

Activité 4: La phase photochimique de la photosynthèse

Le processus de la photosynthèse est constitué de deux phases. La première phase est la phase photochimique. Elle se déroule dans les thylakoïdes chloroplastiques où l'énergie lumineuse est absorbée par la chlorophylle pour être convertie en énergie chimique.

Comment l'énergie lumineuse est-elle convertie en énergie chimique ?

I: L'existence d'un intermédiaire présumé entre l'oxydation de l'eau et la réduction du carbone: L'expérience de Hill

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): $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
- La réduction du carbone (phase non photochimique): $\text{CO}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$

Pour expliquer ce couplage, différentes hypothèses peuvent être avancées. Il pourrait s'agir d'un couplage direct entre l'oxydation de l'eau et la réduction du carbone. En 1937, Hill envisage une autre hypothèse selon laquelle il existerait un intermédiaire (accepteur d'électrons) entre l'oxydation de l'eau et la réduction du carbone.

L'expérience de Hill se déroule en l'absence d'accepteur naturel d'électrons: L'observation microscopique des chloroplastes montre la présence de grains d'amidon dans le stroma. La réduction du carbone aurait donc lieu dans le stroma, et l'hypothétique intermédiaire "R" devrait donc être localisé dans le stroma si il existe. Pour éliminer cet hypothétique intermédiaire naturel, Hill utilise des chloroplastes lésés, de telle sorte que les constituants du stroma soient dilués et ne puissent plus intervenir dans aucune réaction à l'intérieur du chloroplaste. De plus, l'expérience se déroule en l'absence de source de CO_2 .

Hill mesure les variations de la teneur en O_2 du milieu en fonction du temps, de la présence/absence de lumière et de la présence/absence d'un accepteur d'électron "R" appelé « réactif de Hill ».

On observe que:

- En l'absence de l'accepteur d'électron, la teneur en O_2 diminue à l'obscurité mais aussi à la lumière.
- En présence de l'accepteur d'électrons et de lumière, les chloroplastes lésés produisent de l' O_2 (oxydation de l'eau). Cette production cesse à l'obscurité et reprend à la lumière.

La présence d'un accepteur d'électron et de lumière est indispensable pour l'oxydation de l'eau. La présence de CO_2 n'est pas forcément nécessaire; n'importe quel accepteur d'électrons peut accepter les électrons de l'eau. Cela suggère que les électrons arrachés à l'eau lors de son oxydation ne seraient pas directement acceptés par le CO_2 ; il pourrait exister un ou des intermédiaires qui jouent le rôle d'accepteurs d'électrons, et qui seraient présents dans le stroma.

Conclusion: L'oxydation de l'eau semble couplée à la réduction d'un accepteur d'électrons jouant le rôle d'intermédiaire entre l'oxydation de l'eau et la réduction du carbone. En présence de lumière, R est réduit en RH_2 tandis que l'eau est oxydée. Ces deux réactions seraient donc couplées:

Réduction de l'accepteur d'électrons: 4Fe^{3+} (Fer oxydé) + $4\text{e}^- \rightarrow 4\text{Fe}^{2+}$ (Fer réduit) ou $2 \text{R} + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2 \text{RH}_2$

Oxydation de l'eau: $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

L'équation bilan de cet ensemble de réactions d'oxydoréductions peut alors s'écrire: $2 \text{R} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{RH}_2 + \text{O}_2$

RH_2 possède un pouvoir réducteur: il est capable de donner des électrons et des protons permettant ainsi la réduction d'un accepteur d'électron tel que le CO_2 . RH_2 représente de l'énergie chimique potentielle: il y a eu conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique.

