

Evolution de la Rubisco pour l'assimilation du CO₂ par les plantes

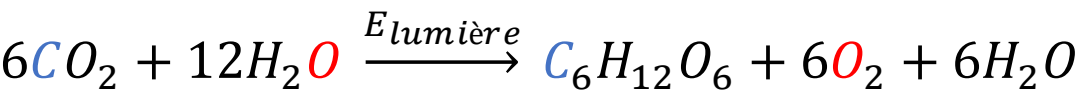
Pierre Crozet

**Maître de Conférences HDR,
Sorbonne Université**

Académie des Sciences, Institut de France
Académie d'Agriculture de France

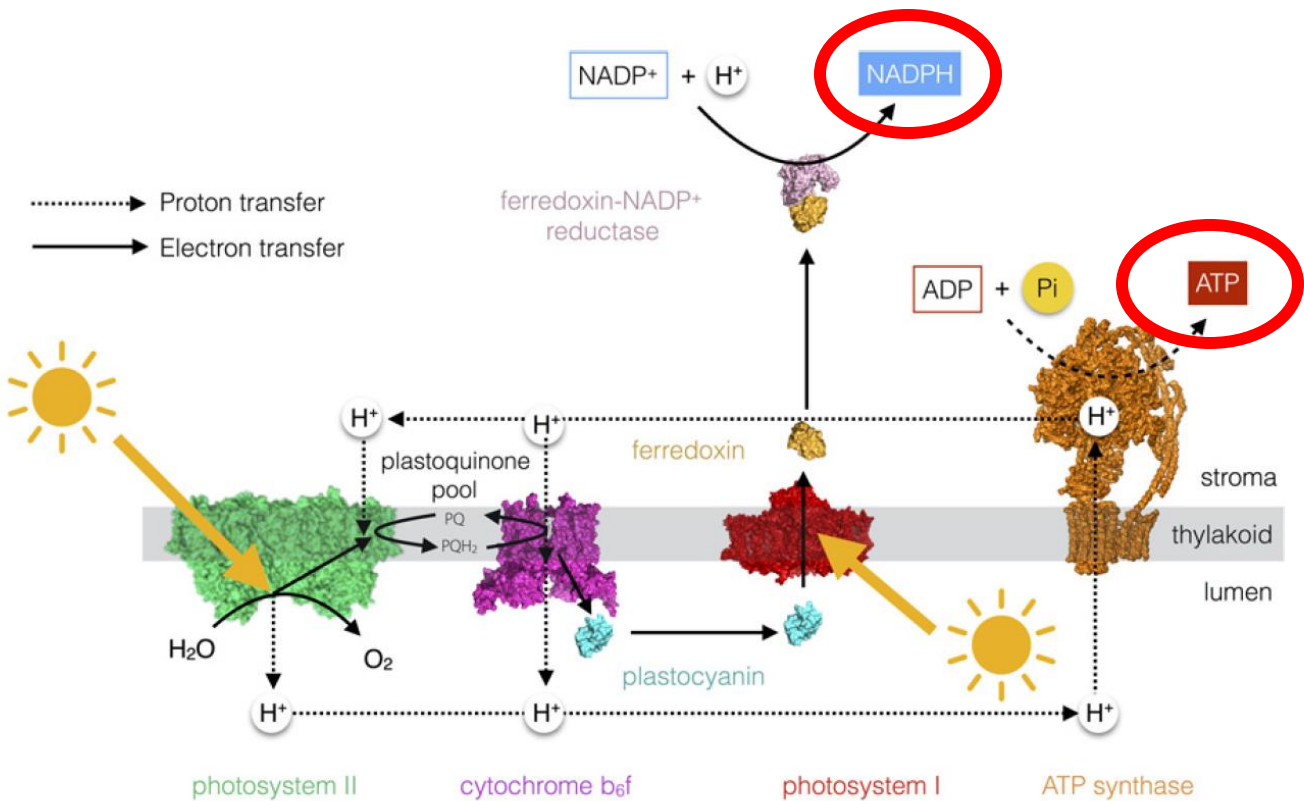
Paris, 30 septembre 2025

Colloque « Les plantes dans un environnement
à fort CO₂ : contraintes et opportunités »

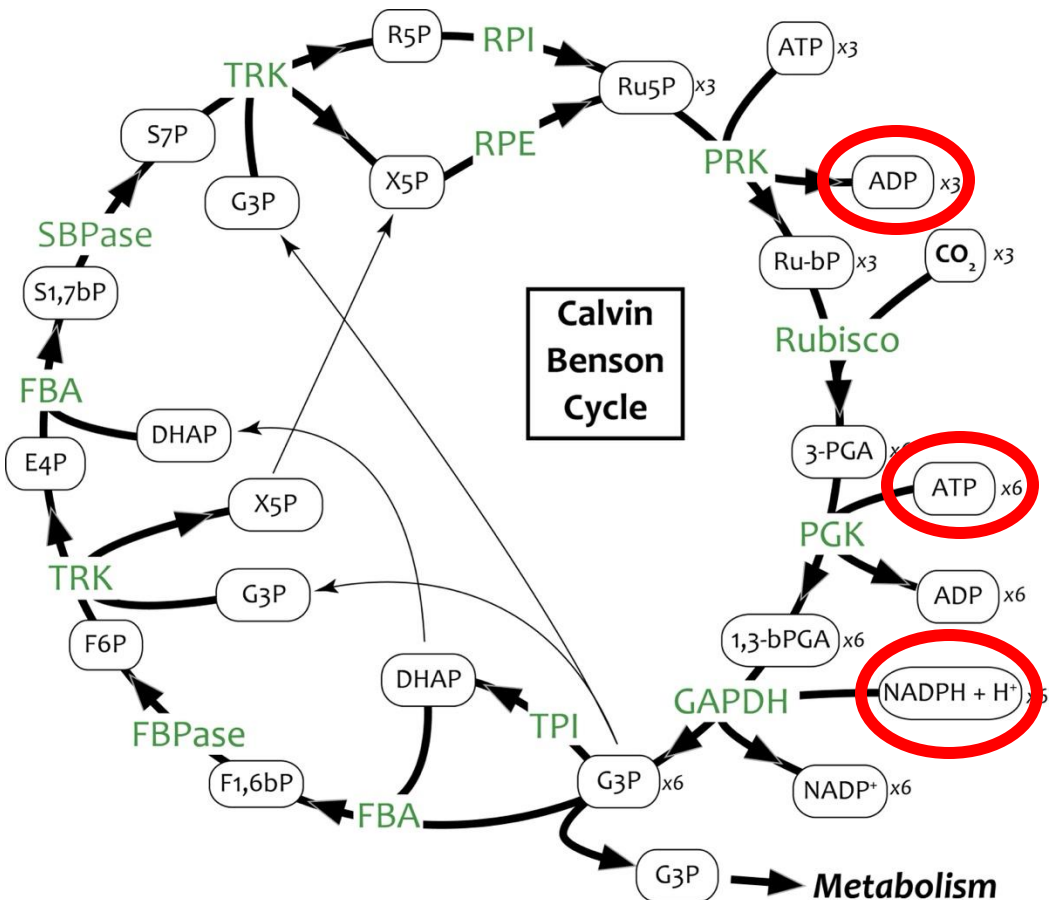


A. Stirbet et al., 2019, *Annals Bot*

Chaine photosynthétique de transfert des électrons

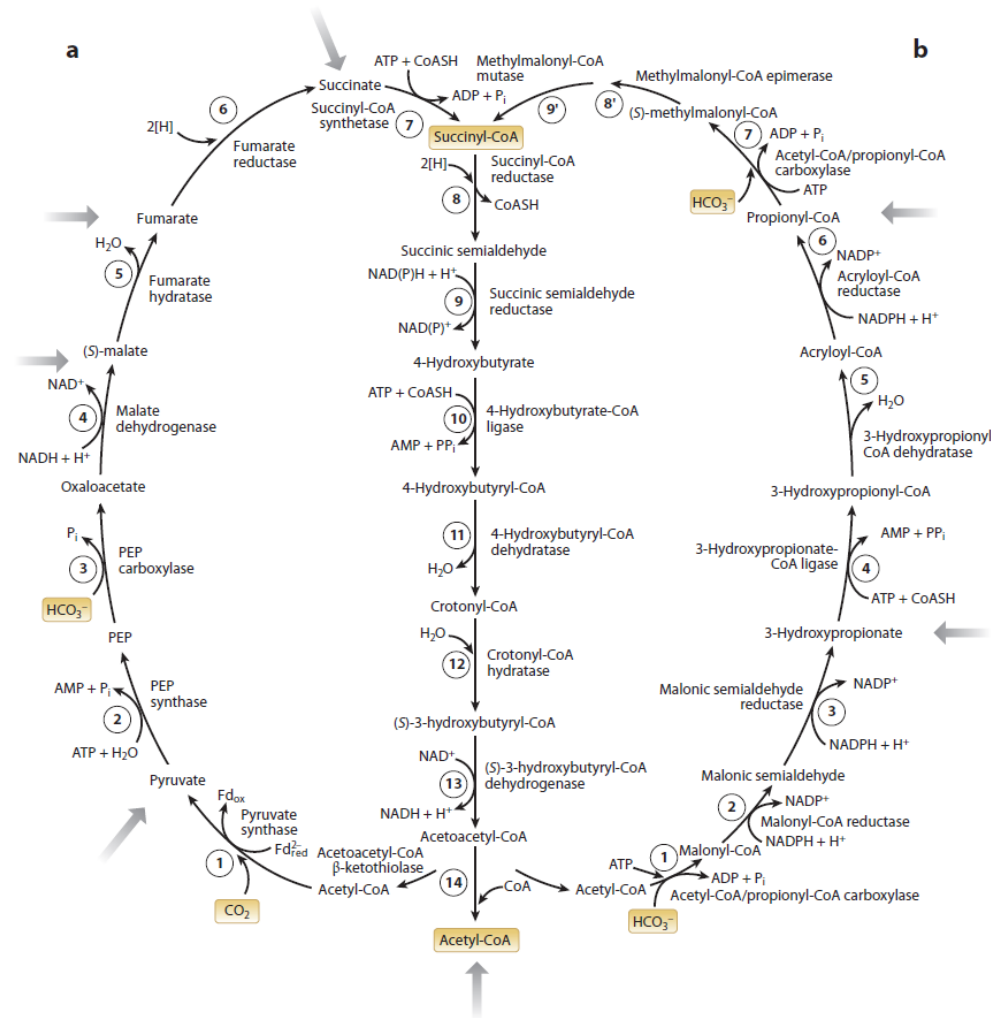
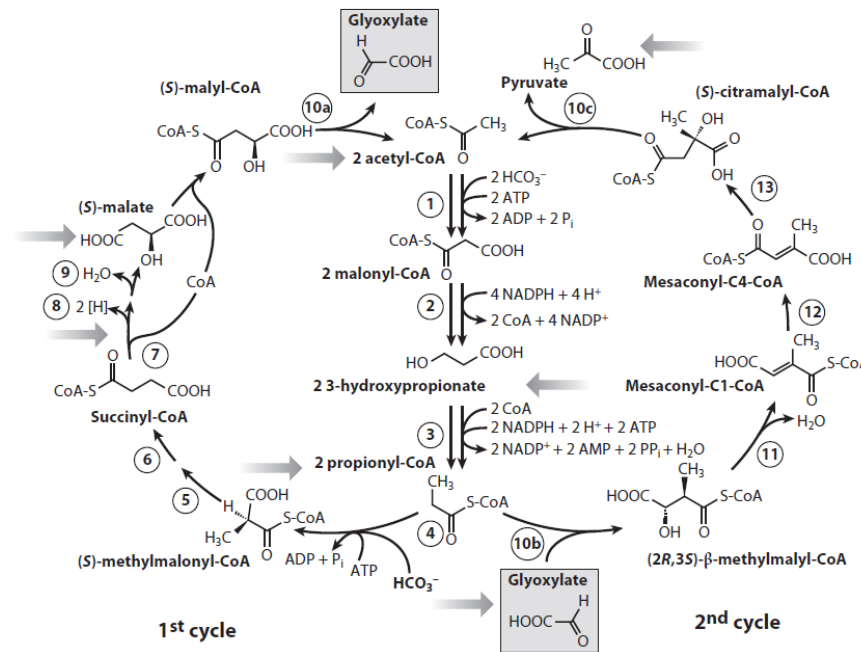
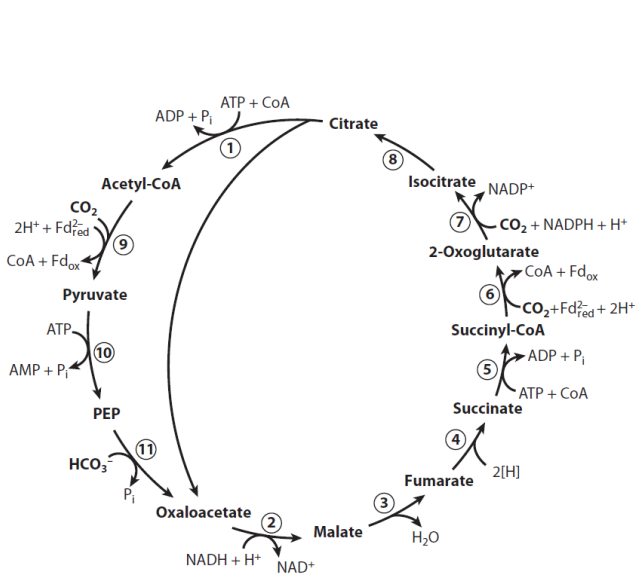


Fixation du carbone



Six voies de fixation du carbone existent.

