

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

Pierre Crozet

Maître de Conférences HDR,
Sorbonne Université

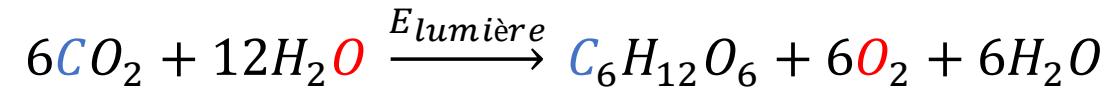
Académie des Sciences, Institut de France
Académie d'Agriculture de France

Paris, 30 septembre 2025

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

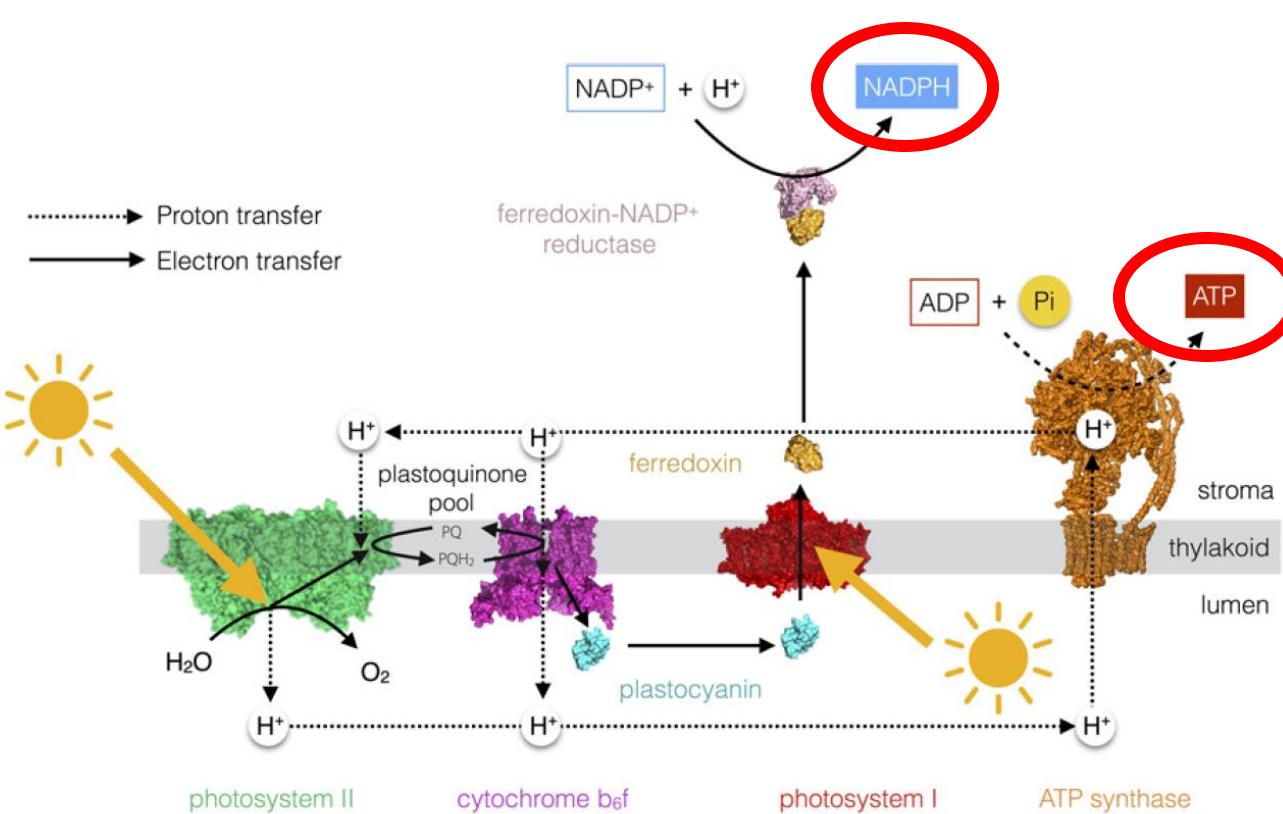
La Photosynthèse : deux processus coordonnés