II: Les photo-systèmes thylakoïdiens captent l'énergie lumineuse et fournissent l'énergie d'activation nécessaire aux réactions d'oxydoréductions ultérieures (Document 3 page 19)

Les pigments photosynthétiques sont organisés en photo-systèmes au sein de la membrane des thylakoïdes. La réaction d'oxydoréduction globale de la photosynthèse ne peut être spontanée. Il y a nécessité d'un apport d'énergie: c'est l'énergie lumineuse captée par les pigments photosynthétiques qui rend possible la réalisation des réactions d'oxydoréductions ultérieures. L'énergie lumineuse des photons excite (oxyde) la chlorophylle qui transfère ses électrons via une chaîne d'accepteurs localisés dans la membrane des thylakoïdes vers un accepteur final R présent à l'état oxydé dans le stroma et qui se trouve alors réduit en RH_2 . Il y a donc conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique grâce aux propriétés des pigments chlorophylliens.

Couplage entre l'oxydation de la chlorophylle et la réduction de l'accepteur final:

- Oxydation de la chlorophylle 4Chl réduites $\rightarrow 4 \text{Chl}^*$ oxydées + 4e^-
- Réduction de l'accepteur final $2 \text{R} + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2 \text{RH}_2$

Les chlorophylles ayant perdu un électron se retrouvent oxydées (photo-excitation). Pour que le processus se poursuive, la chlorophylle doit revenir à son état initial en acceptant les électrons provenant de l'oxydation de l'eau.

Couplage entre l'oxydation de l'eau et la réduction de la chlorophylle:

- Oxydation de l'eau: $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
- Réduction de la chlorophylle: $4 \text{Chl}^* \text{ oxydées} + 4\text{e}^- \rightarrow 4 \text{Chl}$ réduites

III: L'oxydation de l'eau dans le lumen crée un gradient de protons qui génère une force proton motrice activant des ATP synthétases situées dans la membrane des thylakoïdes.

On observe (Document 2) que à la lumière:

- Le pH augmente dans le stroma, donc la concentration en protons diminue, ce qui s'interprète comme la réduction de R
- Le pH diminue dans le lumen, donc la concentration en protons augmente, ce qui s'interprète comme l'oxydation de l'eau (qui serait donc localisée dans le lumen !)

La libération de protons dans le lumen (oxydation de l'eau) et la consommation de protons dans le stroma (réduction de R) créent un gradient de protons entre le lumen fortement concentré et le stroma faiblement concentré.

On observe (Document 2) que après trois minutes, la différence de concentration en protons entre le lumen et le stroma devient constante (puis décroît légèrement). Il s'instaurerait donc après ce délai d'environ trois minutes, un système de transport des protons du lumen vers le stroma qui tendrait à maintenir constante la différence de concentration en protons.

L'ATP ou adénosine triphosphate est une molécule essentielle dans les transferts d'énergie. Son hydrolyse (en ADP + Pi) s'accompagne d'une libération d'énergie: l'hydrolyse d'une mole d'ATP fournit 30,5 à 50 kJoules selon les conditions. La membrane des thylakoïdes renferme des complexes enzymatiques: les ATP synthétases capables de réaliser la phosphorylation (endergonique) de l'ADP pour produire de l'ATP.

On observe (Document 3) que la synthèse d'ATP est conditionnée par l'existence d'un gradient de protons entre le lumen fortement concentré (pH 4) et le stroma faiblement concentré (pH 8). Le gradient de proton ou force proton-motrice apporte l'énergie nécessaire à la phosphorylation de l'ADP en ATP au sein des ATP synthétases de la membrane thylakoidienne.

Conclusion

L'énergie lumineuse captée par les pigments photosynthétiques des photo-systèmes thylakoidiens oxyde la chlorophylle. Les électrons arrachés à la chlorophylle viennent réduire, dans le stroma, un accepteur final R en RH_2 qui possède un pouvoir réducteur et constitue de l'énergie chimique.

La continuité du processus implique une réduction de la chlorophylle. Son couplage avec l'oxydation de l'eau dans le lumen induit une augmentation de la concentration en protons dans le lumen à l'origine d'un gradient de protons qui active des ATP synthétases permettant la phosphorylation de l'ADP en ATP qui est une forme de transfert d'énergie chimique.