Voie Réductrice de l'acétyl-coenzyme A Bactéries et Archaeobactéries



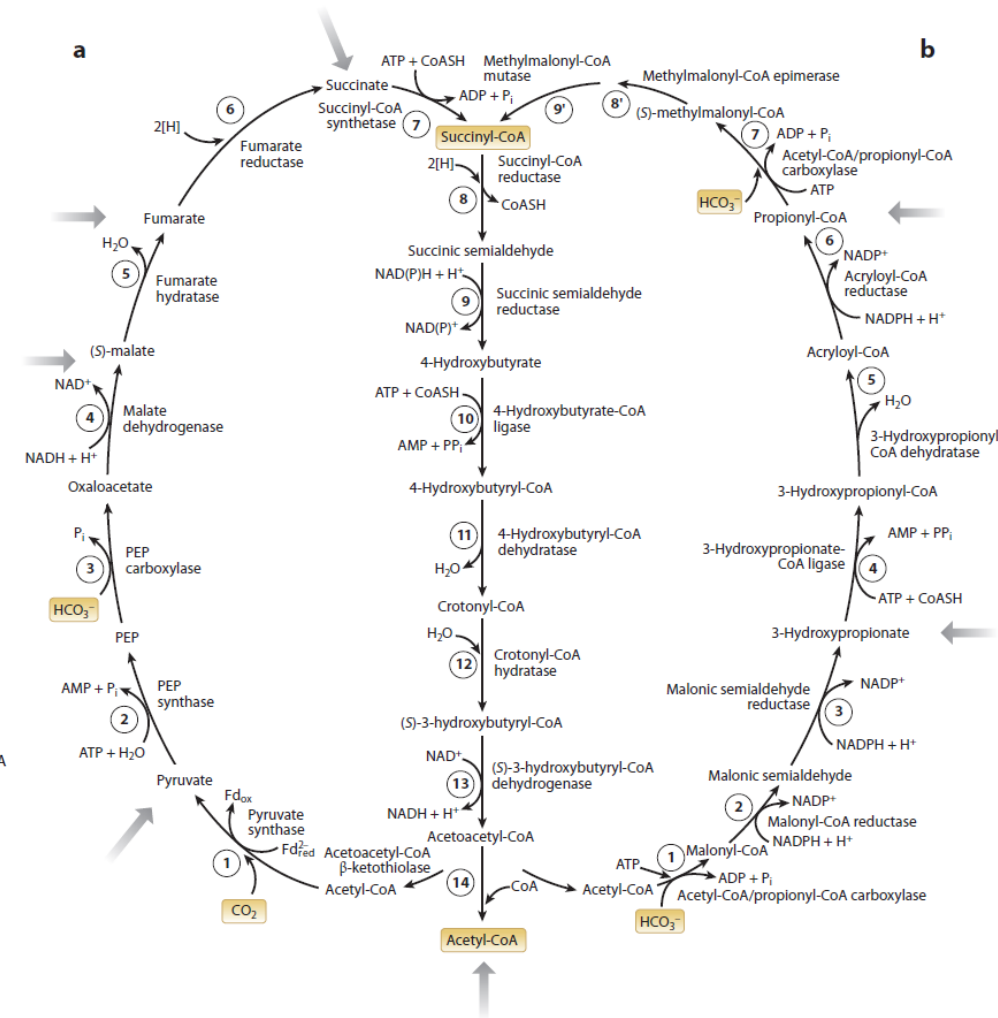
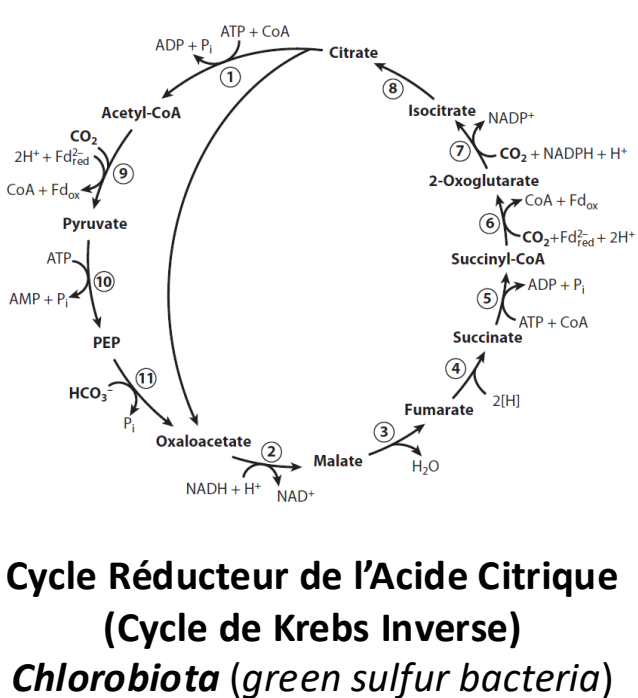
Dicarboxylate/4-hydroxybutyrate cycle (a)
3-hydroxypropionate/4-hydroxybutyrate cycle (b)
Archaeobactéries

Cycle Réducteur de l'Acide Citrique
(Cycle de Krebs Inverse)
Chlorobiota (green sulfur bacteria)

Bi-Cycle du 3-Hydroxypropionate
Chloroflexota (green non-sulfur bacteria)

Six voies de fixation du carbone existent.

Voie Réductrice de l'acétyl-coenzyme A Bactéries et Archaeobactéries



Photosynthèse : Cycle de fixation du carbone majoritaire: le cycle de Calvin-Benson

Pierre Crozet

Evolution de la Rubisco pour l'assimilation du CO₂ par les plantes, 30/9/2025

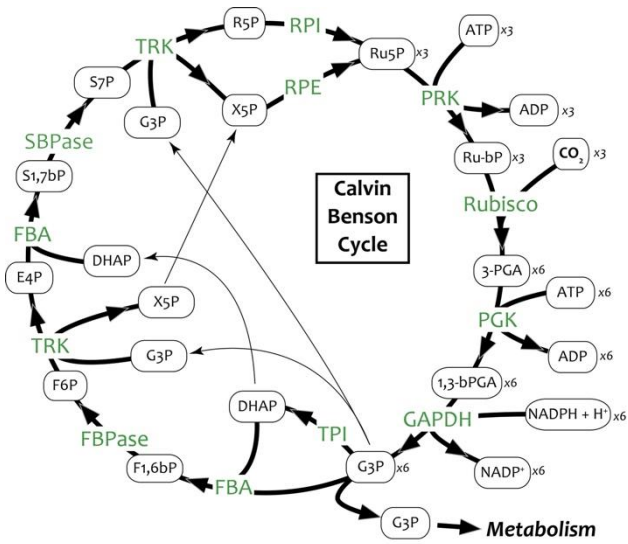
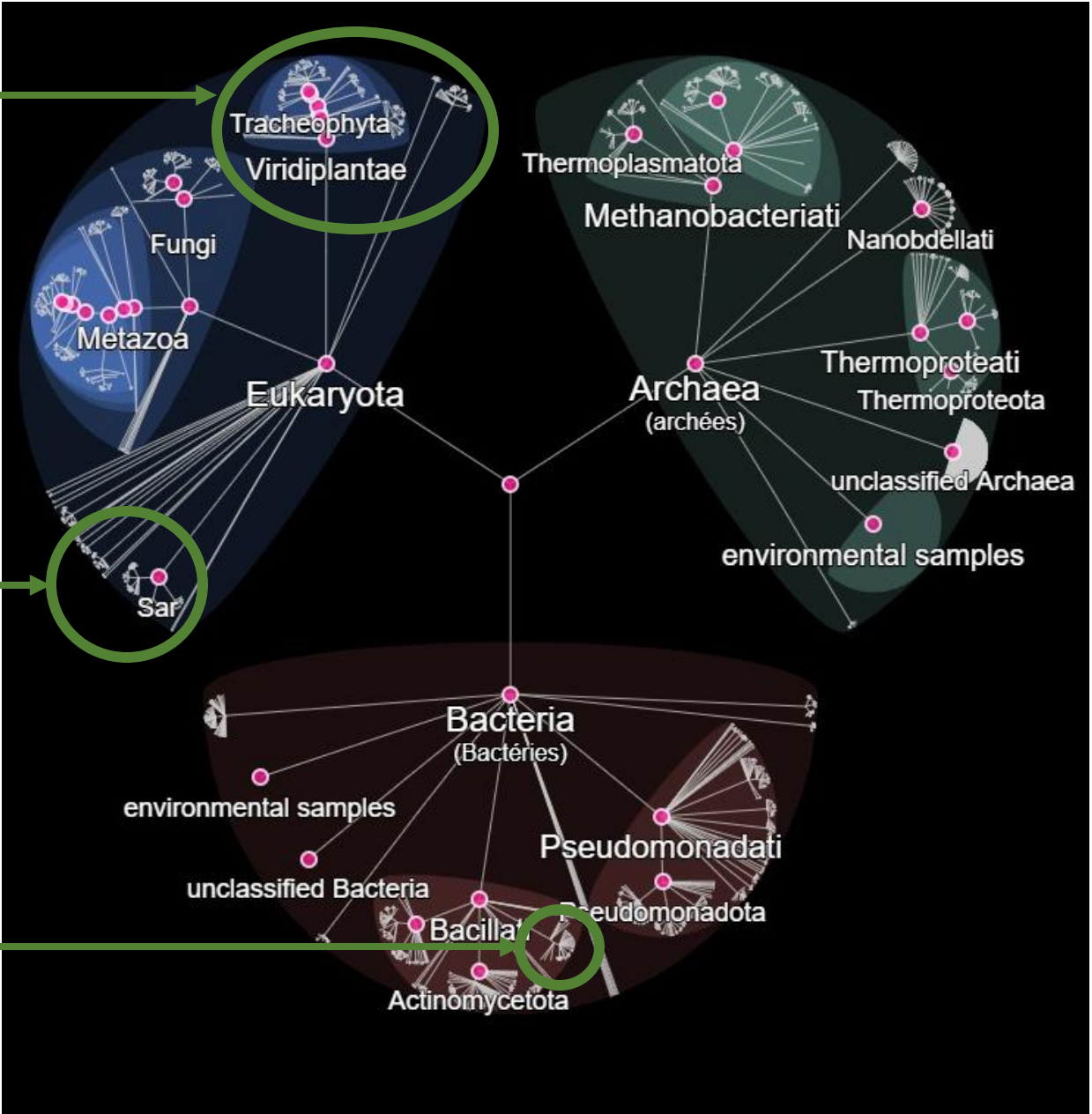
95% du C organique fixé.

« Algues »

Plantes terrestres,
Algues vertes et
Algues rouges

Dinoflagellés,
Euglènes,
Diatomées...

Cyanobactéries



Photosynthèse : Cycle de fixation du carbone majoritaire: le Cycle de Calvin-Benson

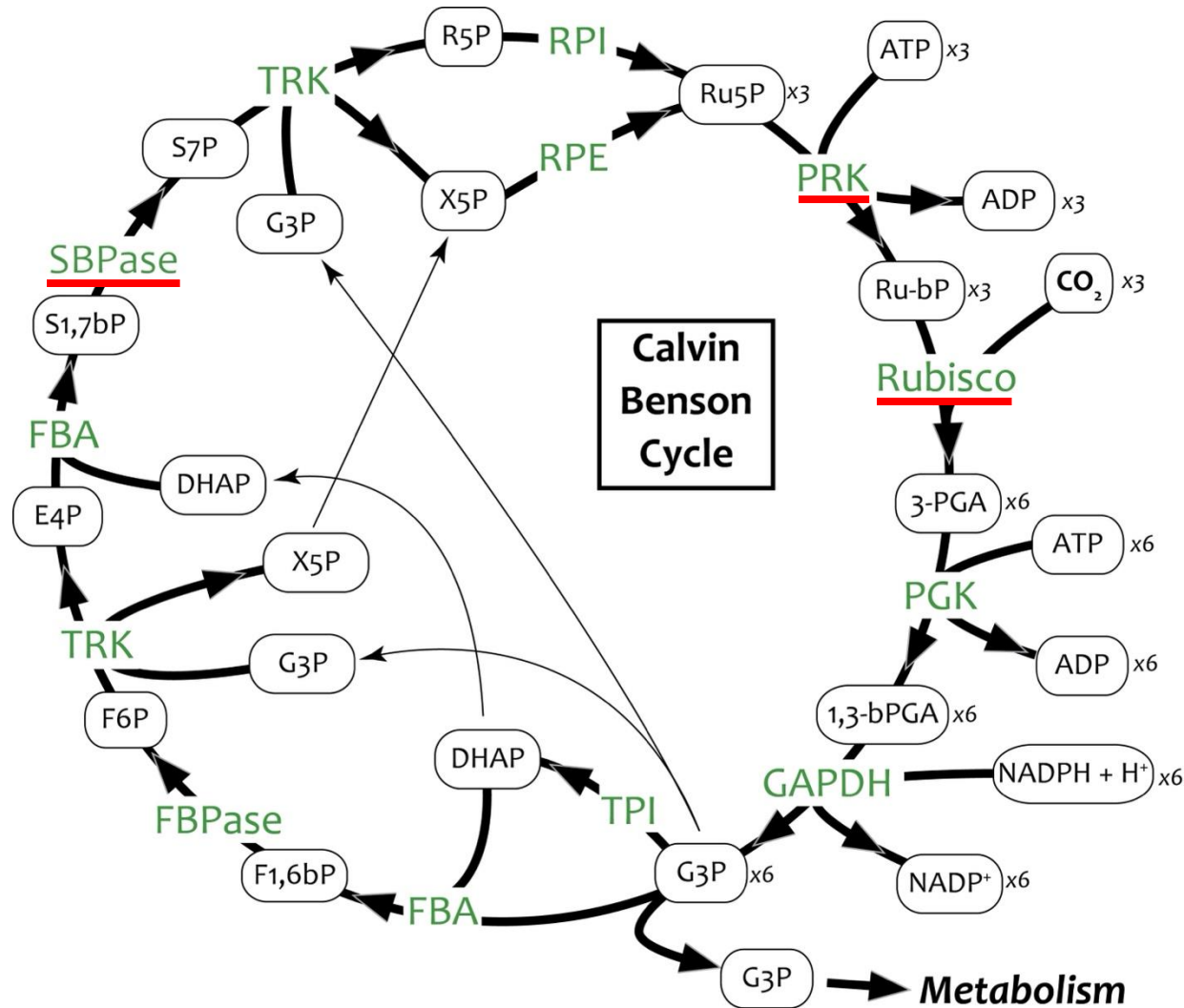
Cyanobactéries et Eucaryotes photosynthétiques (plantes terrestres, « algues »)

