

MONSIEUR JOURDAIN ET LA PHOTOSYNTHÈSE

Les plantes, en fournissant l'oxygène de l'air via la photosynthèse, sont au cœur de la vie. **Francis-André Wollman** montre comment, en deux siècles, les recherches sur ce processus ont ouvert des horizons aussi vastes que cruciaux pour nos défis environnementaux.

BIOLOGIE

Dans le cadre de notre partenariat avec l'Académie des sciences, des académiciens nouvellement élus présentent un éclairage sur l'actualité de la recherche scientifique dans leur discipline à travers leur expérience personnelle.

Les plantes se nourrissent de lumière. Elles capturent et convertissent l'énergie solaire pour leur propre croissance et, en fournissant l'oxygène de l'air, elles sont au cœur de la vie animale et humaine. Jusqu'au XIX^e siècle, nous avons vécu en utilisant quasi exclusivement les plantes comme source d'énergie. Elles ont servi de nourriture pour nos animaux et pour nous-mêmes, nous les avons utilisées comme matériaux de construction et d'habillement, elles nous ont permis de nous chauffer et de cuire nos aliments. À partir du XIX^e siècle, ce sont toujours des

produits végétaux dérivés qui ont fourni l'énergie fossile qui a permis la révolution industrielle.

Pourtant, ce n'est qu'à la toute fin du XVIII^e siècle que l'humanité a commencé à comprendre le processus responsable de cette énergie végétale, la photosynthèse. Tel Monsieur Jourdain, nous utilisons abondamment la photosynthèse sans le savoir. Et c'est seulement en deux décennies (1770-1790), que en Angleterre, Hollande et France, les travaux et analyses de Priestley, Ingen-Housz, Fourcroy et Senebier permirent de comprendre que les plantes fixent le carbone atmosphérique et émettent de l'oxygène à la lumière en utilisant l'eau comme substrat : c'est la photosynthèse oxygénique, principalement produite dans les chloroplastes des cellules végétales et chez les cyanobactéries.

Nous connaissons aujourd'hui le détail du déroulement de chaque étape de la conversion de l'énergie lumineuse par les plantes, l'identité et la disposition de toutes les molécules actives et de la plupart des protéines qui sont au cœur de la photosynthèse. Mieux même, nous connaissons la structure tridimensionnelle de ces protéines à l'échelle atomique et nous savons comment s'expriment les gènes qui régissent leur mise en place.

Mais l'ensemble de ces connaissances a été réuni à partir de travaux sur un tout petit nombre d'organismes photosynthétiques dont les propriétés – de croissance ou d'accessibilité à des études génétiques, par exemple – favorisaient l'étude en laboratoire. L'universalité de nos connaissances n'est donc pas acquise.

DES TECHNIQUES PLUS SURPRENANTES LES UNES QUE LES AUTRES

Chacun connaît désormais l'extraordinaire biodiversité de notre planète. On estime qu'il y a plus d'un million d'organismes vivants différents qui pratiquent une photosynthèse oxygénique. L'ensemble de ces organismes, dont nous ne connaissons encore qu'une fraction, fixe environ 130 milliards de tonnes de carbone atmosphérique par an. Les microalgues marines, dont la diversité photosynthétique reste particulièrement mal connue, sont responsables de la moitié de la fixation du CO₂ à la surface du globe. Cette biodiversité nous promet sans aucun doute de nouvelles découvertes sur le fonctionnement photosynthétique.

Comment un même processus biologique – fixer le dioxyde de carbone de l'atmosphère en utilisant l'eau



PROFIL

Francis-André Wollman, biologiste, membre de l'Académie des sciences, directeur de recherches au CNRS, est directeur de l'Institut de biologie physico-chimique à Paris. Ses travaux, à l'origine de découvertes majeures, concernent l'étude de la photosynthèse, son adaptation aux changements environnementaux et les mécanismes génétiques et moléculaires qui régissent son équilibre.

et la lumière, ce qui s'accompagne d'un dégagement d'oxygène – peut-il se dérouler avec efficacité dans des écosystèmes si différents, marqués par une extrême variété des environnements lumineux ?

Cela soulève des questions passionnantes. Chaque petit morceau de surface terrestre d'un centimètre de côté est bombardé de quelques dizaines de millions de milliards de photons (les grains de lumière) par seconde. Mais une chlorophylle isolée est d'une si petite surface qu'elle ne peut en capturer que quelques-uns dans ce même laps de temps tandis que l'activité photosynthétique a besoin d'une centaine de photons par seconde. Alors les chlorophylles travaillent en groupe, en « antennes collectrices d'énergie » pour capturer assez de photons et les transmettre à de petites usines spécialisées, les centres réactionnels, qui convertissent l'énergie de ces photons pour la stocker sous une forme biologiquement utilisable.