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

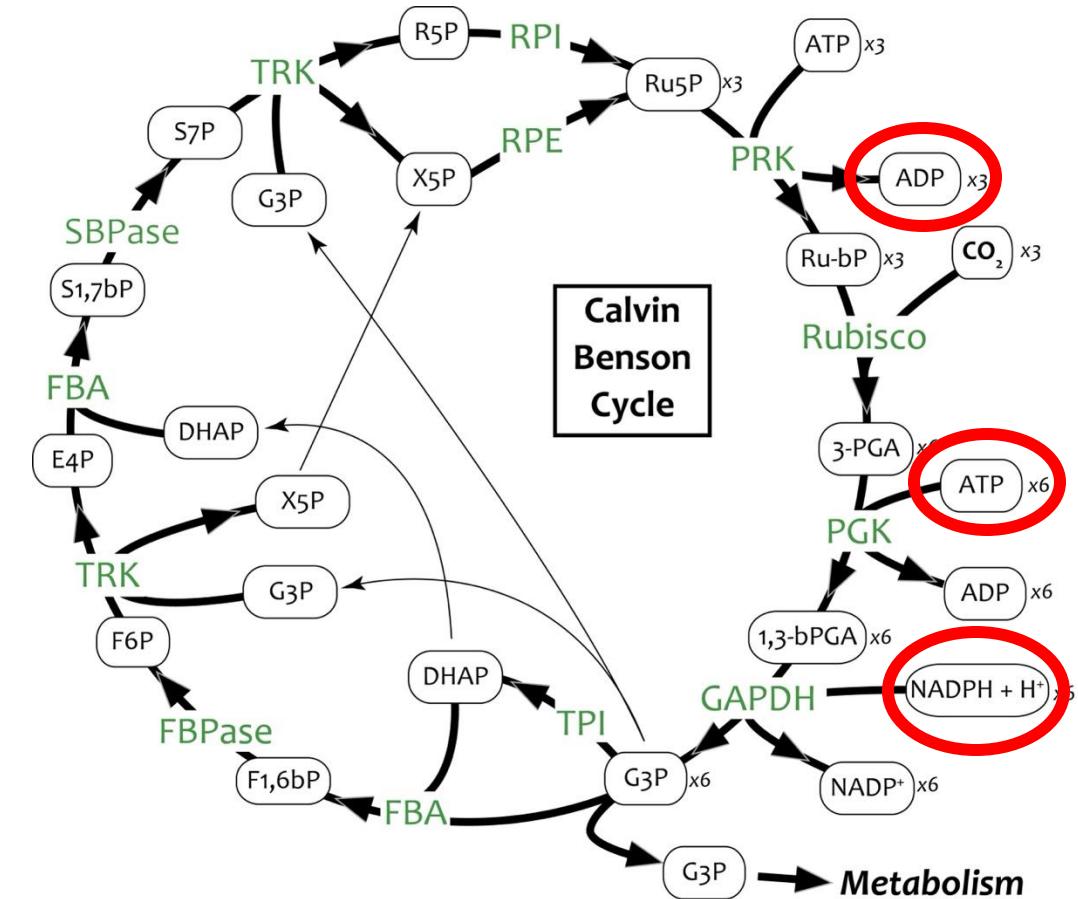


A. Stirbet et al., 2019, *Annals Bot*

Chaine photosynthétique de transfert des électrons



Fixation du carbone

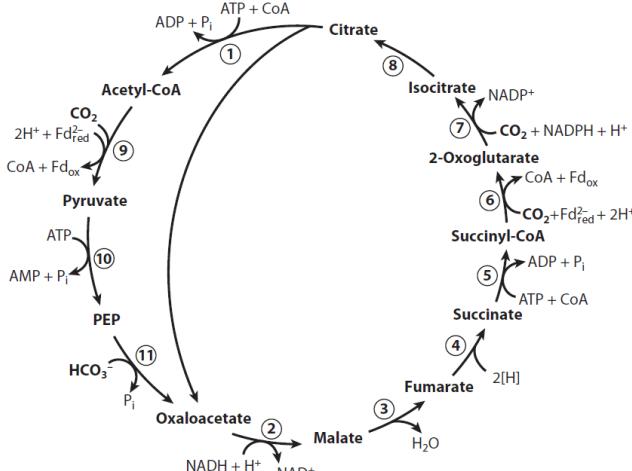


Photosynthèse : Cycles de fixation du carbone