13 réactions

11 enzymes

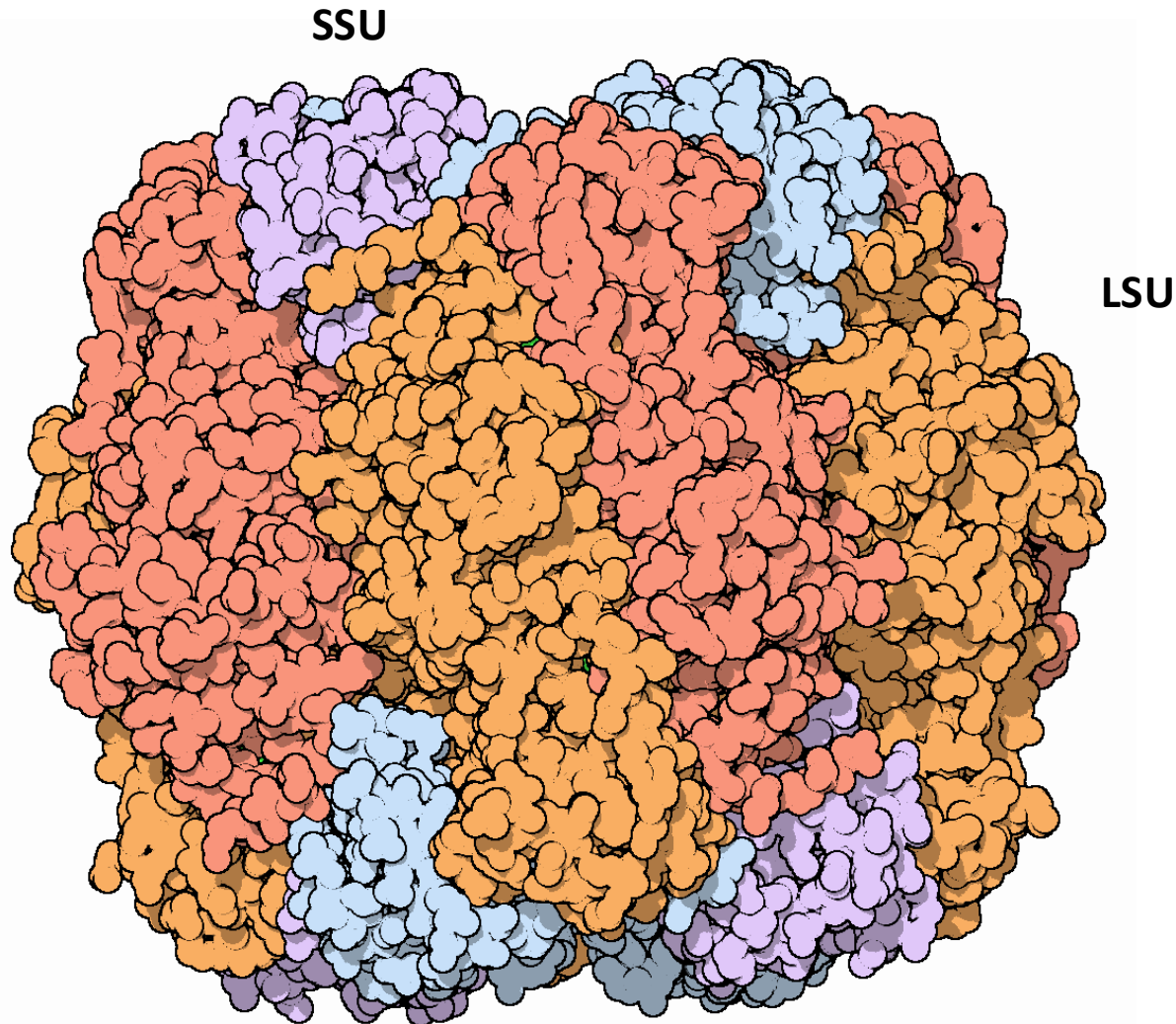
1 carboxylase : la Rubisco

3 enzymes uniques au cycle :
SBPase, PRK et Rubisco





Ribulose-1,5-Bisphosphate
Carboxylase / Oxygénase



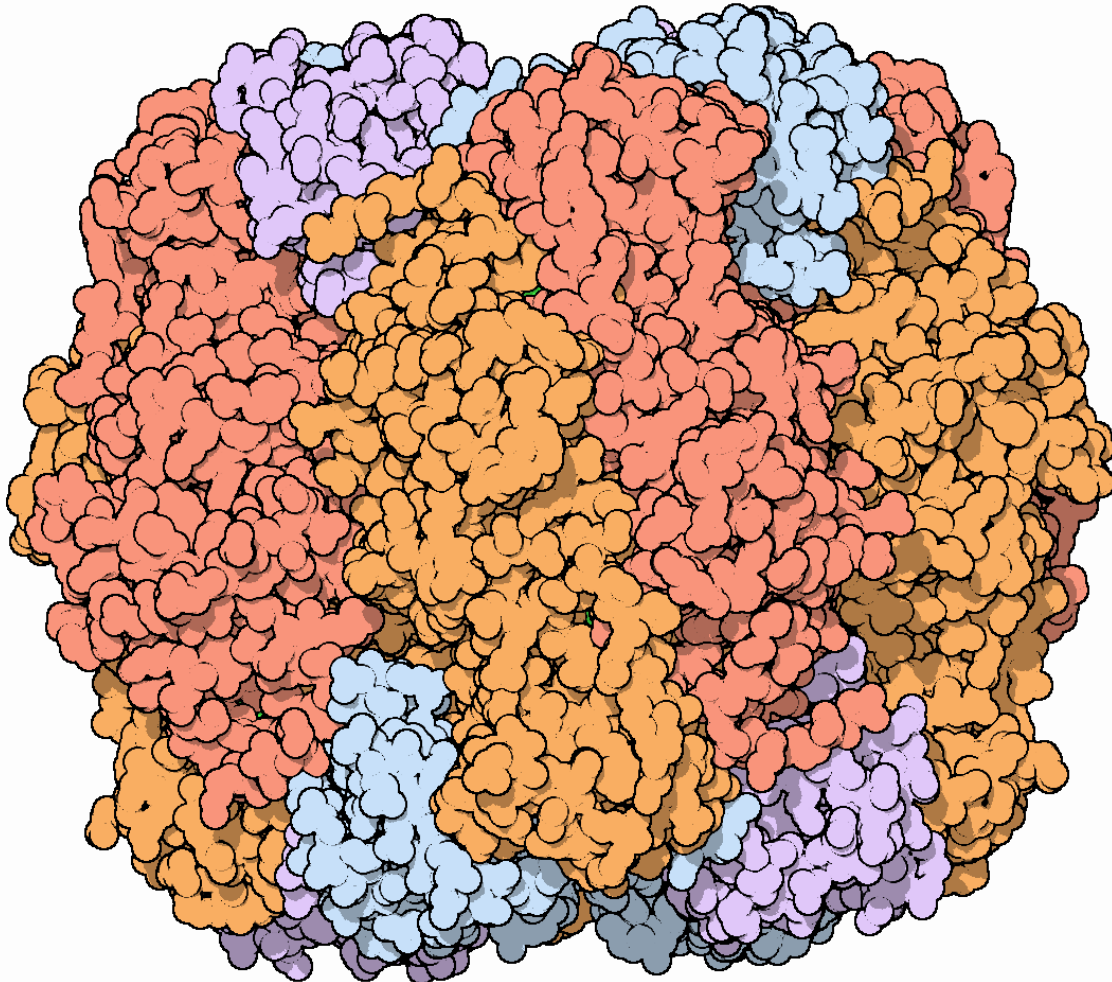
Forme I : L₈S₈

8 grandes sous-unités (LSU)

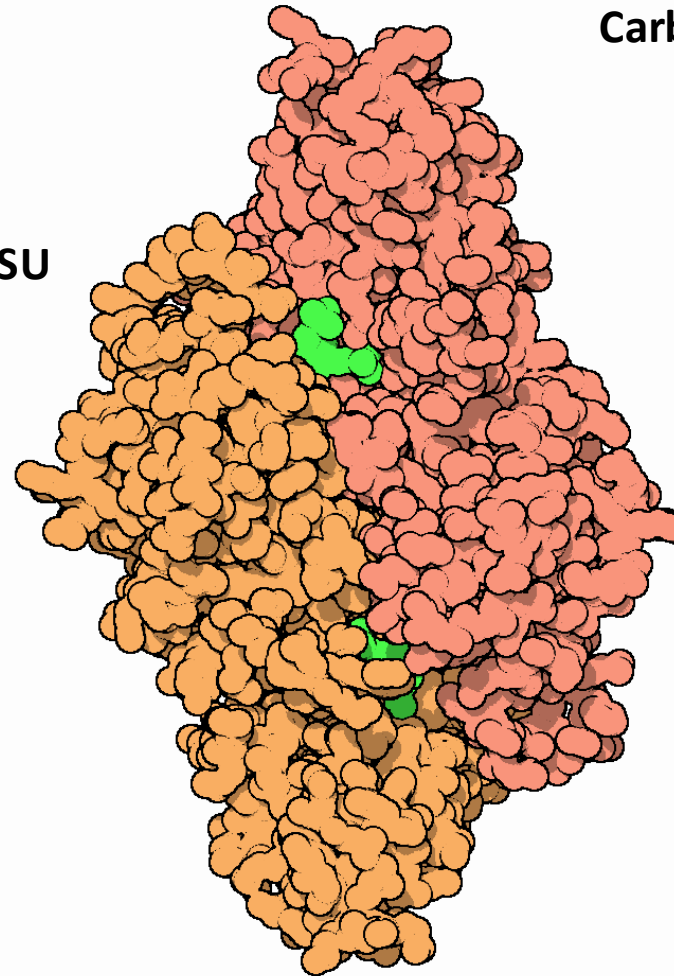
8 petites sous-unités (SSU)



SSU



LSU



Ribulose-1,5-Bisphosphate
Carboxylase / Oxygénase

Forme I : L₈S₈

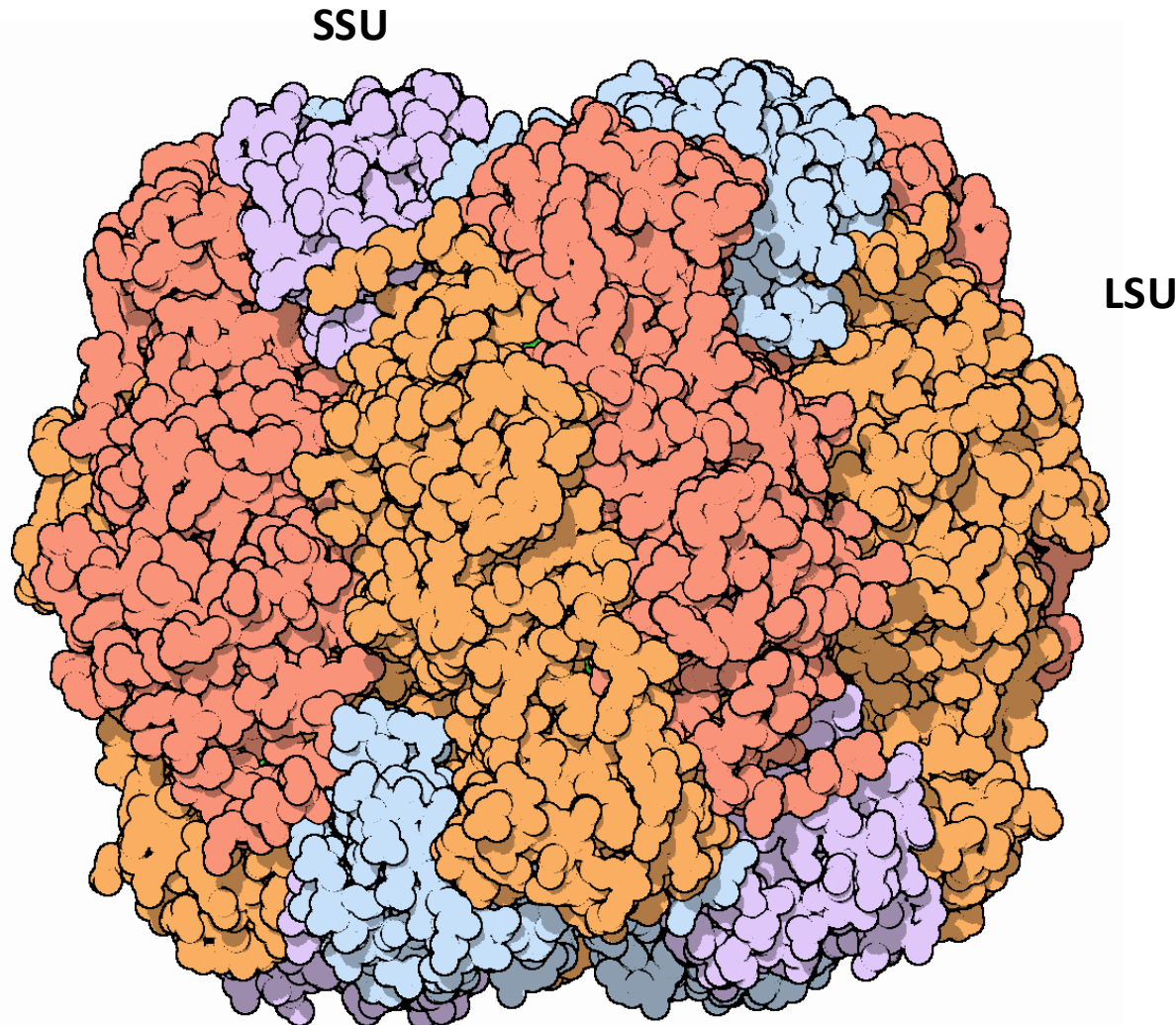
8 grandes sous-unités (LSU)

8 petites sous-unités (SSU)

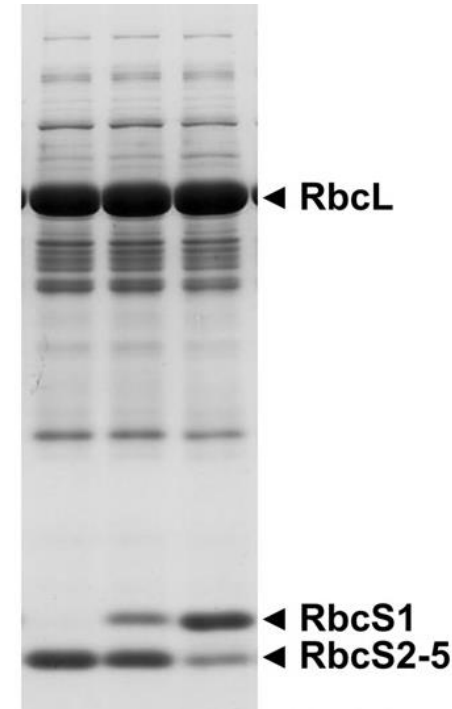
Dimère LSU₂ contient
les sites catalytiques.



Ribulose-1,5-Bisphosphate
Carboxylase / Oxygénase



Extrait de Riz
(SDS-PAGE)



Paramètres catalytiques :
 $k_{\text{cat}} = 0,1 - 13,5 \text{ s}^{-1}$
 $K_{\text{M}(\text{CO}_2)} = 1,9 \text{ }\mu\text{M} - 65 \text{ mM}$



