisée avec des thylakoïdes isolés. Incubés longuement dans une solution tampon à pH 4, leur contenu, le lumen, s'acidifie. Si de l'ADP et du phosphate inorganique Pi sont ajoutés à la solution tampon, aucune réaction ne se produit. Par contre, si les thylakoïdes à lumen acide sont placés dans une solution à pH 8 contenant de l'ADP et du Pi, alors de l'ATP apparaît.

La synthèse d'ATP est rendue possible par une différence de pH entre le lumen acide et le stroma plus basique : il s'agit de la conversion d'un gradient de concentration de protons en énergie chimique sous forme d'ATP : c'est le **couplage osmo-chimique**.

Des thylakoïdes dénués d'ATP synthase membranaire perdent cette capacité à produire l'ATP.

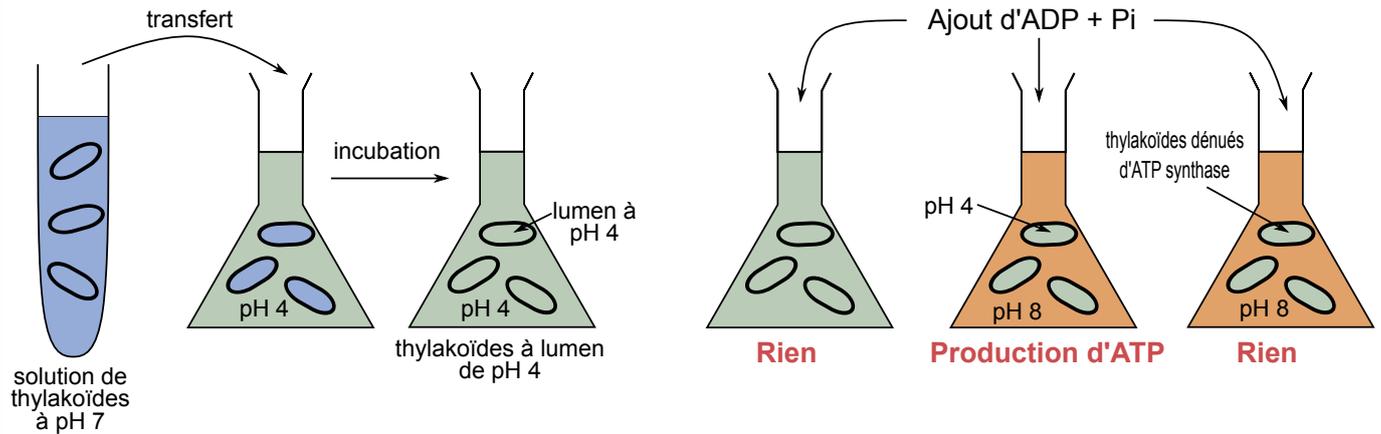


Schéma de l'expérience de Jagendorf

(toute solution présentant un pH identique au pH du lumen, ici pH 4, ne génère aucune production d'ATP)

1.2. Des complexes multi-enzymatiques et des associations favorisant les réactions

- Chaîne respiratoire mitochondriale et formation d'un gradient de protons
- du pyruvate à l'acétyl-coenzyme A : des réactions en chaîne conduisant à la formation d'un coenzyme rédox (NADH, H⁺) et un coenzyme de transfert (acétyl-coenzyme A).

2. Les conversions énergétiques assurant l'approvisionnement des cellules

2.1. La conversion de l'énergie lumineuse chez les organismes photosynthétiques

- De l'énergie lumineuse absorbée par les pigments à un potentiel rédox et un gradient de protons
- Conversion du gradient de protons en énergie chimique sous forme d'ATP

→ Schéma d'un thylakoïde fonctionnel montrant clairement les formes d'énergie mises en jeu jusqu'à l'ATP et le NADPH, H⁺

