

La photosynthèse : quel historique et quel futur ?

Fiche **QUESTIONS SUR...** n° 06.02.Q03

2021, révisée en novembre 2024

Mots clés : photosynthèse, photorespiration, photochimie

La photosynthèse a été découverte vers la fin du XVIII^e siècle. De nombreux progrès ont été réalisés dans la connaissance de ce processus au cours des siècles suivants, cependant il faudra attendre le XXI^e siècle pour espérer des avancées significatives dans l'amélioration des mécanismes photosynthétiques et de leur traduction en biomasse dans les champs.

Mise en évidence du processus photosynthétique

Depuis Aristote et jusqu'au XVII^e siècle, il était admis que les plantes se nourrissent essentiellement des aliments tirés du sol (eau et humus), tandis que les fonctions physiologiques de leurs parties vertes demeurèrent méconnues. Il fallut attendre le XVII^e et le début du XVIII^e siècles pour que soit observé que *"les plantes empruntent la plus grande part de leur nourriture à l'air ambiant grâce à l'intervention des feuilles et que la lumière, reçue par les feuilles joue un rôle bénéfique dans le processus"* (J. Sénebier).

Au cours de la période 1750-1800, des chimistes devinrent les pionniers de la photosynthèse. Ils mirent en évidence que les plantes, exposées à la lumière, fixent le dioxyde de carbone (CO₂) et produisent de l'oxygène (O₂), et que, par ce processus réalisé grâce à l'énergie de la lumière, les plantes synthétisent de la matière organique : elles photosynthétisent.

Les chercheurs établirent aussi que le processus de photosynthèse se révèle être l'inverse du processus respiratoire, et montrèrent que le volume du dégagement d'O₂ est égal à celui du CO₂ absorbé.

Les scientifiques du XIX^e siècle découvrirent ensuite les pigments impliqués en photosynthèse : la chlorophylle et les caroténoïdes, et plus tard les chloroplastes, lieux cellulaires de la photosynthèse dans les cellules foliaires. On observa aussi que les radiations absorbées dans le bleu et dans le rouge sont les plus actives pour stimuler ce que l'on appelle l'assimilation chlorophyllienne.

Début 1860, fut définie une première équation montrant que la lumière est convertie en énergie chimique utilisée pour rendre plus énergétiques les produits de la photosynthèse (notamment les sucres et les lipides) :



Implication de mécanismes photochimiques

Les découvertes des années 1930

Au début des années 1930, il fut établi que la photosynthèse nécessite des réactions d'oxydoréduction c'est-à-dire impliquant des échanges d'électrons et de protons (ici, entre l'eau H₂O et le dioxyde de carbone CO₂). L'énergie nécessaire à ces échanges est fournie par la lumière (photons), qui est capable de casser ou d'oxyder les molécules d'eau en électrons e⁻ et protons H⁺, avec pour déchet l'oxygène O₂.

Ces réactions photochimiques, qui se déroulent dans les membranes internes des chloroplastes, aboutissent à la synthèse de molécules énergétiques stables, NADPH (Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate) et ATP (Adénosine-Triphosphate).

Les découvertes des années 1960-1970

Au cours des années 1960-1970, les biophysiciens ont montré que la transformation de l'énergie de la lumière en énergie chimique est réalisée par des nanomachines moléculaires : les photosystèmes et les ATP-synthases.

- Les photosystèmes, PS1 et PS2, sont des complexes protéines/pigments constitués
 - d'une antenne qui collecte les photons,
 - et d'un convertisseur d'énergie, le *centre réactionnel*, qui transforme l'énergie de la lumière en molécules énergétiques stables, NADPH.

Ces systèmes sont localisés dans les membranes internes des chloroplastes. Aux photosystèmes sont associées des chaînes de transfert d'électrons composées de "systèmes redox" qui assurent le mouvement des charges électriques entre tous les composants.

- Les ATP-synthases sont des nanomachines complexes également membranaires, qui permettent de récupérer l'énergie des protons pour les transformer en Adénosine-Triphosphate ou ATP (*photophosphorylation*).

- Enfin, il est confirmé, grâce à l'utilisation d'un marqueur radioactif l'oxygène ($^{18}\text{O}_2$), que cet élément O_2 – rejeté par les feuilles au cours de la photosynthèse – est bien issu de l'eau. Il est à l'origine de la plus grande part de l'oxygène de la planète (*Figure 1*).