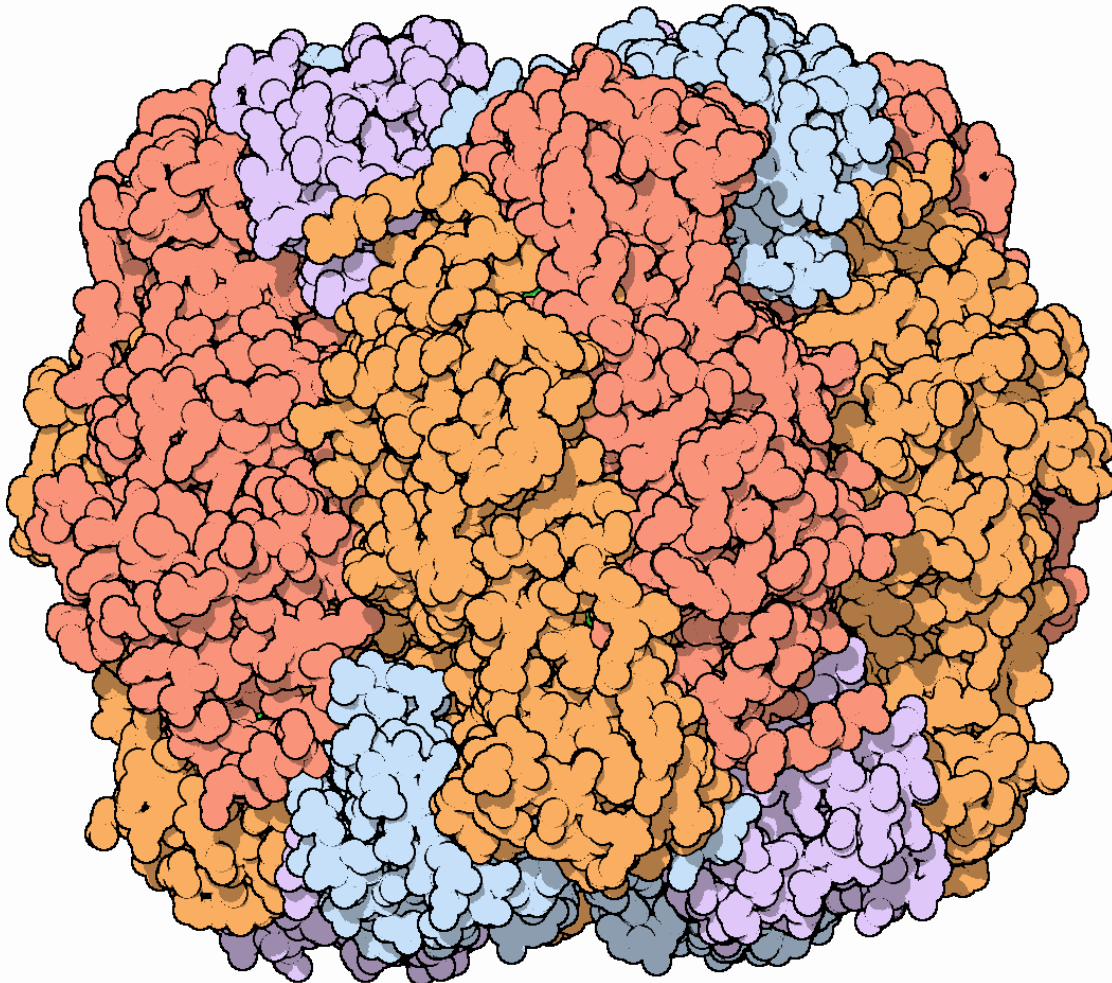
Jusqu'à 50% des
protéines solubles

0,73 Gt sur Terre

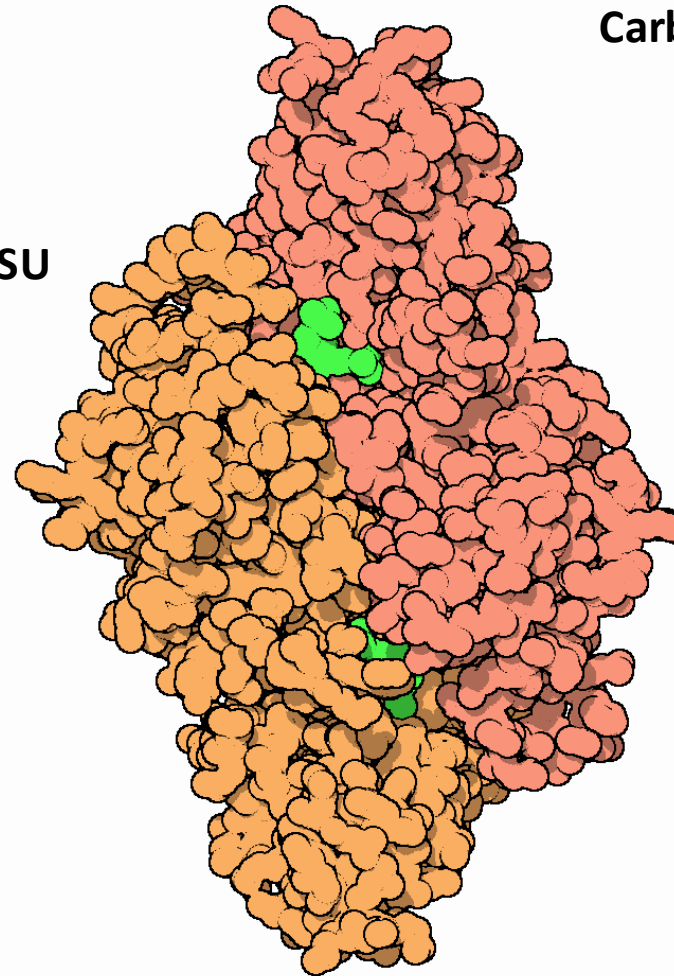
Bar-on et Milo, 2019, *PNAS*



SSU



LSU



Ribulose-1,5-Bisphosphate
Carboxylase / Oxygénase

Forme I : L₈S₈

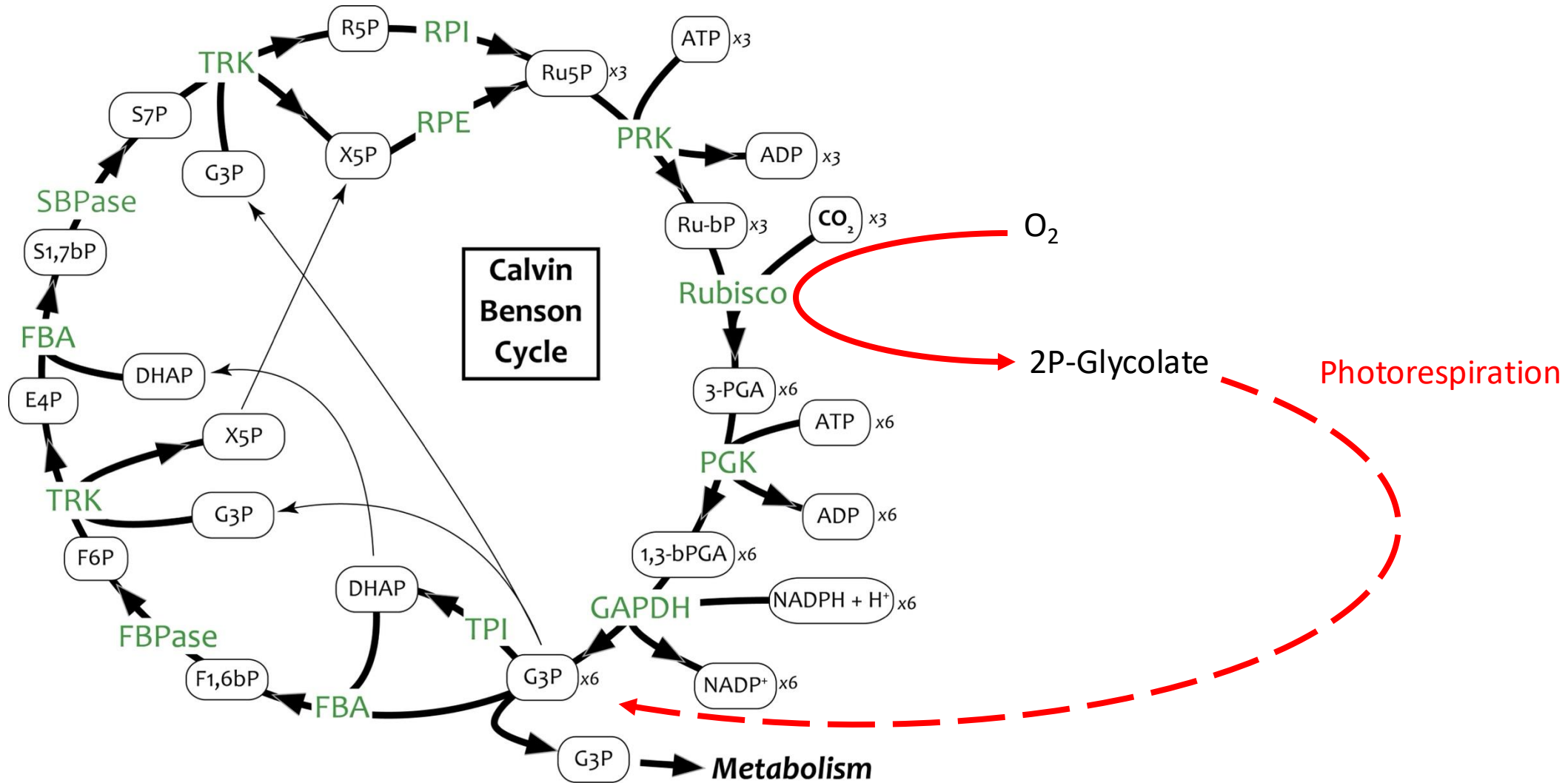
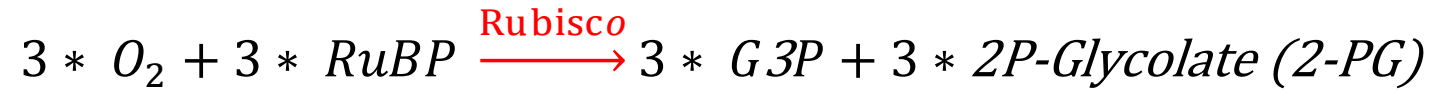
8 grandes sous-unités (LSU)

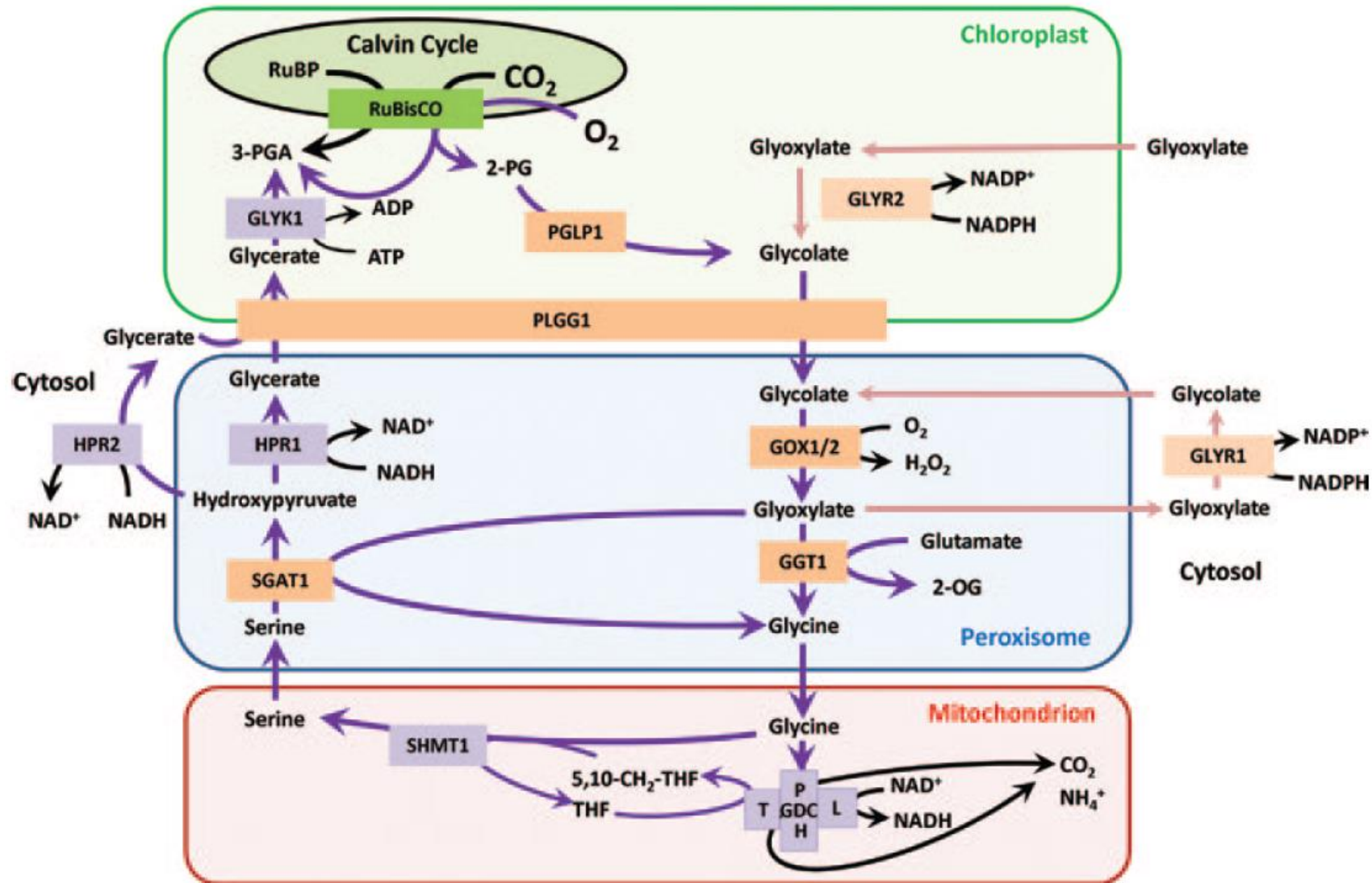
8 petites sous-unités (SSU)

Dimère LSU₂ contient
les sites catalytiques.

Différencie mal
CO₂ Vs O₂

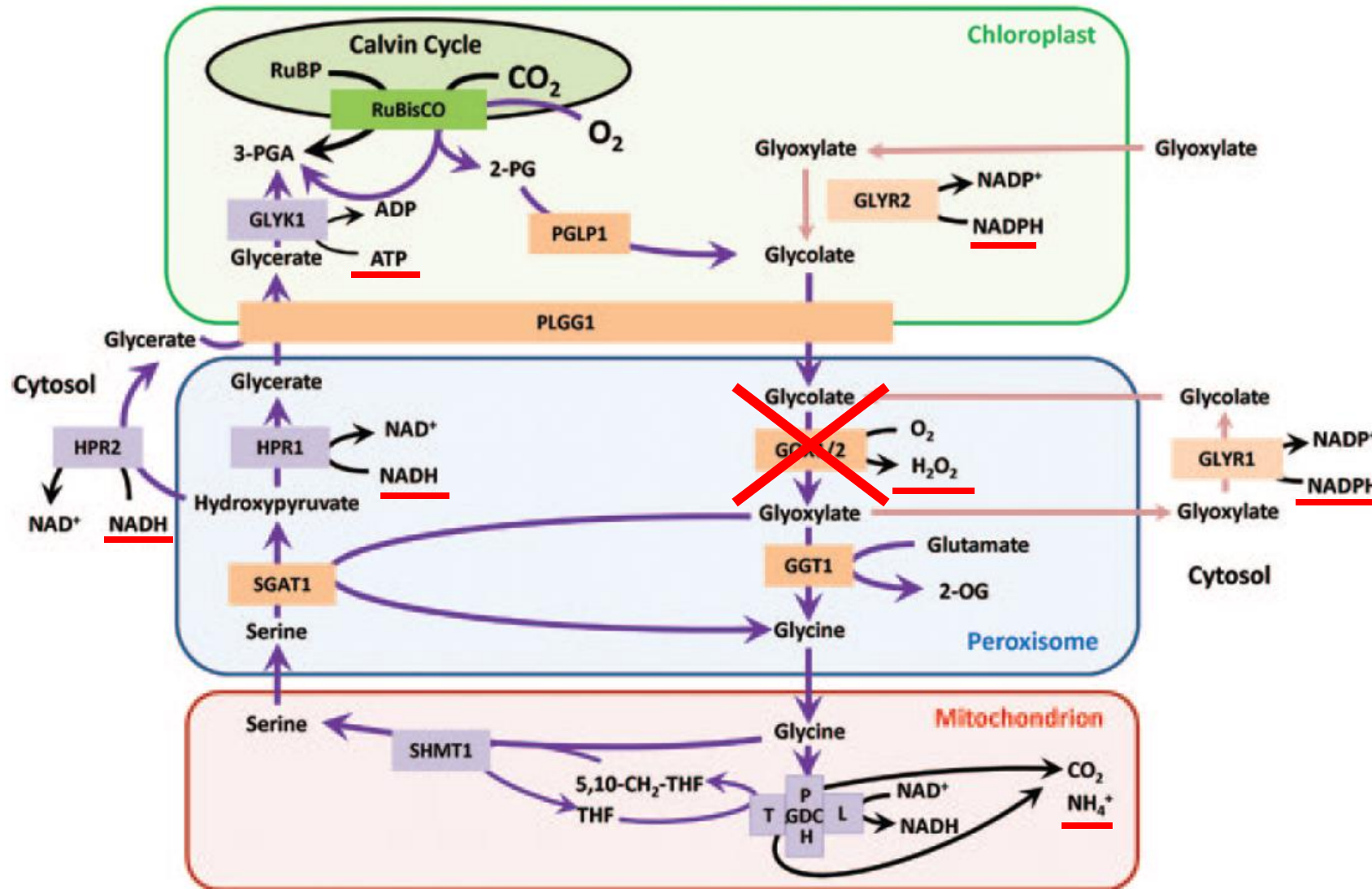
Photosynthèse : Cycle de Calvin-Benson : Rubisco : Oxygénase





Photorespiration :

- Consomme de l'énergie
- Relargue du CO₂
- Relargue de l'azote
- Génère des ROS



Photorespiration :

- Consomme de l'énergie
- Relargue du CO₂
- Relargue de l'azote
- Génère des ROS

Coût pour la cellule.
Augmente avec la T° !