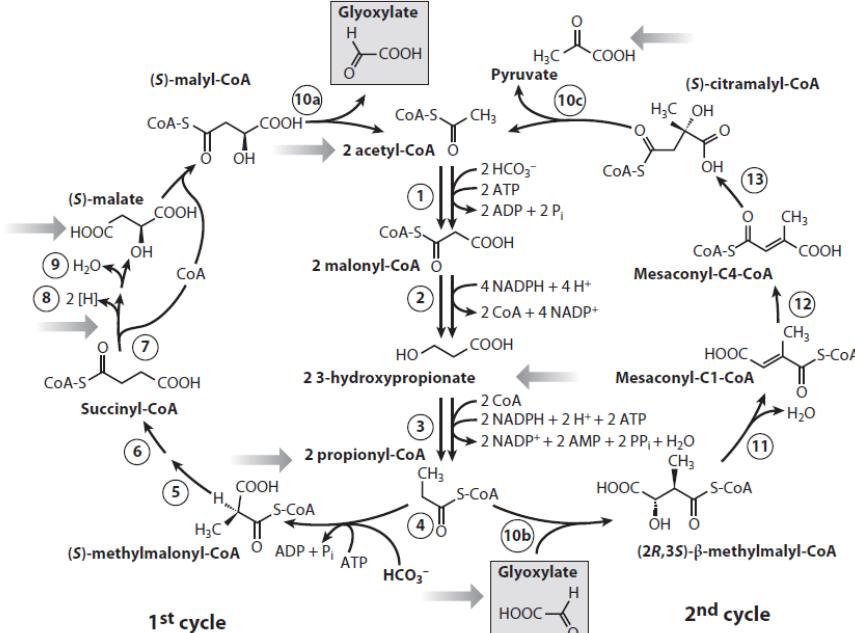
Evolution de la Rubisco pour l'assimilation du CO₂ par les plantes, 30/9/2025

Six voies de fixation du carbone existent.

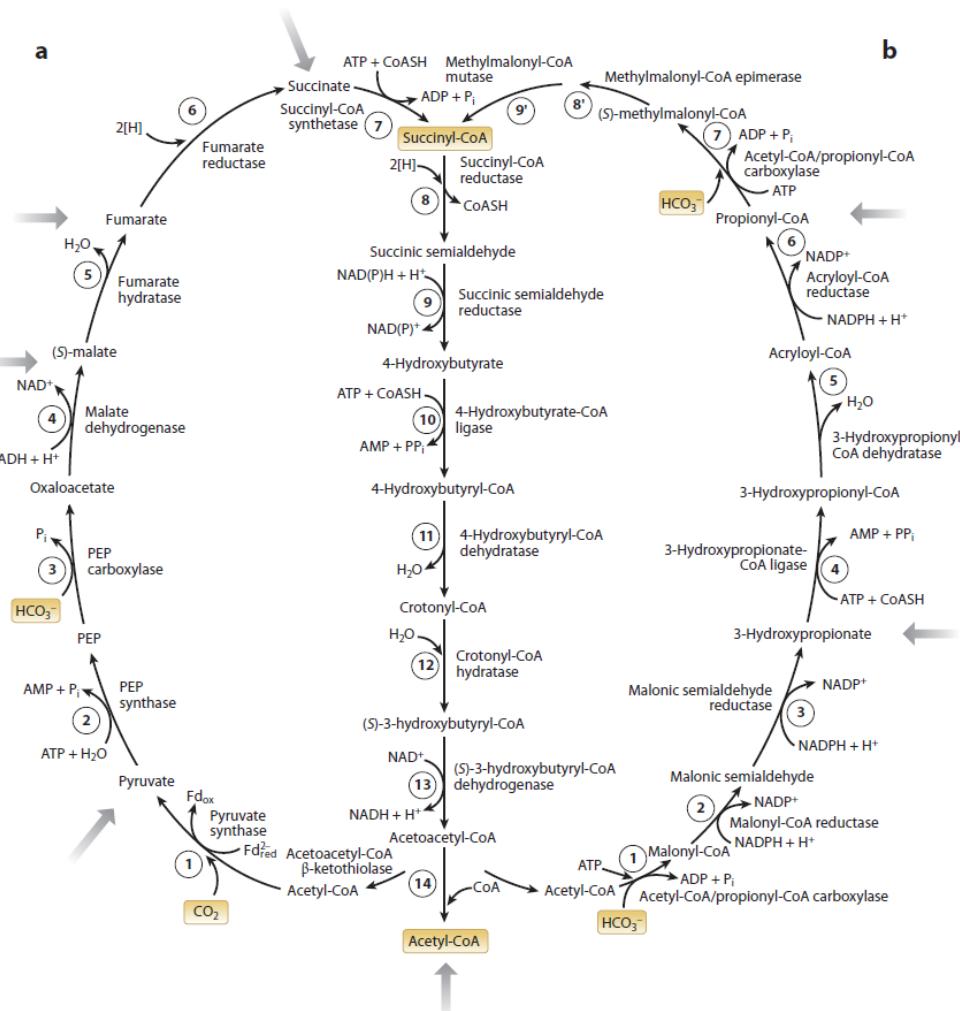
Voie Réductrice de l'acétyl-coenzyme A Bactéries et Archaeobactéries



