



Les défis de Chimie

Lundi 16 novembre 2020

# Déchet ou Matière Première d'Avenir ?



  
Fondation de la Maison de la Chimie

Conception graphique : (B) BOUTIERE | Photo : © Iguazú - alshiro - Sergey - Olivier Le Moal / Adobe Stock | le 16/11/20



# Paul COLONNA

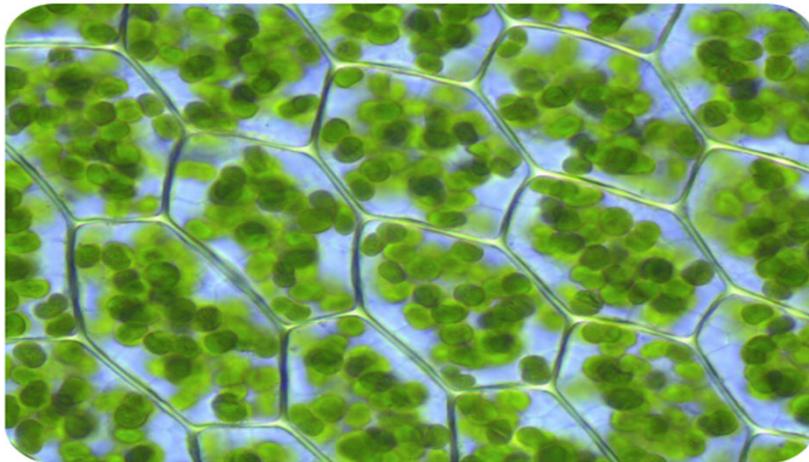
*Directeur de Recherches Émérite  
INRAE*



Fondation de la Maison de la Chimie



# Origine de la photosynthèse



- 3 milliards années : cyanobactéries, premiers organismes à photosynthèse oxygénique
- 1,5 milliards années : endosymbiose de certaines archées et bactéries par des plantes conduisant à la formation des plantes

Dans un chloroplaste, le génome propre code 50 à 150 protéines, avec une bonne conservation inter-espèce.

Dubreuil *et al.*, 2018  
Bauchnak *et al.*, 2019

- Premier verrou à l'amélioration génétique: expression de protéines hétérologues dans le chloroplaste.  
Site d'intégration (++) du transgène aujourd'hui connu.

# Dans les plantes

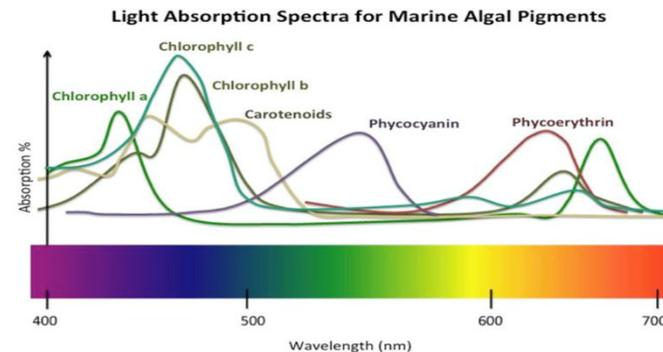
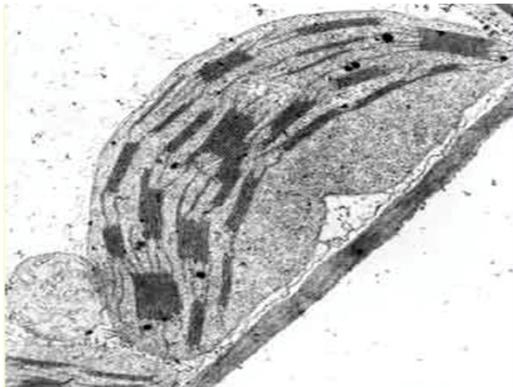
## Les chloroplastes

Disque aplati (L 5 à 10  $\mu$ m, l 1-5  $\mu$ m) avec deux systèmes photosynthétiques inclus dans des membranes lipidiques, les thylacoïdes