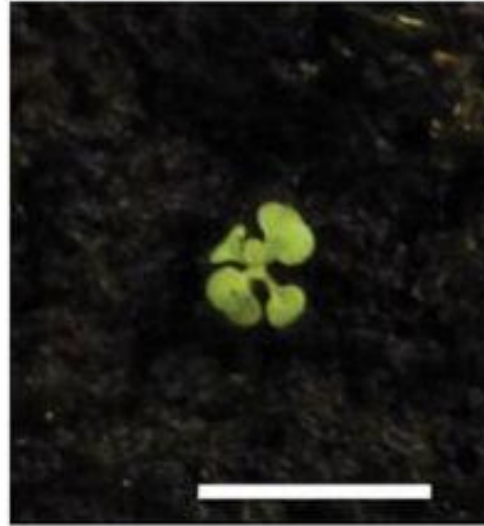
Pas (toujours)
essentielle !

Col-0

amiRgox1/2

Air

[CO₂] = 0,04% air



Photorespiration :

- Consomme de l'énergie
- Relargue du CO₂
- Relargue de l'azote
- Génère des ROS

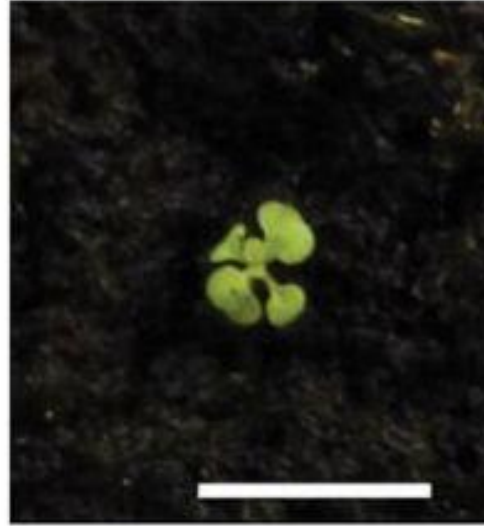
**Coût pour la cellule.
Augmente avec la T° !**

Col-0

amiRgox1/2

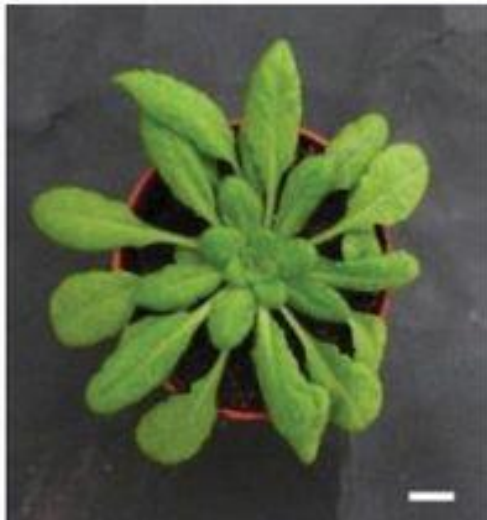
Air

[CO₂] = 0,04% air



High CO₂
(HC)

[CO₂] = 3% air

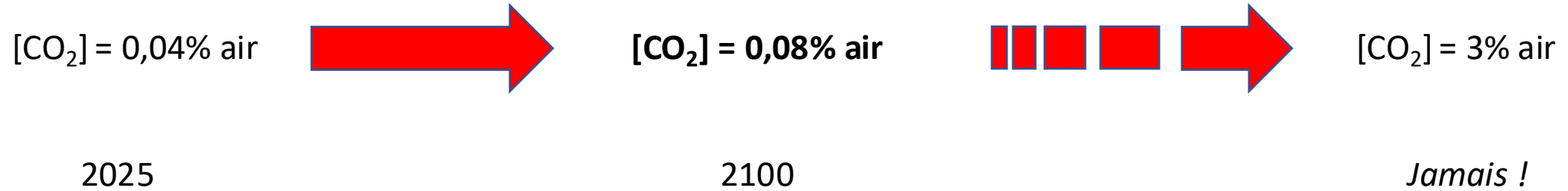


Photorespiration :

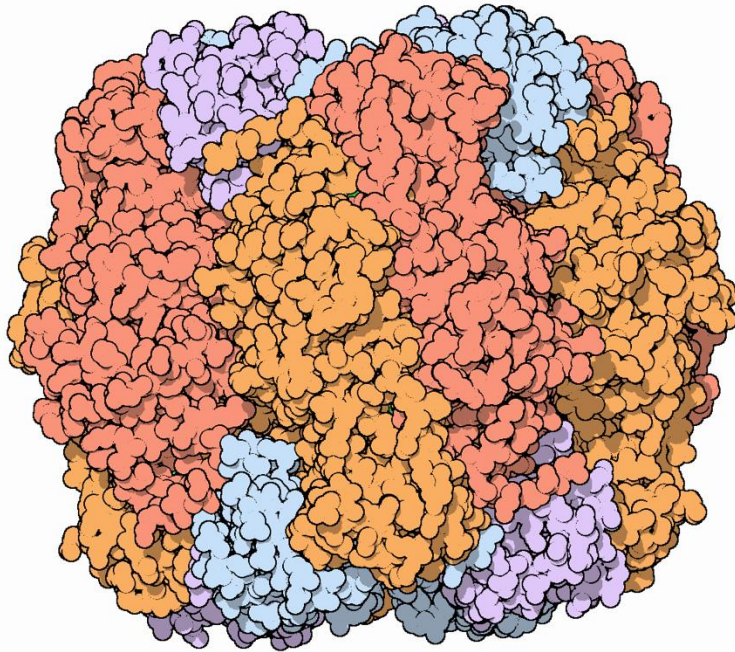
- Consomme de l'énergie
- Relargue du CO₂
- Relargue de l'azote
- Génère des ROS

Coût pour la cellule.
Augmente avec la T° !

↑ CO₂ → ↑ Rendements



**Augmentation du CO₂ atmosphérique
n'augmentera pas suffisamment la fixation
photosynthétique du C par la Rubisco.**



Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase / Oxygénase

Paramètres catalytiques :

$$k_{\text{cat}} = 0,1 - 13,5 \text{ s}^{-1}$$

$$K_{\text{M}(\text{CO}_2)} = 1,9 \text{ } \mu\text{M} - 65 \text{ mM}$$

Jusqu'à 50% des
protéines solubles

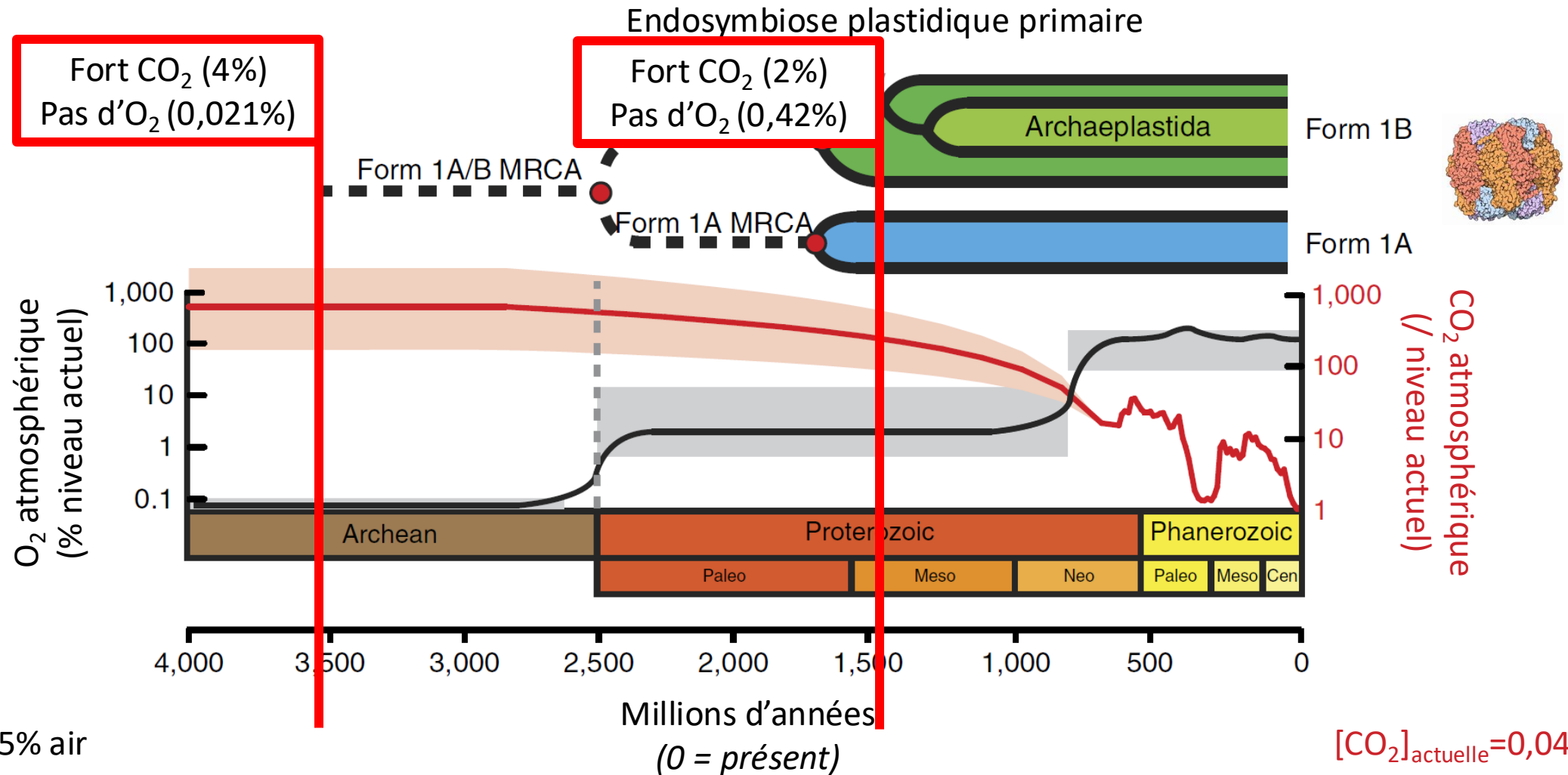
Différencie mal CO₂ Vs O₂
→ Photorespiration

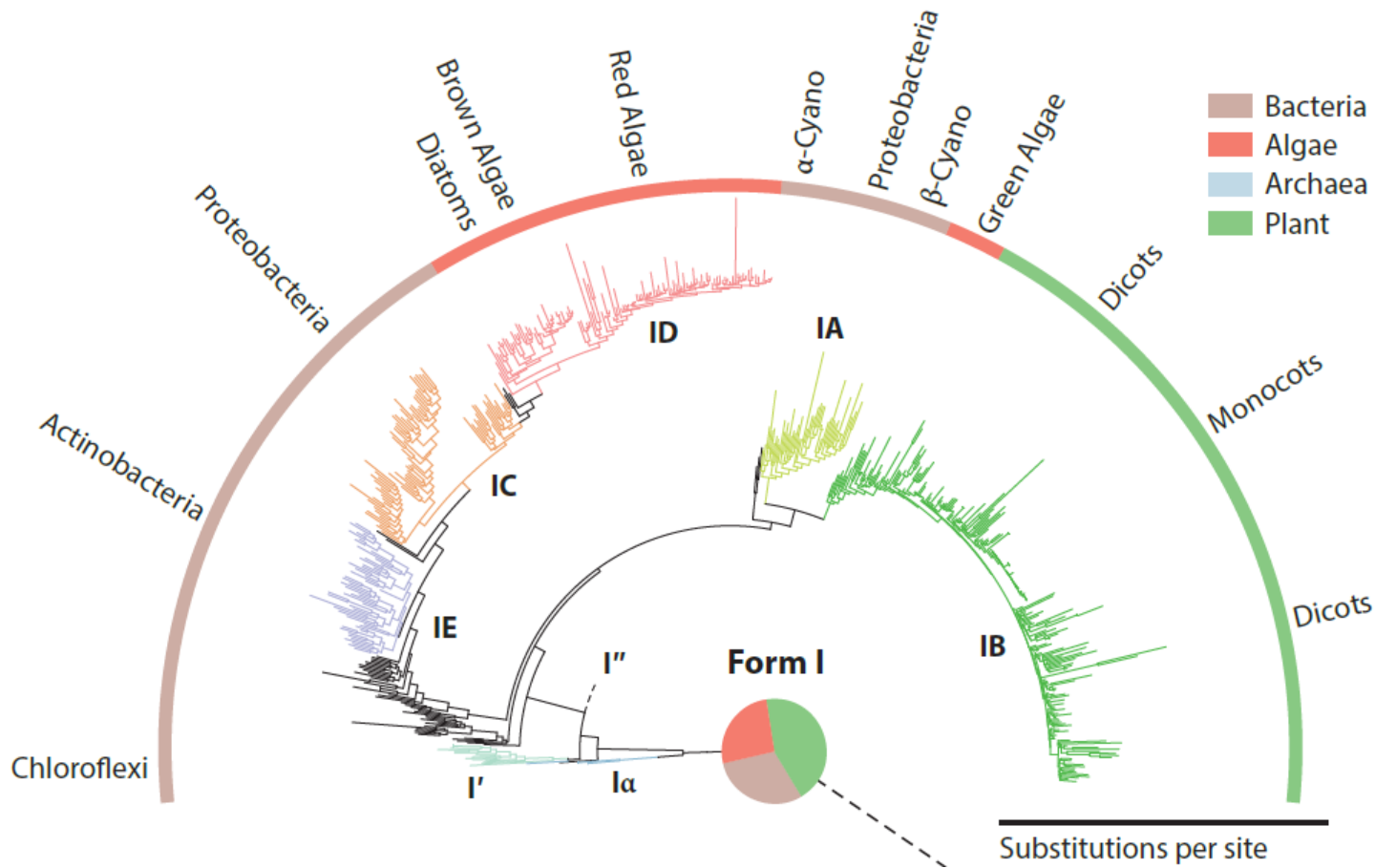
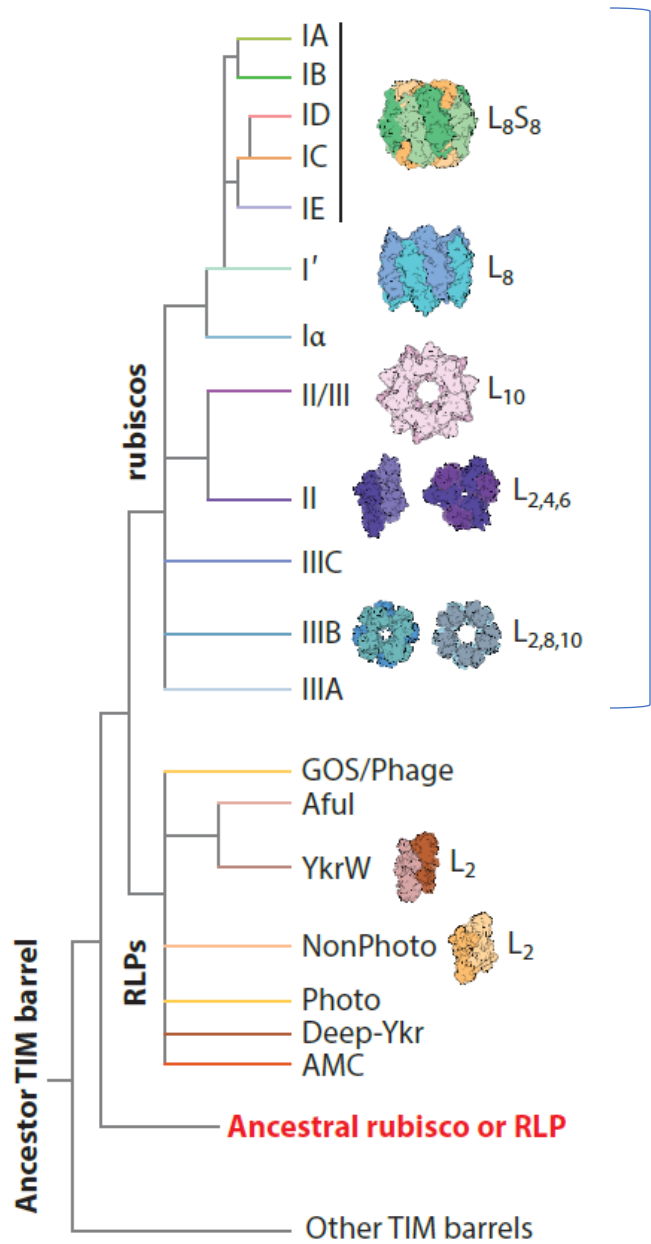
Pourquoi l'évolution a-t-elle
sélectionnée une enzyme
aussi peu efficace ?