La lumière est alors la meilleure et la pire des choses. La meilleure parce que c'est la nourriture première du monde végétal, la pire parce que trop de lumière peut

tuer ces mêmes organismes ! Car les antennes chlorophylliennes deviennent trop efficaces en plein soleil. Les plantes et les algues ne savent pas utiliser plus de 20 % de cette trop forte lumière. Le trop-plein d'énergie lumineuse absorbée par la chlorophylle peut générer en présence d'oxygène un cocktail explosif qui détruit des liaisons chimiques environnantes, produit des mutations dans l'ADN, inactive les enzymes et perfore les membranes cellulaires.

Et c'est là un des grands champs de recherche de ma discipline : comment les plantes et les algues se protègent-elles de l'effet délétère de l'absorption de lumière dans notre atmosphère à 21 % d'oxygène ? C'est ici que la biodiversité photosynthétique nous révèle l'inventivité de la nature par la variété des stratégies de photoprotection qu'elle déploie.

Les plantes et les algues utilisent des moyens plus surprenants les uns que les autres pour convertir les antennes chlorophylliennes en radiateurs moléculaires qui dissipent sous forme de chaleur l'essentiel de l'énergie lumineuse absorbée. Mais elles savent aussi déplacer physiquement les antennes collectrices d'énergie à l'intérieur du chloroplaste pour éviter leur interaction avec l'oxygène ou encore ce sont leurs chloroplastes tout entiers qui sont placés à l'abri de la lumière. Enfin, si l'exposition aux fortes lumières perdure, les plantes synthétisent moins de chlorophylle, forment des antennes de plus petite taille, pour percevoir moins de lumière. On l'aura compris, la biodiversité de la photosynthèse est l'une des nouvelles frontières les plus passionnantes de nos recherches.

IL Y A 3 MILLIARDS D'ANNÉES...

Confrontés à un processus aussi sophistiqué que la photosynthèse, nous nous interrogeons aussi sur son origine. La photosynthèse oxygénique serait apparue il y a 3 milliards d'années, d'abord discrètement chez des cyanobactéries, conduisant 600 millions d'années plus tard au début d'une grande oxygénation terrestre qui a permis d'atteindre notre atmosphère actuelle qui comporte 21 % d'oxygène.

Comment est-on passé du monde photosynthétique ancestral simple des cyanobactéries au monde contemporain complexe d'une multitude de plantes et d'algues ? Les biologistes s'accordent pour penser que la complexification des organismes vivants au cours de l'évolution est pour une large part le produit de situations symbiotiques, c'est-à-dire de la mise en)))

La lumière est la meilleure et la pire des choses. La meilleure parce que c'est la nourriture première du monde végétal, la pire parce que trop de lumière peut tuer ces organismes ! Comment les plantes et les algues se protègent-elles ?

La surface du globe reçoit en une heure autant d'énergie solaire qu'il en est consommé pendant une année par l'humanité. C'est dire que les algues et les plantes, usines biochimiques naturelles, bénéficient d'une source d'énergie inépuisable.

))) place d'une interdépendance métabolique entre différents organismes, qui en tirent un bénéfice mutuel.

Le passage du monde des bactéries à celui des protistes – êtres unicellulaires avec un noyau renfermant leur ADN et une mitochondrie, siège de la respiration – s'est produit il y a environ 1,5 milliard d'années par endosymbiose. Celle-ci sera suivie d'une seconde, impliquant, elle, des cyanobactéries. Elle convertira, il y a un peu plus d'un milliard d'années, certains de ces protistes en microalgues photosynthétiques, et permettra ensuite, il y a 410 millions d'années, l'émergence des êtres pluricellulaires, macroalgues et plantes terrestres. Il y a – et sans doute pour longtemps encore – de grandes incertitudes sur les conditions qui ont présidé à ces endosymbioses successives, source de tous les êtres multicellulaires contemporains.

Ce n'est que très récemment que l'on a commencé à voir dans les symbioses, par-delà le bénéfice mutuel, le résultat pacifié d'une cohabitation conflictuelle, dans laquelle l'un des partenaires a attaqué (ou s'est défendu contre) l'autre à l'aide de peptides antimicrobiens qui perforent les cellules étrangères. Ces peptides antimicrobiens auraient finalement facilité les échanges métaboliques nécessaires à la stabilisation des symbioses jusqu'à permettre la profonde intégration génétique des mitochondries et des chloroplastes dans les cellules eucaryotes. C'est là une belle illustration du rôle d'interactions symbiotiques dans l'émergence de la complexité.