## Régulation du nombre de chloroplastes

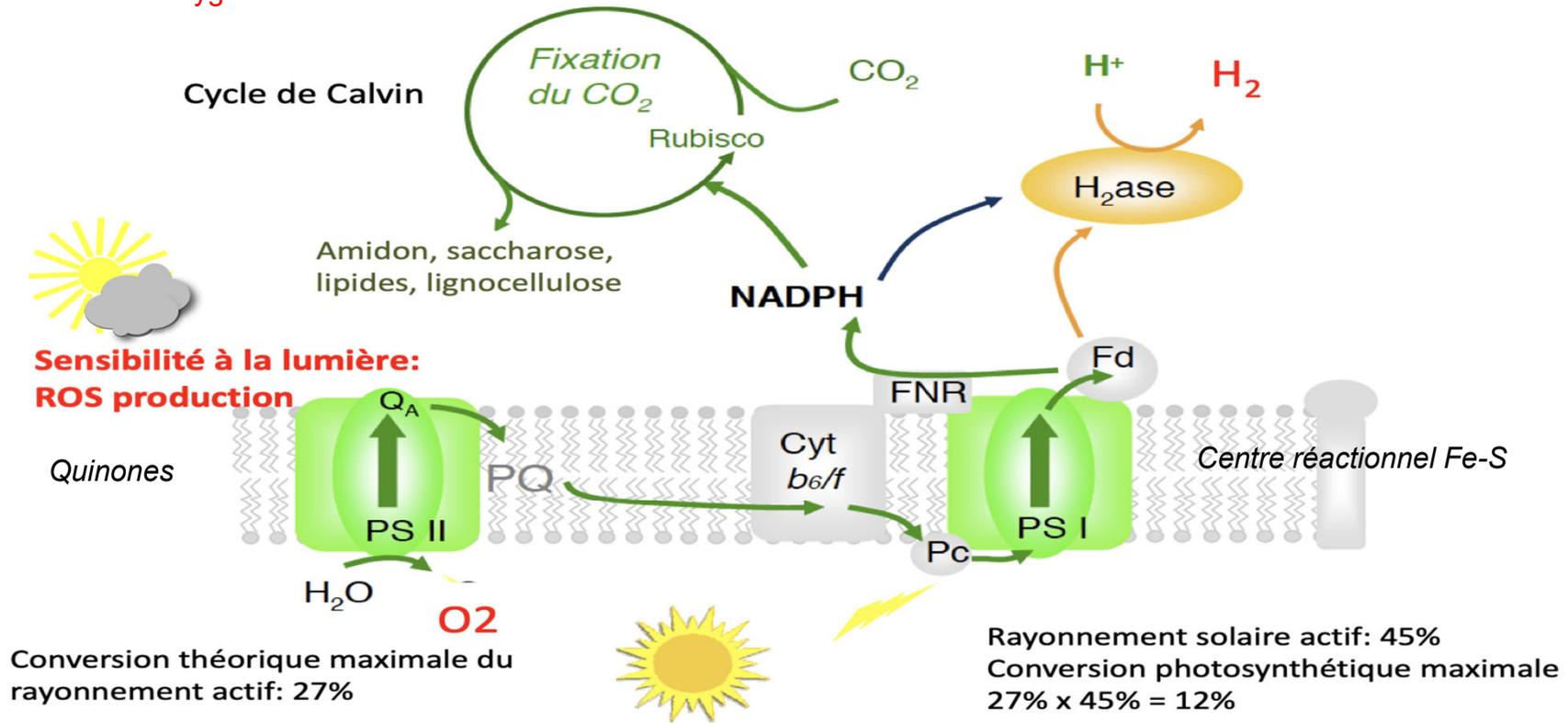
Mécanisme non décrit.

Sénescence foliaire avec un recyclage des nutriments (Guiboileau et Marlaux, 2012). Le chloroplaste représente environ 70% des protéines foliaires.