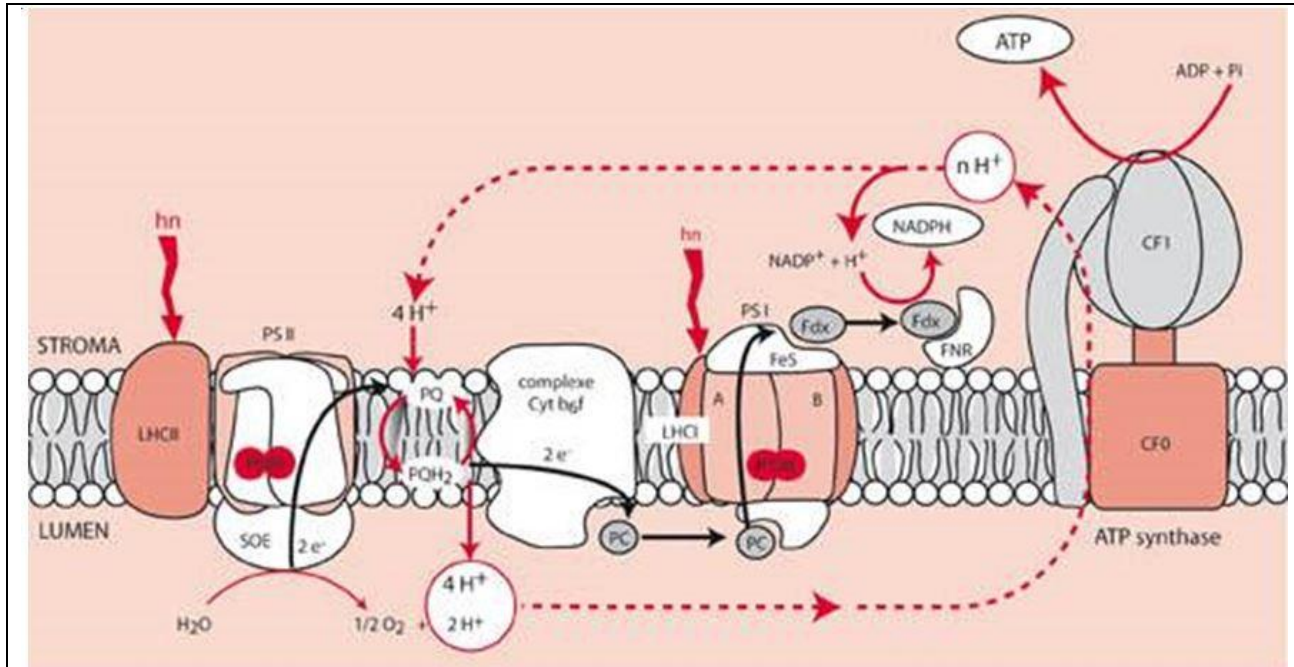


Figure 1 : Schéma de transfert des électrons et protons dans les membranes des chloroplastes lors de la photosynthèse. PS1 (à droite) et PS2 (à gauche), complexe Cyt.B6f (entre les deux PS1 et PS2) et ATP synthase à droite de la figure. (Source : figure Morot-Gaudry et al. Dunod 2009.)

Implication des mécanismes biochimiques

Les découvertes des années 1945-1955

Au cours des années 1945-1955 – à la suite de l'obtention du $^{14}\text{CO}_2$ radioactif qui permet de suivre physiquement le devenir du ^{14}C dans les tissus biologiques – des chercheurs californiens ont déterminé et hiérarchisé les différents composés carbonés impliqués dans l'assimilation photosynthétique du carbone ^{14}C , et ont identifié l'accepteur du $^{14}\text{CO}_2$: le ribulose-1,5-bisphosphate (RuBP), qui est un composé à cinq carbones, rapidement scindé en deux molécules d'acide phosphoglycérique (PGA) ; l'enzyme qui catalyse cette réaction est la ribulose-bisphosphate carboxylase ou rubisco.

Ces molécules, après avoir été *énergisées* par les molécules énergétiques issues de la phase photochimique de la photosynthèse, sont métabolisées :

- d'une part pour régénérer l'accepteur de CO_2 , le RuBP
- d'autre part pour synthétiser (suite à une série de réactions biochimiques) des sucres, des lipides et des acides aminés, qui sont à l'origine de tous les composés organiques des êtres vivants ; c'est le *cycle de Calvin*.