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



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



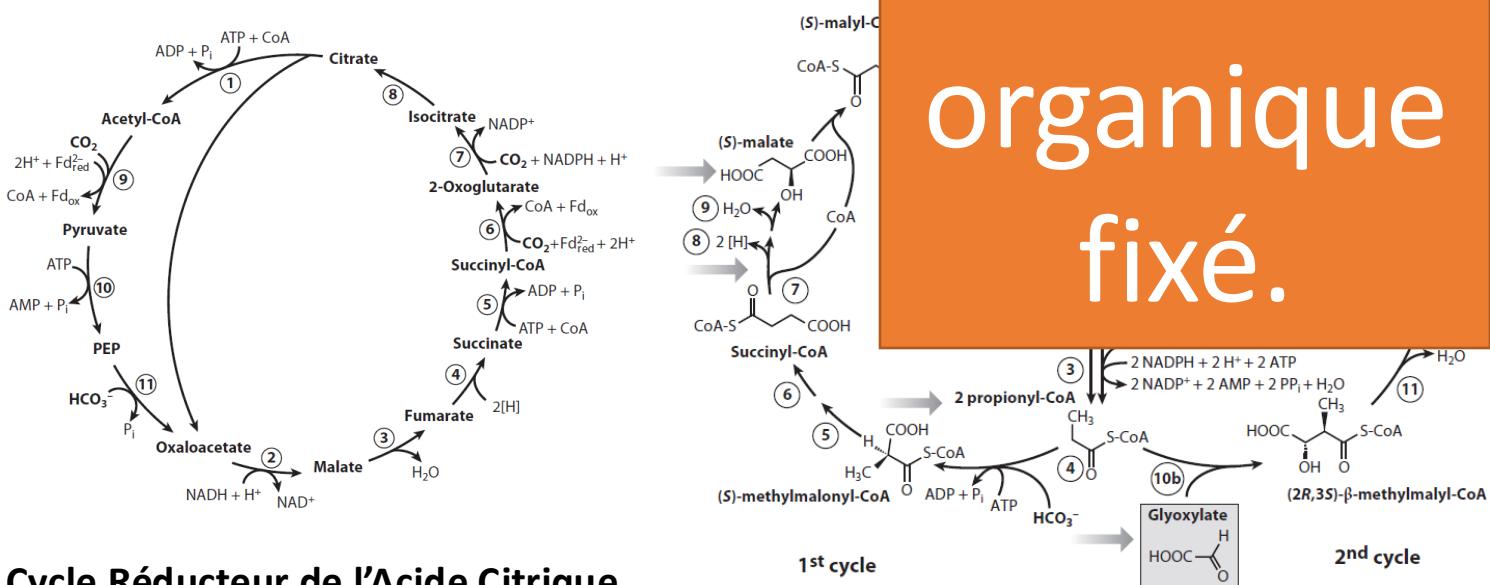
**Dicarboxylate/4-hydroxybutyrate cycle (a)
3-hydroxypropionate/4-hydroxybutyrate cycle (b)
Archaeabacteria**