# Les mécanismes 1/3

Activités carboxylase et oxygénase de la Rubisco



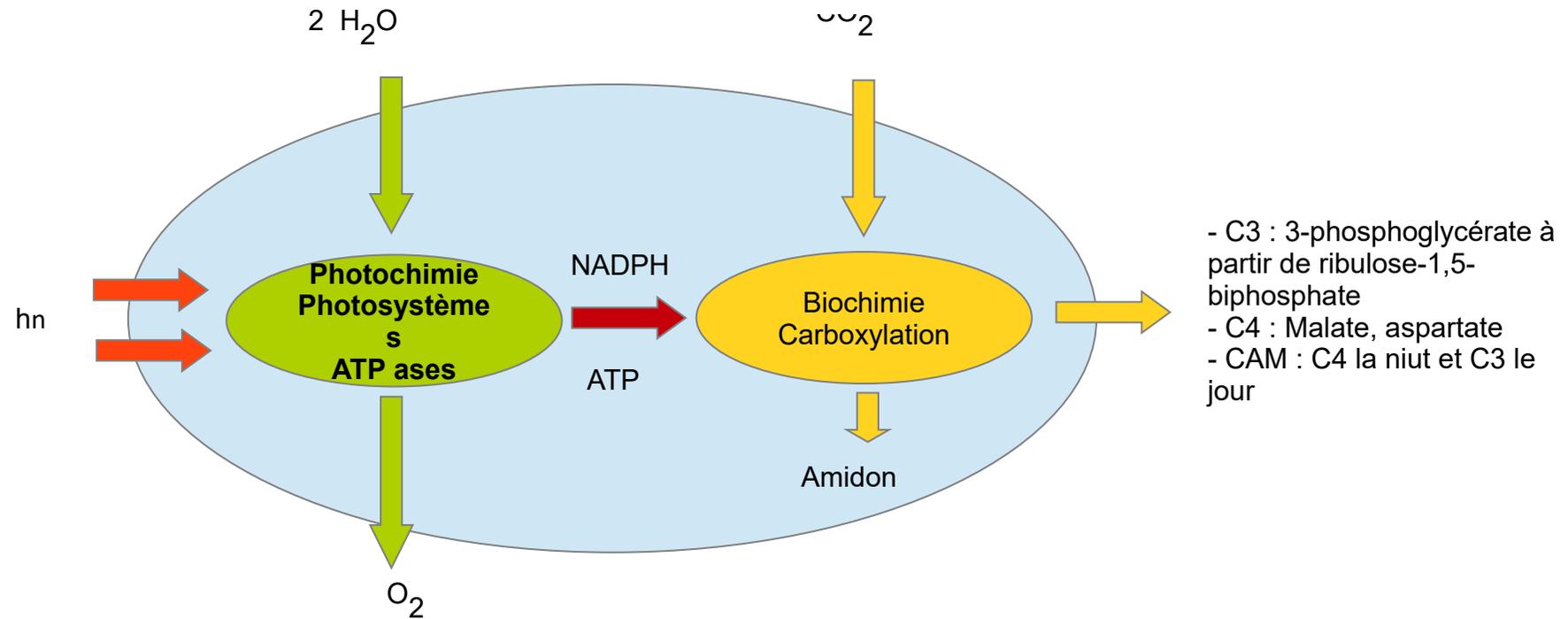
Source: Blakenship et al., 2011

# Optimisation métabolique : les micro-algues

- Organisme uni-cellulaire : *Circuit court*
- Productivité élevée : 10–25 g/m<sup>2</sup>.jour, en fait 200 g C g/m<sup>2</sup>.jour
- Atouts : ingénierie métabolique et biodiversité, injection de CO<sub>2</sub>, production de lipides et de protéines
- Problèmes technologiques : N, robustesse et concentration (0.1–0.5 g ms/L)  
*dewatering*



# Les mécanismes 2/3



Rendement Q : 10 quanta domaine rouge /  $\text{O}_2$ , rdt 0,1 ; 12 quanta domaine bleu, rdt 0,07. red droop au delà de 700 nm.