L'évolution sélectionne toujours la
meilleure solution **disponible** au
moment donné et donc dans les
conditions données.

L'évolution a-t-elle sélectionné une enzyme aussi peu efficace ?

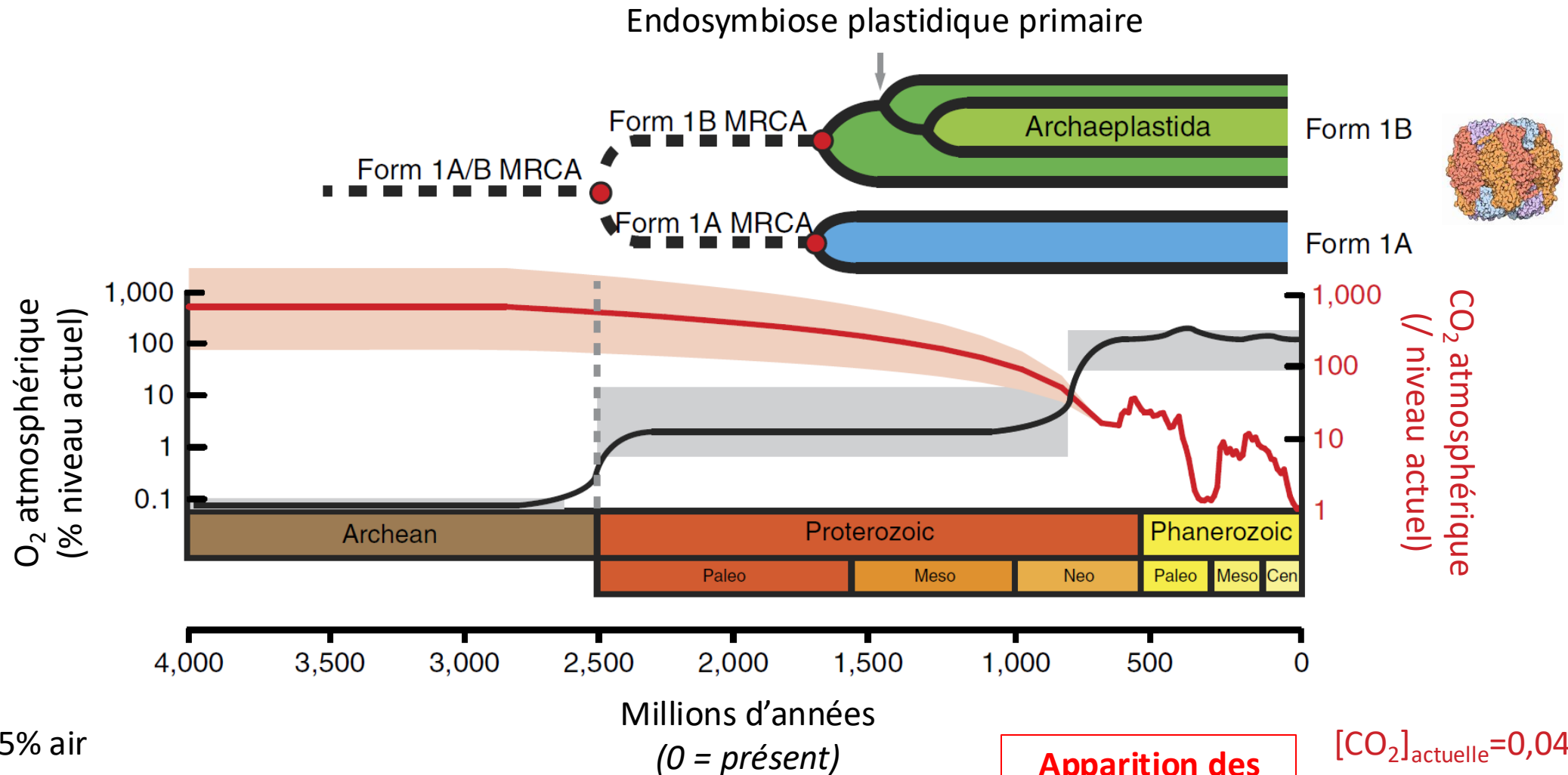




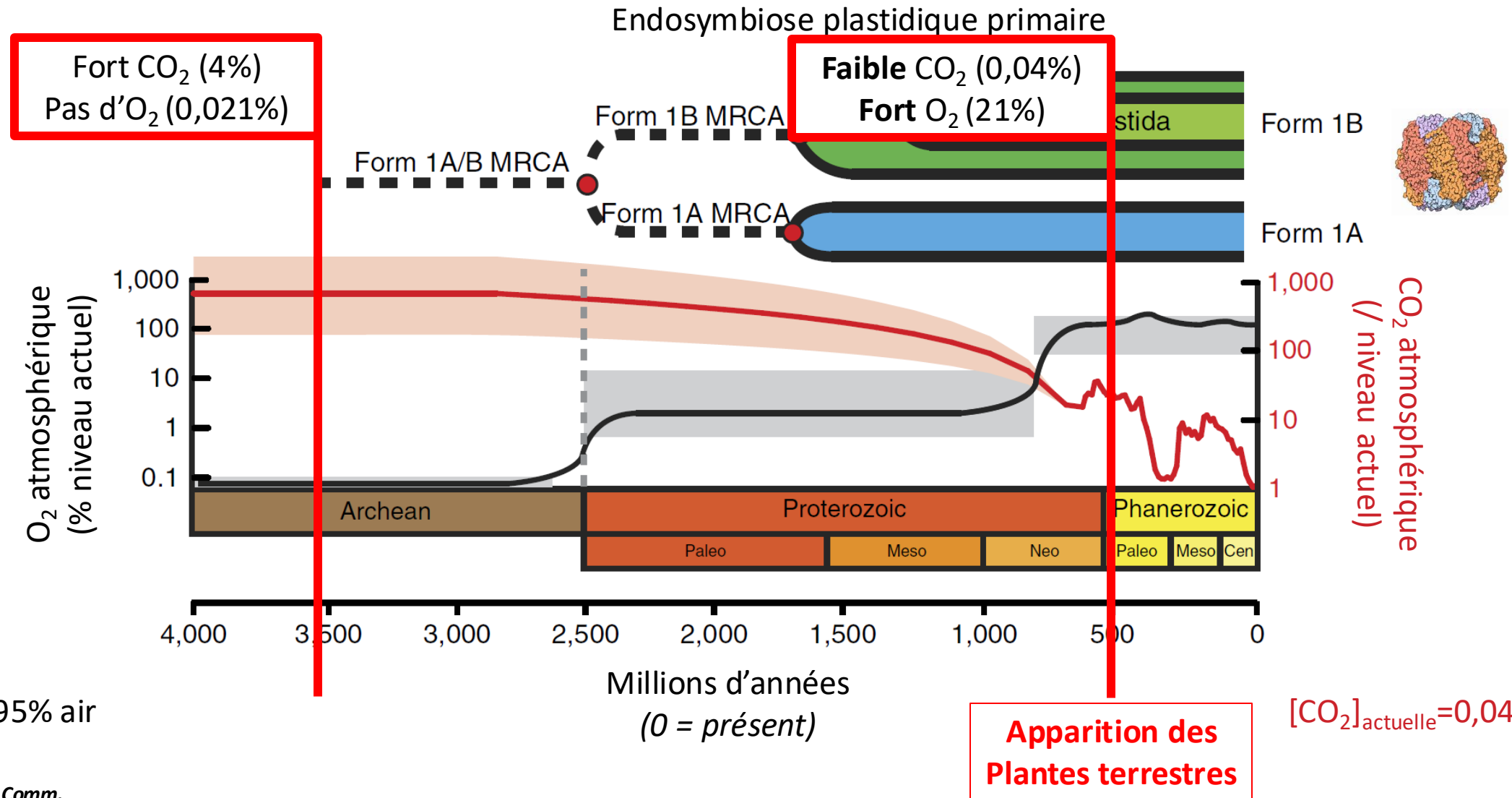
Paramètres catalytiques
Faibles

Différence mal CO₂ Vs O₂
➔ Photorespiration

L'évolution a-t-elle sélectionné une enzyme aussi peu efficace ?

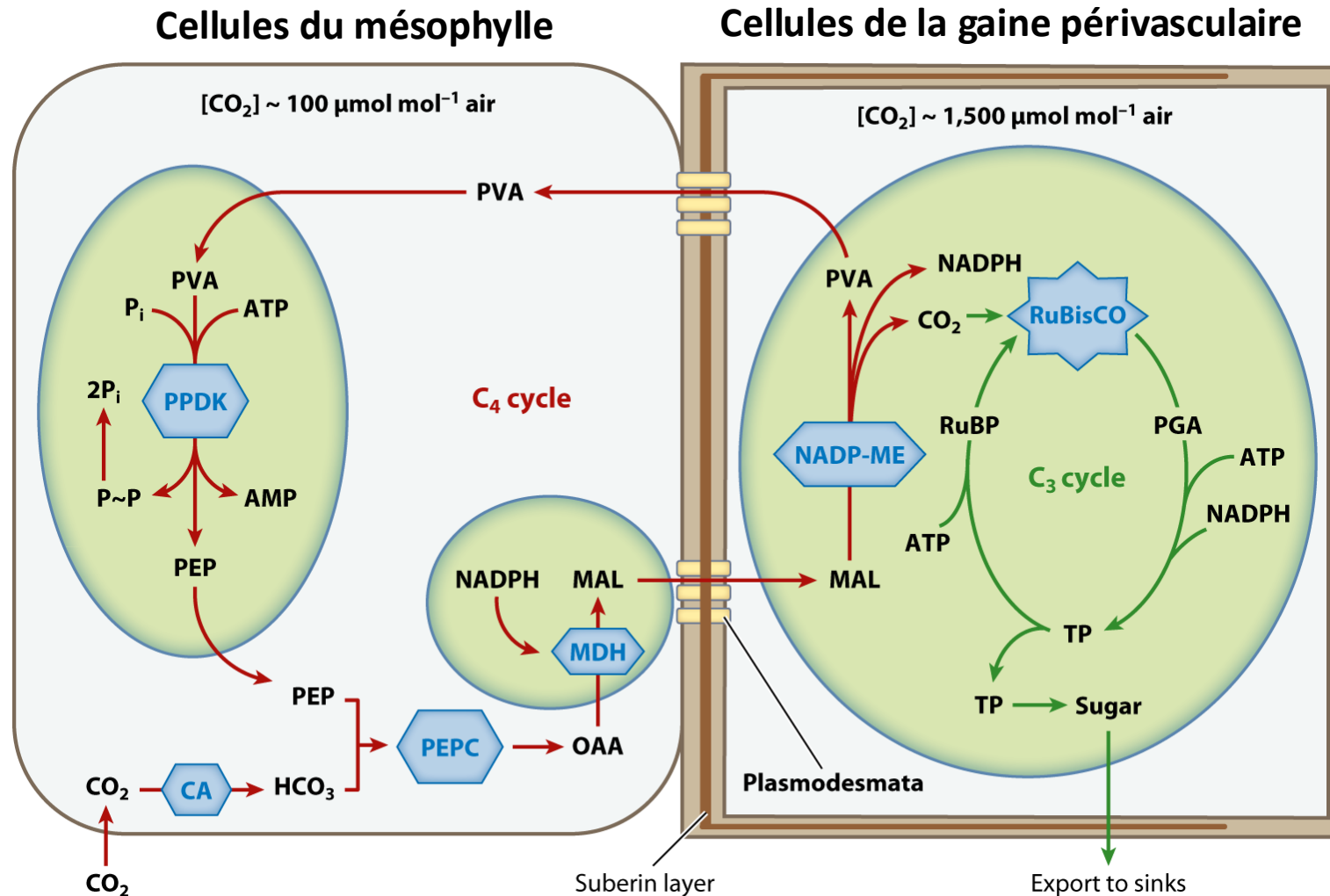


L'évolution a-t-elle sélectionné une enzyme aussi peu efficace ?