PROMESSES IMMENSES, TRAVAIL COLOSSAL

Enfin, il est bien légitime de se demander si toutes ces connaissances sur la photosynthèse, accumulées patiemment depuis plus de deux siècles, peuvent servir à améliorer nos conditions de vie. Le stockage du CO₂ pour contenir le réchauffement climatique, les énergies renouvelables, une alimentation suffisante et saine sont autant de défis mondiaux pour lesquels la photosynthèse terrestre et marine est sollicitée.

La surface du globe reçoit en une heure autant d'énergie – provenant du soleil – qu'il en sera consommé pendant une année entière par l'activité humaine.

C'est dire que les algues et les plantes, usines biochimiques naturelles qui décarbonent l'atmosphère, bénéficient d'une source d'énergie inépuisable pour produire des biocarburants, de l'hydrogène et une diversité potentiellement illimitée de molécules à haute valeur ajoutée.

Les promesses sont immenses, mais le travail de recherche à effectuer pour parvenir à en réaliser ne serait-ce que quelques-unes l'est tout autant. Il est en effet malaisé d'identifier actuellement les meilleurs systèmes photosynthétiques pour une application particulière, dont la mise en service devra prendre en compte un grand nombre de critères tant économiques qu'environnementaux.

Le matériel de départ sera-t-il terrestre ou marin ? Sera-t-il biologique, qu'il s'agisse d'organismes que nous connaissons déjà ou que nous construirons par biologie de synthèse, ou sera-t-il bio-inspiré, issu de travaux de chimie mimant des procédés identifiés dans le monde vivant ? Quoi qu'on entende parfois, il n'y a pas aujourd'hui de solutions durables, prêtes à l'usage. Mais il y a tant de pistes fécondes à explorer et tant de jeunes chercheurs prêts à relever ces défis. ★

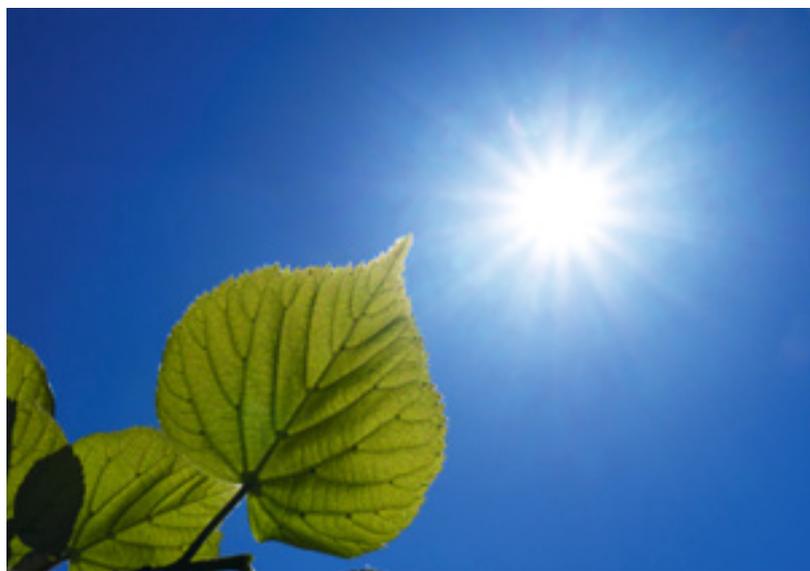
EN SAVOIR PLUS

Le site de l'Académie des sciences : www.academie-sciences.fr



« L'Énergie et le vivant », de F. Rappaport, F. Haraux et F.-A. Wollman, dans « **L'Énergie à découvrir** », R. Mosseri et C. Jeandel (dir.), CNRS Éditions, 2013. Un ouvrage collectif très accessible qui met à la disposition du public l'ensemble des données scientifiques pour éclairer les débats sur cet enjeu majeur du XXI^e siècle, traité dans toutes ses dimensions.

« **An antimicrobial origin of transit peptides accounts for early endosymbiotic events** », de F.-A. Wollman (2016), dans « Traffic », 17, 2016. En ligne : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/tra.12446> Un article qui illustre la question des origines endosymbiotiques des mitochondries et des chloroplastes.



« Le stockage du CO₂, les énergies renouvelables, une alimentation suffisante et saine... autant de défis pour lesquels la photosynthèse est sollicitée. »