Rendement C3 : 0,06 mol  $\text{CO}_2$ /mol photons

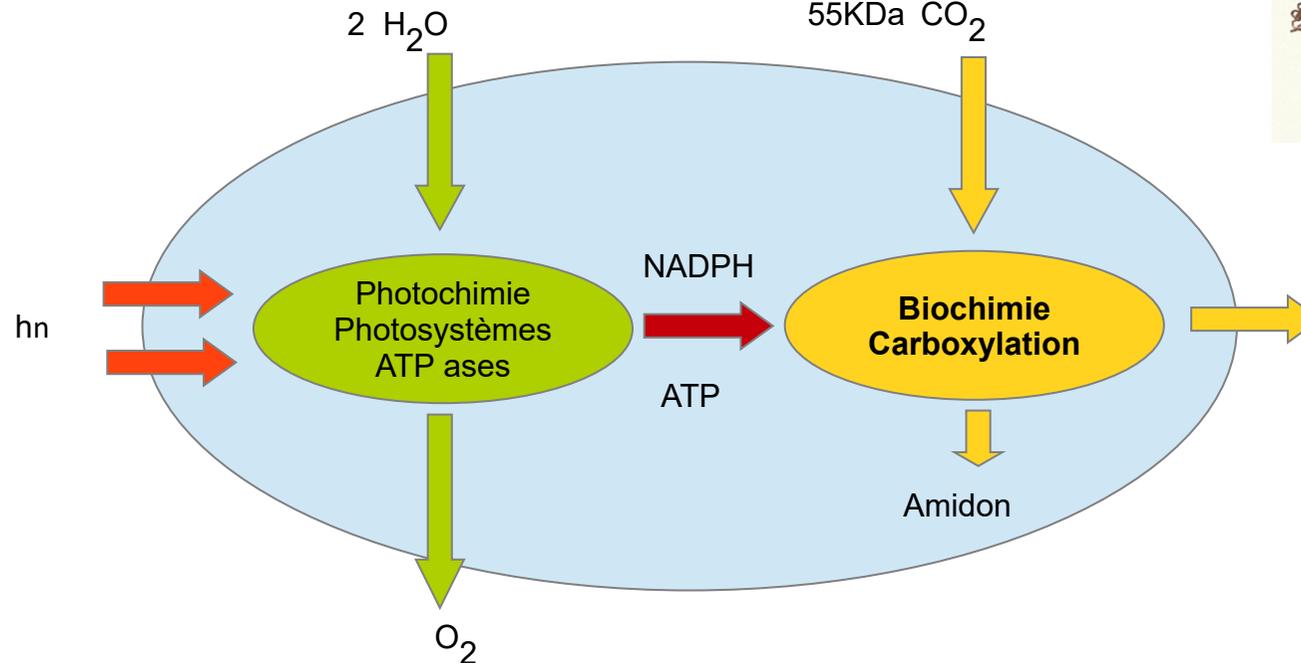
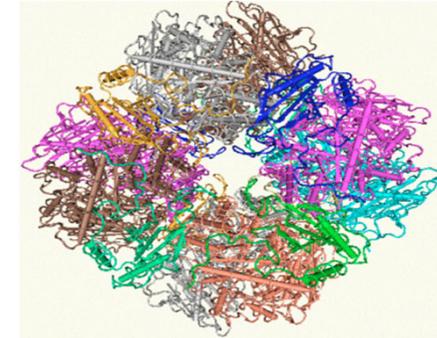
Rendement C4 : 0,08 mol  $\text{CO}_2$ /mol photons

Globalement 896 gMS/ $\text{m}_2$ .an pour un potentiel de 5 926 gMS/ $\text{m}_2$ .an (Saugier, 2018)

# Les mécanismes 3/3

Fixation plus efficace du  $\text{CO}_2$  chez les plantes C4, avec une économie d'azote sous-jacente, mais 30 ATP/glucose au lieu de 20 chez les C3  
En confinement, augmentation de la concentration en  $\text{CO}_2$

**Rubisco :**  
**Ribulose-1,5-**  
**biphosphate**  
**carboxylase/oxyg**  
**énase**  
55KDa  $\text{CO}_2$



- C3 : 3-phosphoglycérate à partir de ribulose-1,5-biphosphate
- C4 : Malate, aspartate
- CAM : C4 la nuit et C3 le jour

Rendement C3 : 0,06 mol  $\text{CO}_2$ /mol photons et C4 : 0,08 mol  $\text{CO}_2$ /mol photons  
Globalement 896 gMS/m<sub>2</sub>.an pour un potentiel de 5 926 gMS/m<sub>2</sub>.an (Saugier, 2018)

# Amélioration de l'efficacité photosynthétique par le génome du chloroplaste

**Objectifs : fixation du CO<sub>2</sub> (diffusion : seul facteur avéré), activité catalytique augmentée et réduction de la photorespiration surtout pour les C3**

- Insertion d'un mécanisme d'augmentation du CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-concentrating mechanism, CCM) de cyanobactérie dans des plantes (Lin *et al.*, 2014)
- Extinction de la large sous-unité de la Rubisco dans le tabac au profit des sous-unités de *Synechococcus elongatus*. Les hybrides Rubisco et CcmM35 : taux plus élevés de fixation de CO<sub>2</sub>, mais croissance plus lente.
- Coexpression de la Rubisco avec la chaperonne RAF1: croissance (++) (Whitney *et al.*, 2015)
- Introduction des petites unités de sorgho (C4) dans du riz: kcat augmentée (Ishikawa *et al.*, 2011)
- Régénération du Ribulose 1,5-bisphosphate par surexpression de Sedoheptulose 1,7-bisphosphatase (cible ~ 30%) (Driever *et al.*, 2017)
- Surexpression du cytochrome b6f pour la production d'ATP (Simkinn *et al.*, 2017 ; Ermakova *et al.*, 2019)

*Difficulté de transférer les gènes des C4 dans les plantes C3, avec des verrous anatomiques et biochimiques (Chupeau, 2017)*