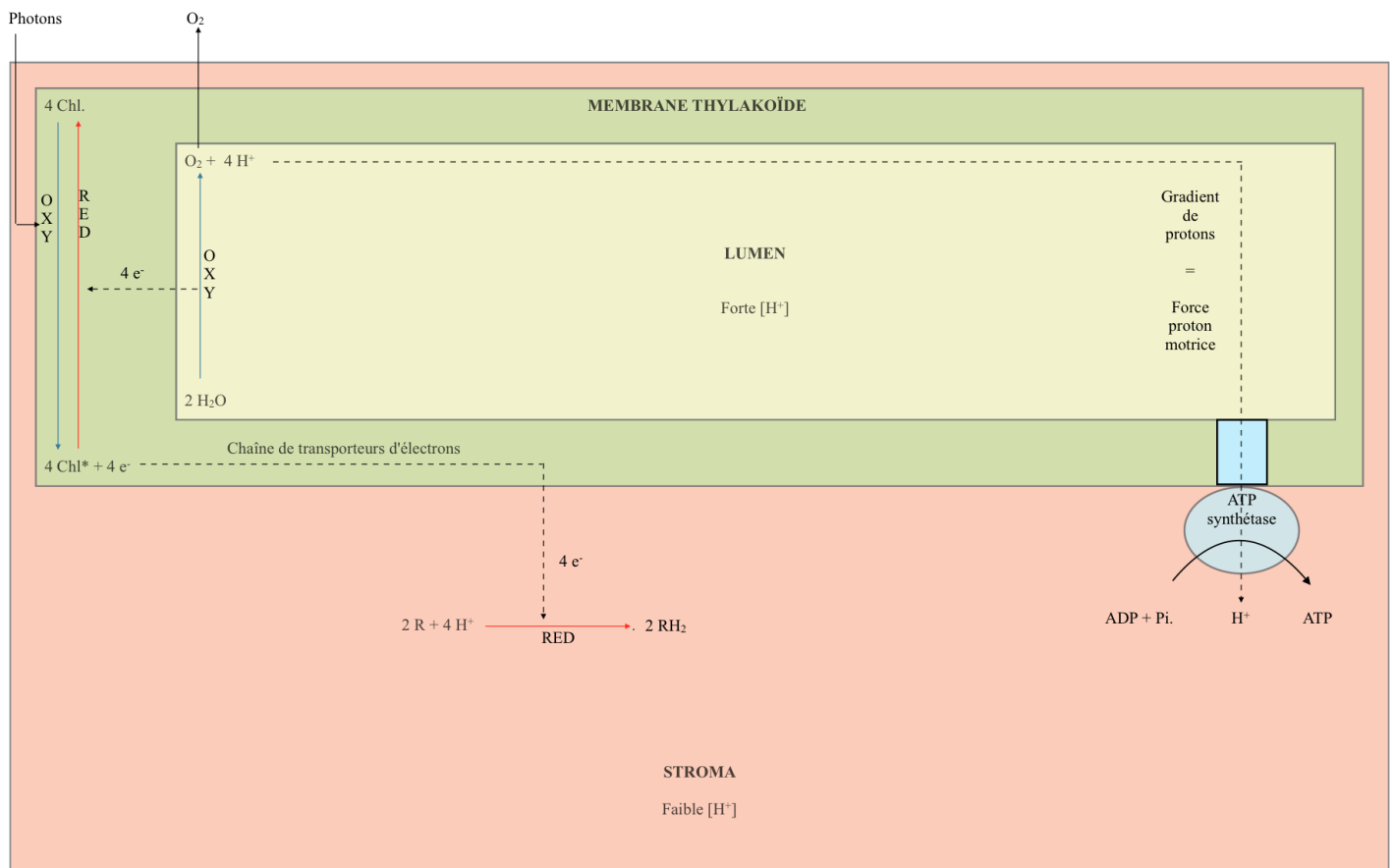


Schéma bilan de la phase photochimique de la photosynthèse au sein du chloroplaste.