Photosynthèse : Cycles de fixation du carbone

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

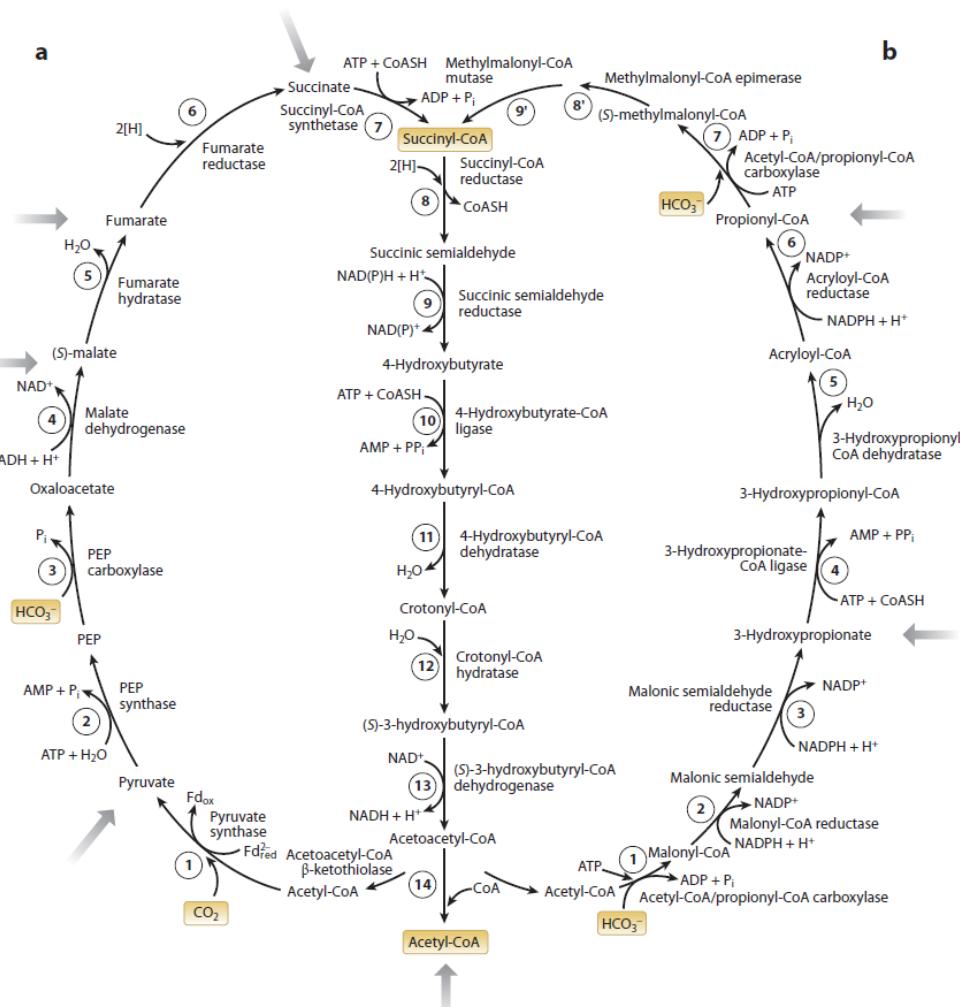
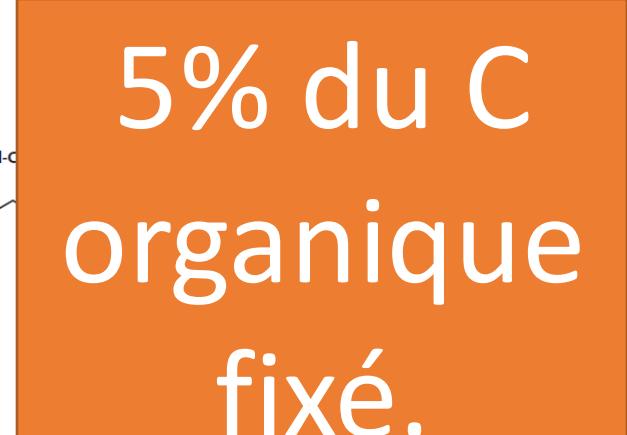
Six voies de fixation du carbone existent.