Les découvertes des années 1970

Dans les années 1970, réalisant des expériences de marquage à l'aide d'isotope de l'oxygène ($^{18}\text{O}_2$), des chercheurs américains observèrent que la RuBP-carboxylase¹ (enzyme qui fixe le dioxyde de carbone) est capable de fixer également le dioxygène O_2 (*Figure 2*).

¹ cette enzyme est dénommée *rubisco*, pour : ribulose phosphate carboxylase-oxygénase)

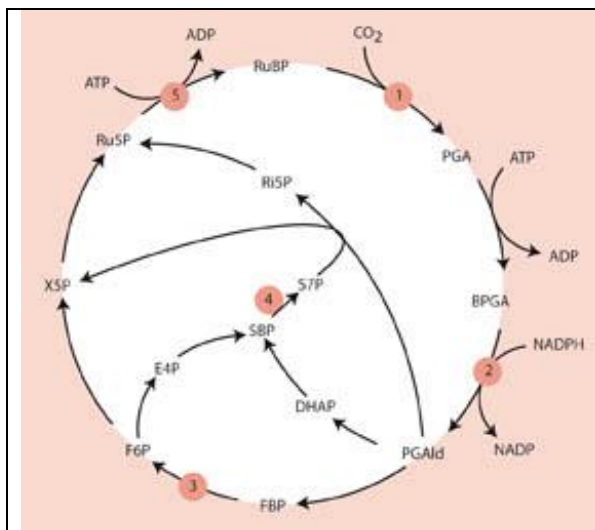


Figure 2 : Schéma du cycle de Calvin montrant les différents intermédiaires photosynthétiques ; ribulose - bisphosphate (RuBP), acide phospho-glycérique (PGA), et autres sucres phosphorylés.

- étape 1 fixation du carbone du CO₂ par la rubisco,
- étape 2 réduction du PGA en glycéraldéhyde-phosphate ou trioses,
- étapes 3 et 4, interconversion des sucres phosphorylés,
- étape 5, régénération du RuBP, l'accepteur du carbone du CO₂.

source : Figure Morot-gaudry et al. Dunod 2009.

La réaction d'oxygénation du ribulose 1,5-bisphosphate, RuBP, produit non seulement de l'acide phosphoglycérique, PGA (molécule source des composés photosynthétiques), mais également du 2P-phosphoglycolate, (2P-glycolate), un inhibiteur du Cycle de Calvin. Ce dernier composé est finalement recyclé en PGA par la voie du 2P-glycolate (ou voie de Tolbert) qui s'accompagne d'une émission de CO₂ (photorespiration), et en conséquence d'une baisse de l'activité photosynthétique traduite également en perte de rendement.

Les découvertes du XXI^e siècle

À partir de l'an 2000, la machinerie photosynthétique commença à être bien connue tant au niveau structure-fonctionnement qu'expression des gènes dans un compartiment cellulaire donné.

Pendant, si des applications dans le domaine agronomique sont reconnues (position des feuilles, densité de plantation, etc.), les essais de modification des mécanismes biophysiques, biochimiques et moléculaires de la photosynthèse ne donnent pas encore de résultats probants.

Les nouvelles approches

Les progrès récents de la biophysique, de la biologie moléculaire, de l'imagerie et de la génomique laissent entrevoir des possibilités de modifications des mécanismes intimes de la photosynthèse, qui pourraient se traduire par des résultats tangibles dans les cultures. Des essais concernent plusieurs domaines de recherche alimentaires et industriels :

- Récemment des chercheurs allemands et américains ont introduit, dans la plante modèle *Arabidopsis thaliana* et dans le tabac, des voies métaboliques nouvelles encore inconnues des biologistes (voies bactériennes essentiellement) : une fois introduites par approches biotechnologiques dans les feuilles de plantes supérieures, elles permettent une métabolisation efficace du 2P-glycolate, produit toxique de la photorespiration. Cette méthode présente un gros avantage : le CO₂ issu de ces voies métaboliques n'est pas rejeté dans l'atmosphère, mais conservé dans les feuilles ; il est alors rapidement réassimilé par la rubisco, ce qui n'est pas le cas des plantes C₃ non transformées où le CO₂ photorespiratoire est rejeté dans l'atmosphère, donc perdu. Chez ces plantes modifiées, où les pertes de carbone photorespiratoire sont réduites, les chercheurs ont observé que l'activité photosynthétique et la production de matière végétale sont en conséquence augmentées d'environ 30 % à 40 %.
- Après des essais infructueux sur l'amélioration des performances de la rubisco par la génétique classique, les chercheurs se sont tournés vers les biotechnologies nouvelles :
 - ils ont sélectionné les carboxylases les plus actives du règne vivant,
 - ils les ont modifiées par génie génétique pour les rendre non sensibles à l'oxygène,