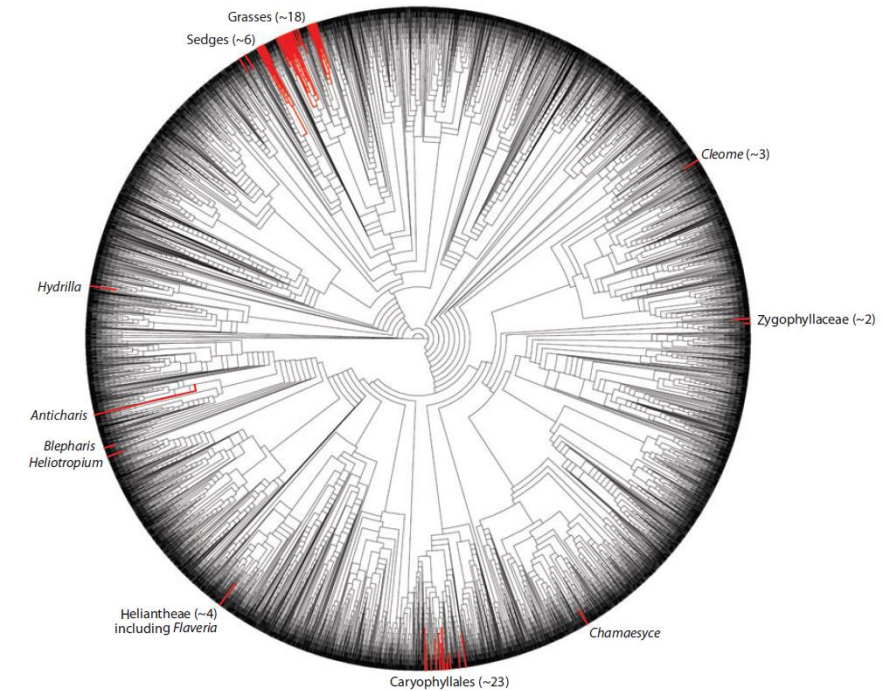


Photosynthèse : Solution évolutive au « problème Rubisco » : séparation physique

Photosynthèse en C₄ : 2 types cellulaires



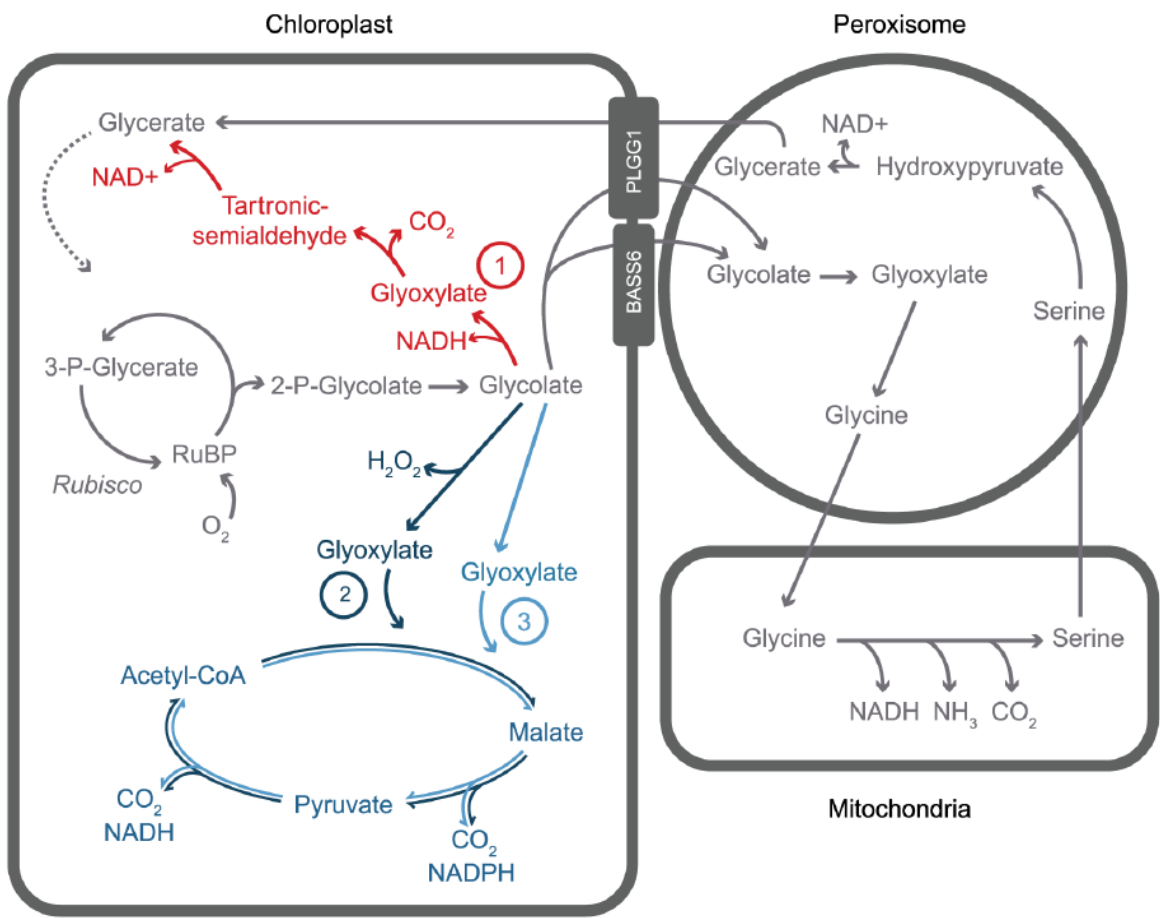
Une solution très favorable...



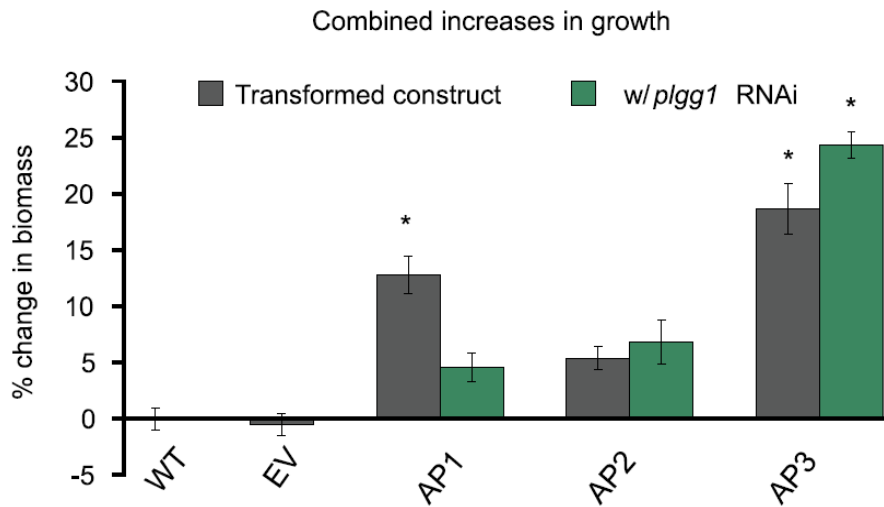
...apparue **indépendamment**
plus de 60 fois !

Eliminer la photorespiration en la court-circuitant.

Tabac (plante C₃) en serre



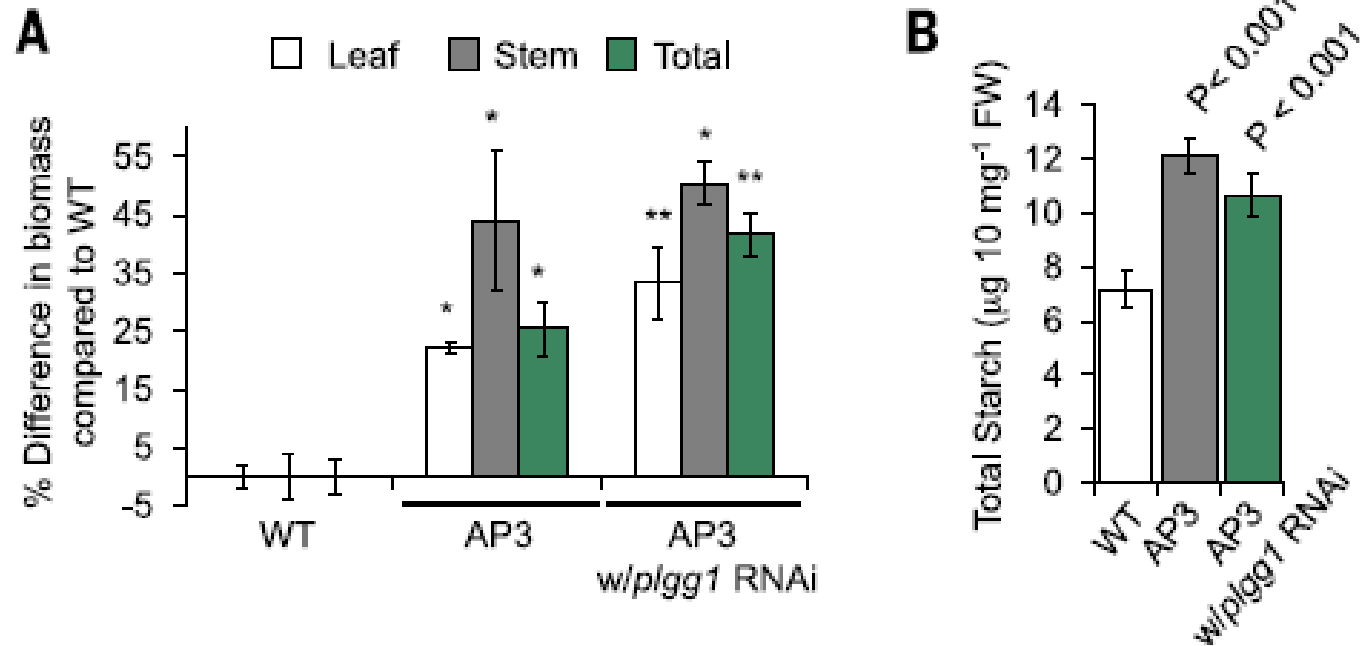
Gain de productivité de biomasse de 25%



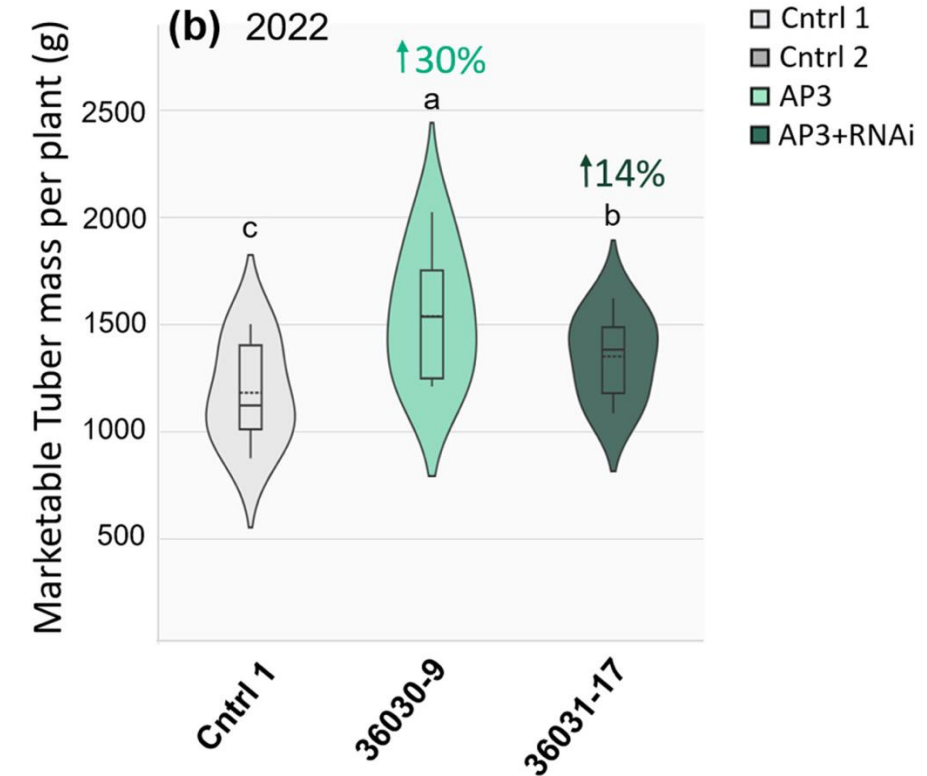
Photosynthèse : *Solution synthétique au « problème Rubisco »*

Éliminer la photorespiration en la court-circuitant.

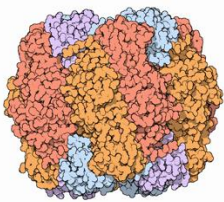
Tabac (plante C₃) en champs



Pomme de Terre (plante C₃) en champs

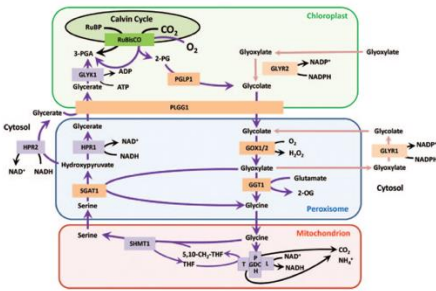
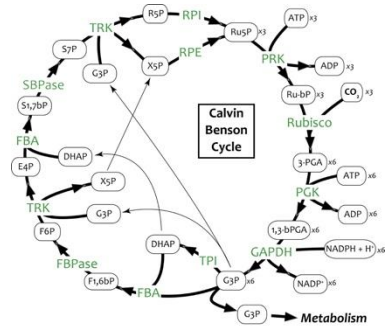


Cycle de fixation du carbone majoritaire est le cycle de Calvin-Benson

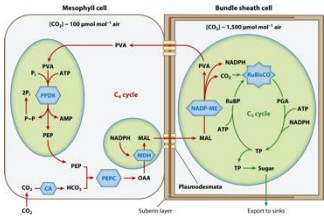


Le Cycle de Calvin-Benson est limité par sa carboxylase, la Rubisco

La Rubisco est peu efficace et ne différencie pas le CO₂ de l'O₂.



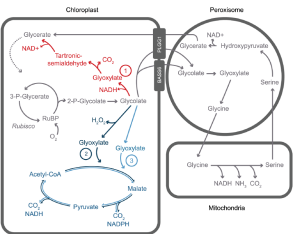
La Photorespiration déttoxifie le produit de l'activité oxygénase de la Rubisco.



La Photorespiration a un coût pour la plante et des solutions évolutives à cela, dont la photosynthèse en C4, ont été sélectionnées.

Augmentation du CO₂ atmosphérique n'augmentera pas suffisamment la fixation photosynthétique du C par la Rubisco.

Des solutions synthétiques à l'inefficacité de la Rubisco existent et sont prometteuses.