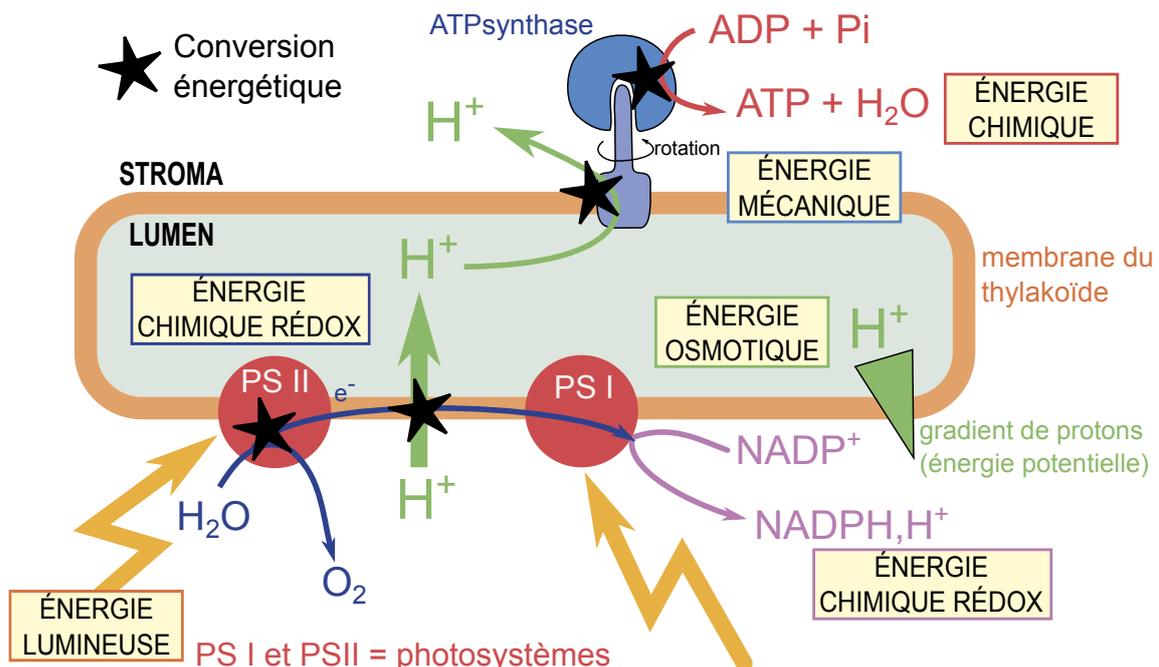


Schéma bilan des conversions entre les différentes formes d'énergie dans un thylakoïde

L'énergie lumineuse est la source initiale d'énergie, captée par les pigments des photosystèmes. L'énergie est convertie en énergie chimique, sous la forme d'électrons issus de la chlorophylle a oxydée (ensuite réduite par l'apport d'électrons de la molécule d'eau). Ces électrons transmis au sein de la membrane du thylakoïde génèrent une translocation de protons vers l'intérieur du lumen : le gradient ainsi formé constitue une nouvelle forme d'énergie : l'énergie osmotique : il s'agit ainsi d'un couplage chimio-osmotique.

Le retour des protons vers le stroma se fait à travers l'ATP synthase : les protons traversent la membrane en motorisant le rotor. La rotation induite est une forme d'énergie mécanique, convertie en énergie chimique par les sous-unités catalytiques du stator qui synthétisent de l'ATP, forme chimique d'énergie : il s'agit donc ici d'un couplage osmo-mécano-chimique. Par ailleurs, les électrons réduisent le NADP^+ , à l'origine d'un potentiel énergétique réducteur, le NADPH, H^+ .

Le thylakoïde est donc le lieu de nombreuses conversions, qui mettent en jeu des enzymes, des transporteurs d'électrons, des pigments et des coenzymes.

2.2. La conversion de l'énergie chimique des substrats organiques

- Glycolyse et oxydation du glucose
- Respiration cellulaire et mitochondrie production de $\text{NADH}, \text{H}^+ / \text{FADH}_2$ et d'ATP

3. Des couplages énergétiques au service des activités cellulaires

3.1. Transport actif transmembranaire

- Pompes ioniques (Na^+ / K^+ , H^+ / K^+) → maintien des gradients électrochimiques
- Consomme directement de l'ATP
- impliqué dans : les cotransports, la régulation du pH et du volume cellulaire, l'expulsion des ions calcium...

3.2. Mouvements cellulaires et musculaire

- Transport intracellulaire : moteurs moléculaires (ex : kinésine, dynéine)
- Ondulation des cils et flagelles par la dynéine des microtubules

3.3. Biosynthèses et maintien de l'intégrité cellulaire

- Synthèses d'ADN, d'ARN, de protéines, de polymères glucidiques : réactions endergoniques couplées à l'hydrolyse d'ATP ou GTP
- Rôle central des enzymes de synthèse (ARN polymérases, ligases...)

Conclusion

Les conversions d'énergie permettent aux cellules de produire des coenzymes tels l'ATP, vecteur universel d'énergie chimique mais aussi les coenzymes réduits. Les couplages sont des associations de réactions thermodynamiquement opposées mais dont la réalisation en parallèle est rendue possible dans le site actif des enzymes.

La source initiale d'énergie est la lumière du Soleil (si on néglige le type trophique chimolithotrophe comme chez *Nitrobacter*). Les molécules organiques sont ensuite les formes convertibles d'énergie, indispensables à l'activité des êtres vivants.

Grâce aux enzymes, cette énergie est efficacement couplée aux fonctions vitales, telles les synthèses, les flux de matière, les déformations et mouvements, etc.

(*Ouverture*) Des transferts d'énergie sont également observés à l'échelle de l'écosystème, dans les chaînes alimentaires dont la base est toujours la production primaire des êtres photosynthétiques. À chaque niveau trophique, l'énergie est transmise, avec un rendement faible, inférieur à 10% entre deux niveaux.