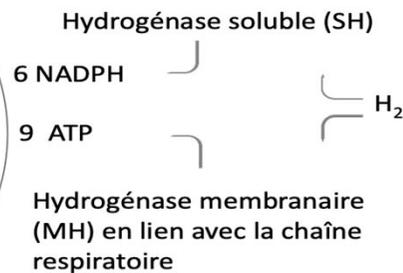
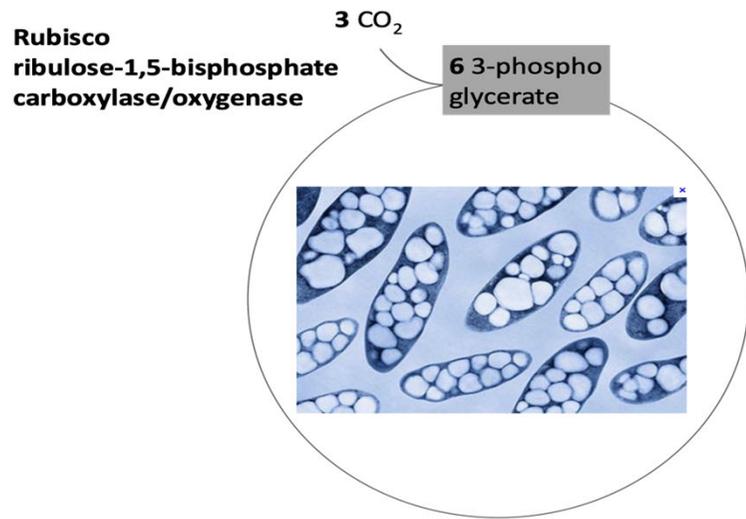
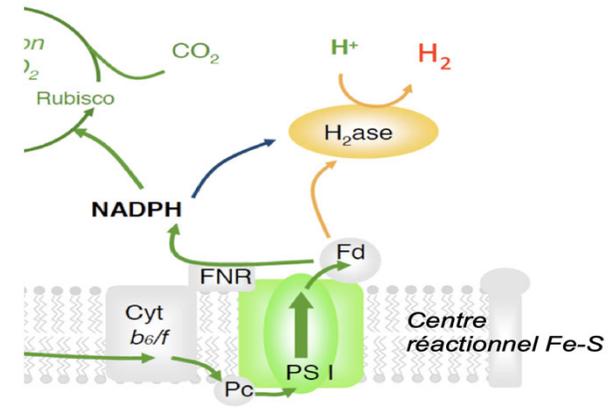
*Faible tolérance de la Rubisco aux mutations*

*Les seuls essais au champ portent sur le tabac.*

# Production d'hydrogène dans les algues et cyanobactéries → *par*

Algues soumises à une carence en soufre, ou alternances de phases aérobie et anaérobie par séparation temporelle

*Cupriavidus necator*  
Bowien, 2002; Pohlman et al., 2007



# Croisement avec les nanotechnologies

Objectif : utilisation des électrons pour réduire du CO<sub>2</sub>.

Feuille artificielle : l'assemblage de différentes couches de métaux (Nocera, 2009) produit H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>.

- Substitution de la rubisco par une enzyme bactérienne qui fonctionne 10 fois plus vite, d'où une voie de carboxylation nouvelle (cycle CETCH), du nom de la chaîne d'enzymes qui la compose : crotonyle-CoA/éthylmalonyle-CoA/hydroxybutyryle-CoA. (Schwander *et al.*, 2016). MAIS avec ATP et NADPH.

- Chloroplaste artificiel : association de membranes photosynthétiques d'épinards et des 16 enzymes du cycle CETCH par microfluidique . T Miller et JC Baret (Miller *et al.* 2020).

Réserve : ouvrir sur de nouvelles molécules, le système global gagnant en complexité.

# Conclusions

- Microalgues
- Les biotechnologies butent sur des mécanismes complexes et organisées. La diffusion du CO<sub>2</sub> est une boîte noire.
- Le croisement nano et biotech.
- Le changement climatique : l'eau sera le principal facteur limitant
- L'agroécologie : couverture du sol par des végétaux, CIVE Cultures intermédiaires à Valorisation Energétique



# Conclusions

- Microalgues
- Les biotechnologies butent sur des mécanismes complexes et organisées. La diffusion du CO<sub>2</sub> est une boîte noire.
- Le Croisement nano et biotech.
- Le hangement climatique : l'eau sera le principal facteur limitant
- L'Agroécologie : couverture du sol par des végétaux, CIVE Cultures intermédiaires à Valorisation Energétique