- et les ont introduites, accompagnées des enzymes associées, dans des milieux biologiques simples, où elles ont manifesté des activités 5 à 20 fois supérieures à celles impliquées dans les chaînes métaboliques naturelles.

Il reste toutefois à faire fonctionner ces constructions moléculaires dans des organismes verts, et à concrétiser les résultats escomptés en production de biomasse dans les cultures.

- Après avoir eu connaissance que le système de photosynthèse C4 est apparu plusieurs fois au cours de l'évolution, les chercheurs espèrent transformer génétiquement les plantes C3 (comme le riz, plante de grand intérêt agronomique) en plantes C4, plus productives et plus économes en intrants. De grands consortiums internationaux de biologie végétale (IRRI notamment) sont engagés dans cette recherche, car le riz est une des plantes les plus consommées par les humains. Les premiers résultats sont encourageants.

- Il existe de nombreux autres domaines de recherche en photosynthèse, menant essentiellement à des applications industrielles. Par exemple, dans certaines conditions, il est observé chez certains organismes photosynthétiques qu'une partie des électrons et des protons :

- n'est plus utilisée pour réduire les composés carbonés de la photosynthèse,
- mais est détournée pour synthétiser, en absence d'oxygène, de l'hydrogène H₂ utilisable comme source d'énergie.

Les chercheurs essaient aussi d'imiter la photosynthèse naturelle, en catalysant l'oxydation de l'eau à la manière de la photosynthèse ; la technique utilise un assemblage de fines couches de différents métaux (feuille artificielle), pour obtenir du dihydrogène H₂ utilisé pour faire fonctionner une pile à combustible et donc produire de l'électricité. Toutefois, des progrès techniques sont encore à réaliser pour rendre efficace ce système de bio-production d'hydrogène.

De nombreux autres projets sont en cours, notamment :

- L'amélioration de l'étendue du spectre de longueur d'ondes perceptible par les chloroplastes, en utilisant l'adjonction de nanotubes de carbone. Un laboratoire du *Massachusetts Institute of Technology* aurait ainsi obtenu une amélioration de 50 % de l'absorption du rayonnement lumineux.
- La réduction des pertes d'énergie par les plantes soumises à des contraintes d'éclaircissements élevés.
- Le couplage du principe photochimique de la photosynthèse (qui transforme l'énergie lumineuse en énergie chimique) avec celui des modules photovoltaïques des panneaux solaires, afin d'en améliorer le rendement.

Jean-François MOROT-GAUDRY, membre de l'Académie d'Agriculture de France

Ce qu'il faut retenir :

Il existe de nombreux travaux prometteurs sur la photosynthèse, sans que l'on puisse aujourd'hui dire avec certitude lesquels seront susceptibles d'applications agricoles et industrielles à grande échelle.

Il est néanmoins clair que les nouvelles biotechnologies offrent l'opportunité d'accélérer l'évolution, en optimisant l'efficacité photosynthétique des plantes ; ce sont là de nouvelles cibles pour les sélectionneurs.

Cette accélération vise à des adaptations aux besoins de l'humanité, tout en respectant l'environnement et en évitant les changements climatiques brutaux.

Pour en savoir plus :

- J-F. MOROT-GAUDRY : *Les métabolismes photosynthétiques ; intérêt pour l'agronomie*, Les Potentiels de la Science, Académie d'Agriculture, 2014
- J-F. MOROT-GAUDRY : *Peut-on améliorer les capacités photosynthétiques des plantes ?* Les Potentiels de la Science, Académie d'Agriculture, 2018
- J-F. MOROT-GAUDRY : *Historique et prospective de la recherche en photosynthèse*, Les Potentiels de la Science, Académie d'Agriculture, 2018