Equipe Biologie Synthétique et systémique des micro-algues Biofonderie de l'Alliance Sorbonne Université

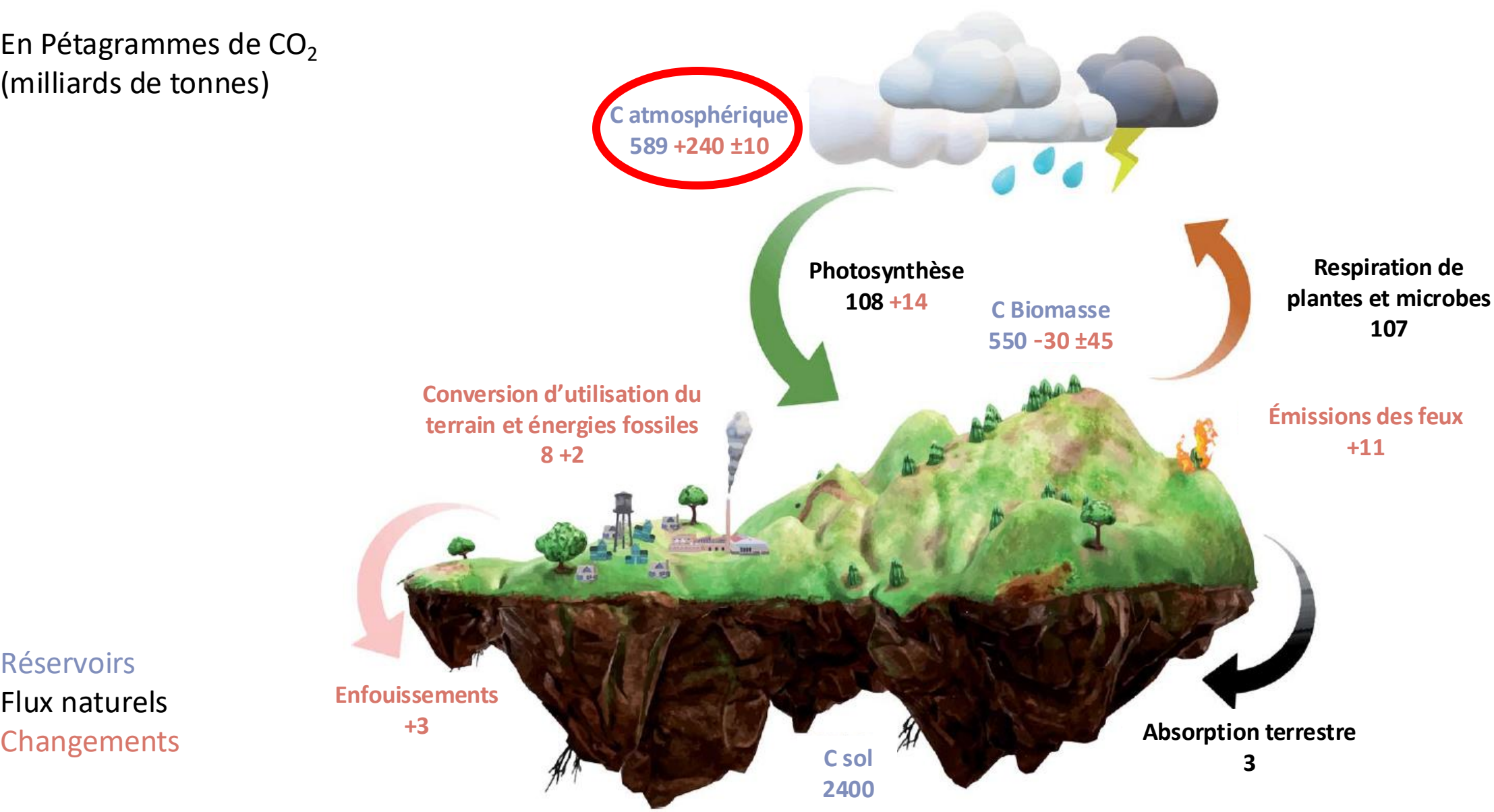


Stéphane Lemaire
Julien Henri
Antoine Danon
Christophe Marchand
Lucile Jomat
Damien Douchi
Mathieu Husser
Lina Duque
Pietro Caldart

Marta Bertolini
Tanguy Chotel
Bruno Da Silva-Teixeira
Lou Lambert
Mariette Gibier
Laura Morette
Costanza Quel Piñol
Cyril Déjoué
Isabelle Krempholtz

Diapositives supplémentaires

En Pétagrammes de CO₂
(milliards de tonnes)



Réservoirs
Flux naturels
Changements



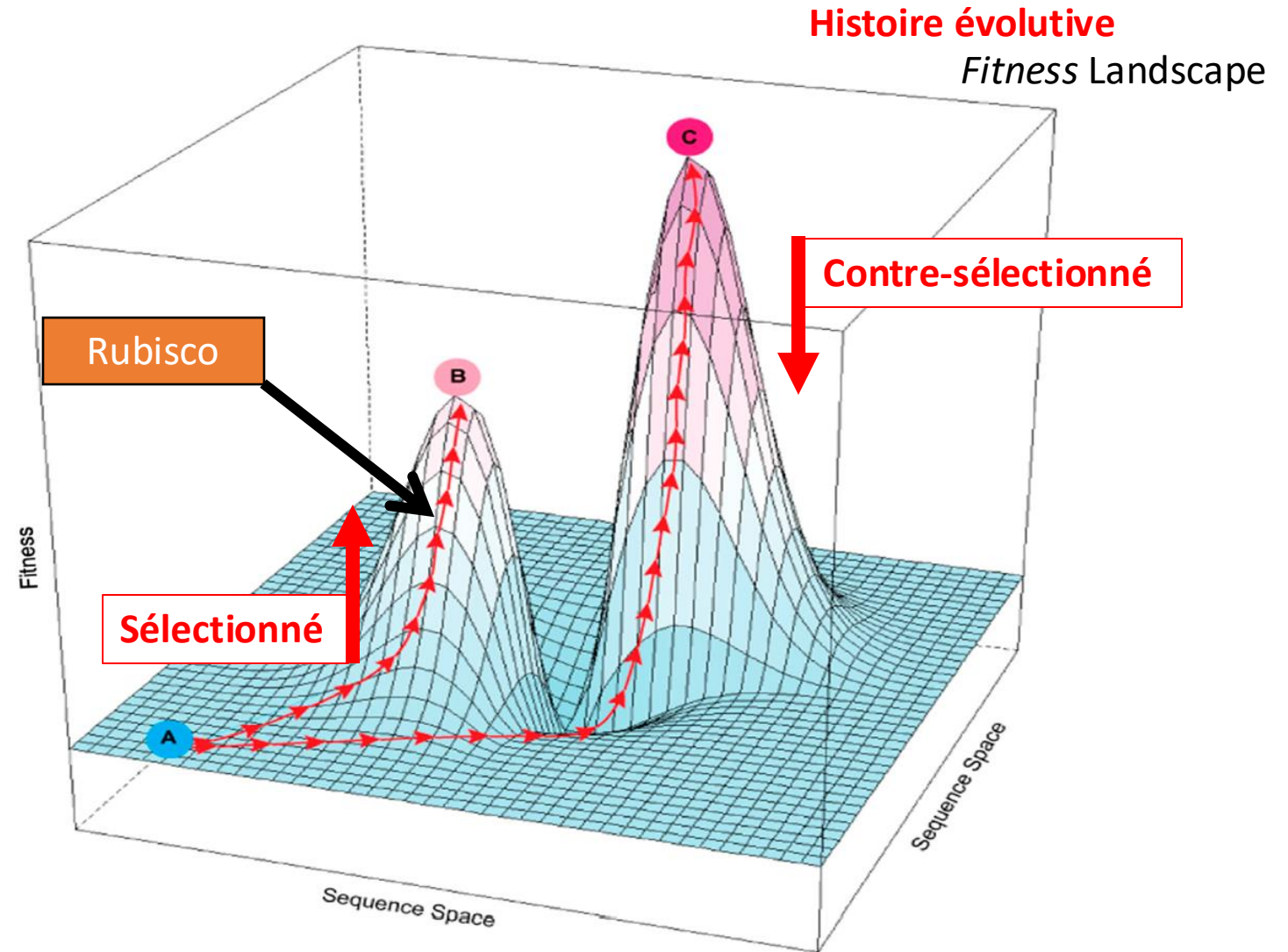
Cyanobactéries

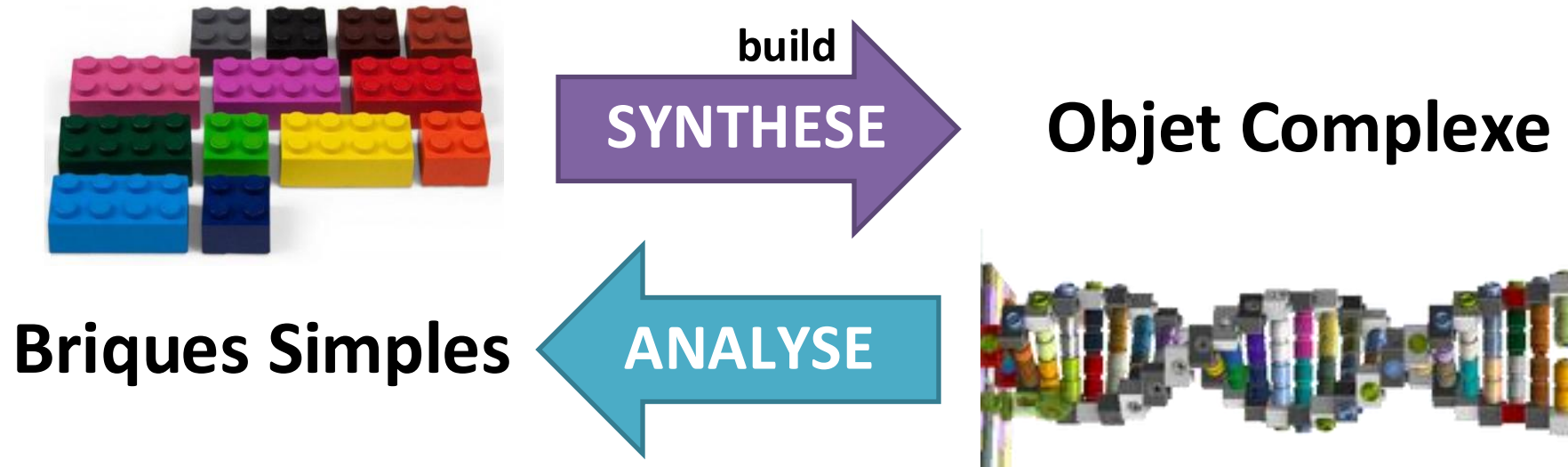


Pourquoi l'évolution a-t-elle *conservée* une enzyme aussi peu efficace ?

L'évolution sélectionne toujours la meilleure solution **disponible** au **moment donné** et donc dans les **conditions données**.

Le **chemin évolutif** de la Rubisco a été sélectionné à cause de pressions de sélection **différentes** de celles actuelles !



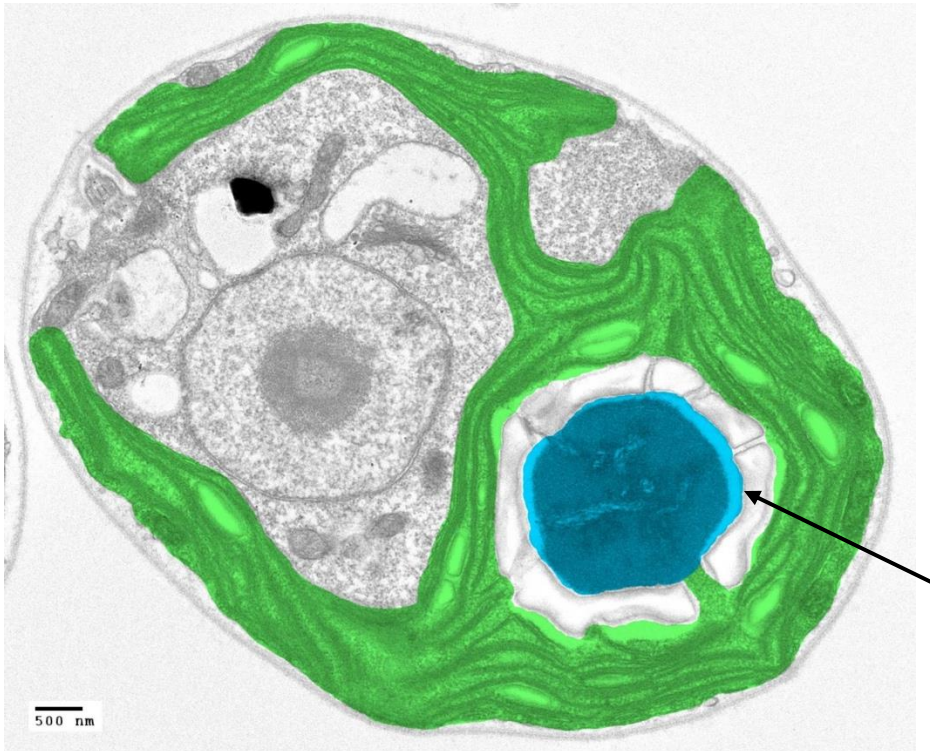


La Synthèse est une méthode puissante de recherche.

Synthèse et Analyse sont complémentaires

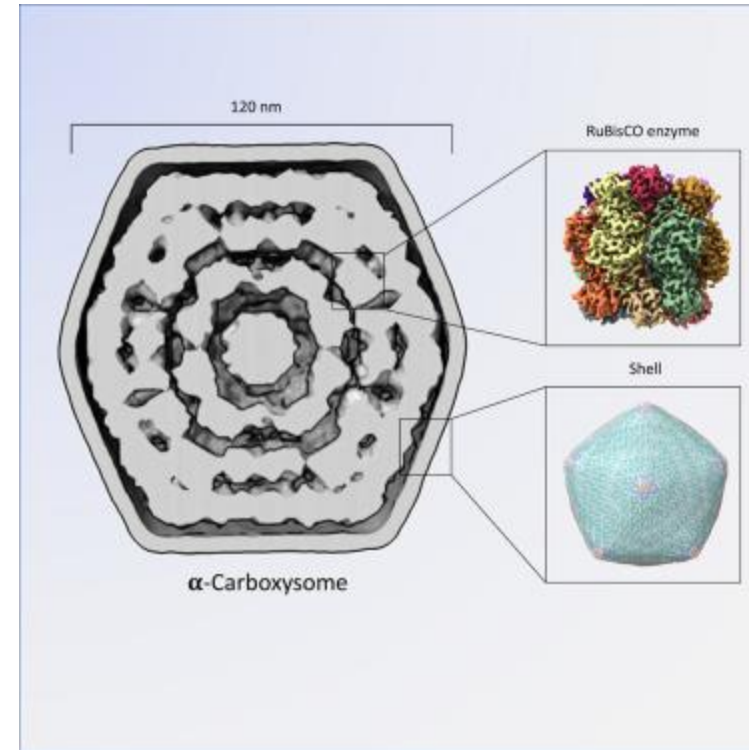
Mécanisme de concentration du carbone : 2 compartiments cellulaires

Pyrénoïde (« Algues »)

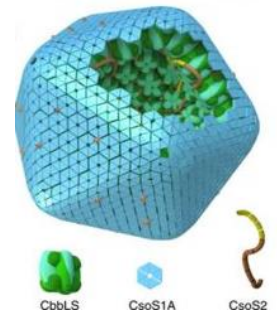
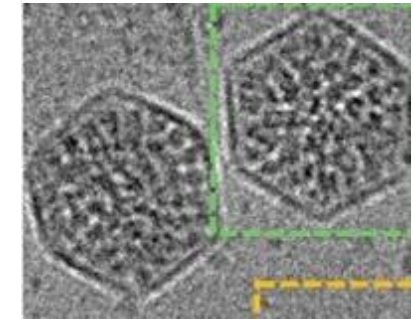


Sous compartiment cellulaire
(gaine d'amidon)

Carboxysome (Cyanobactéries)



Sous compartiment cellulaire
(structure protéique)



Photosynthèse : *Solution synthétiques au « problème Rubisco »*

Éliminer la photorespiration en la court-circuitant (2).

**Carboxysomes
dans un
chloroplaste de
feuille de tabac**