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



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

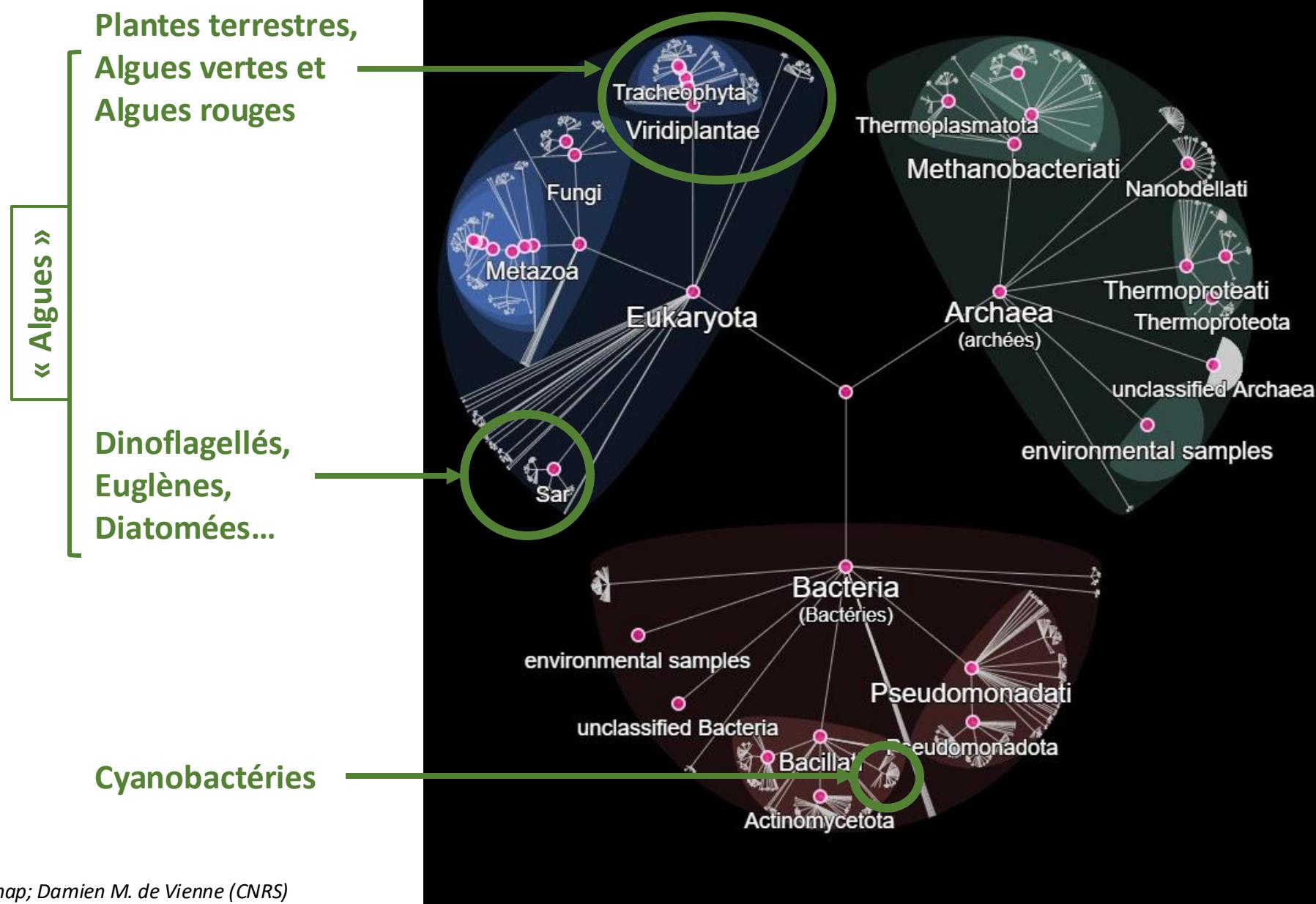
Bi-Cycle du 3-Hydroxypropionate
Chloroflexota (green non-sulfur bacteria)



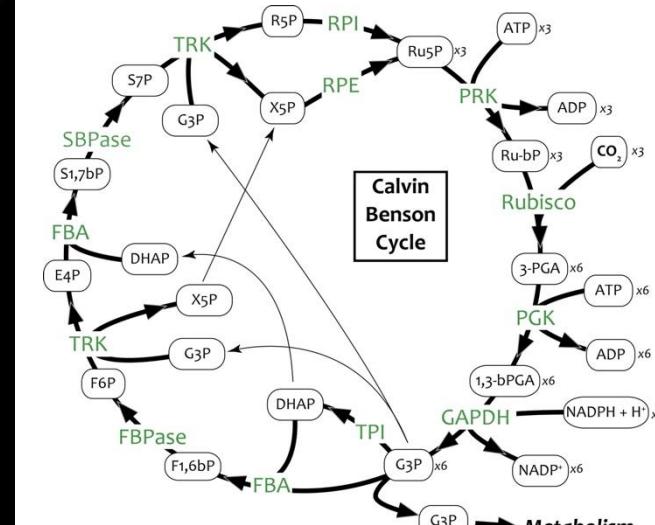
Dicarboxylate/4-hydroxybutyrate cycle (a)
3-hydroxypropionate/4-hydroxybutyrate cycle (b)
Archaeabacteria

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

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



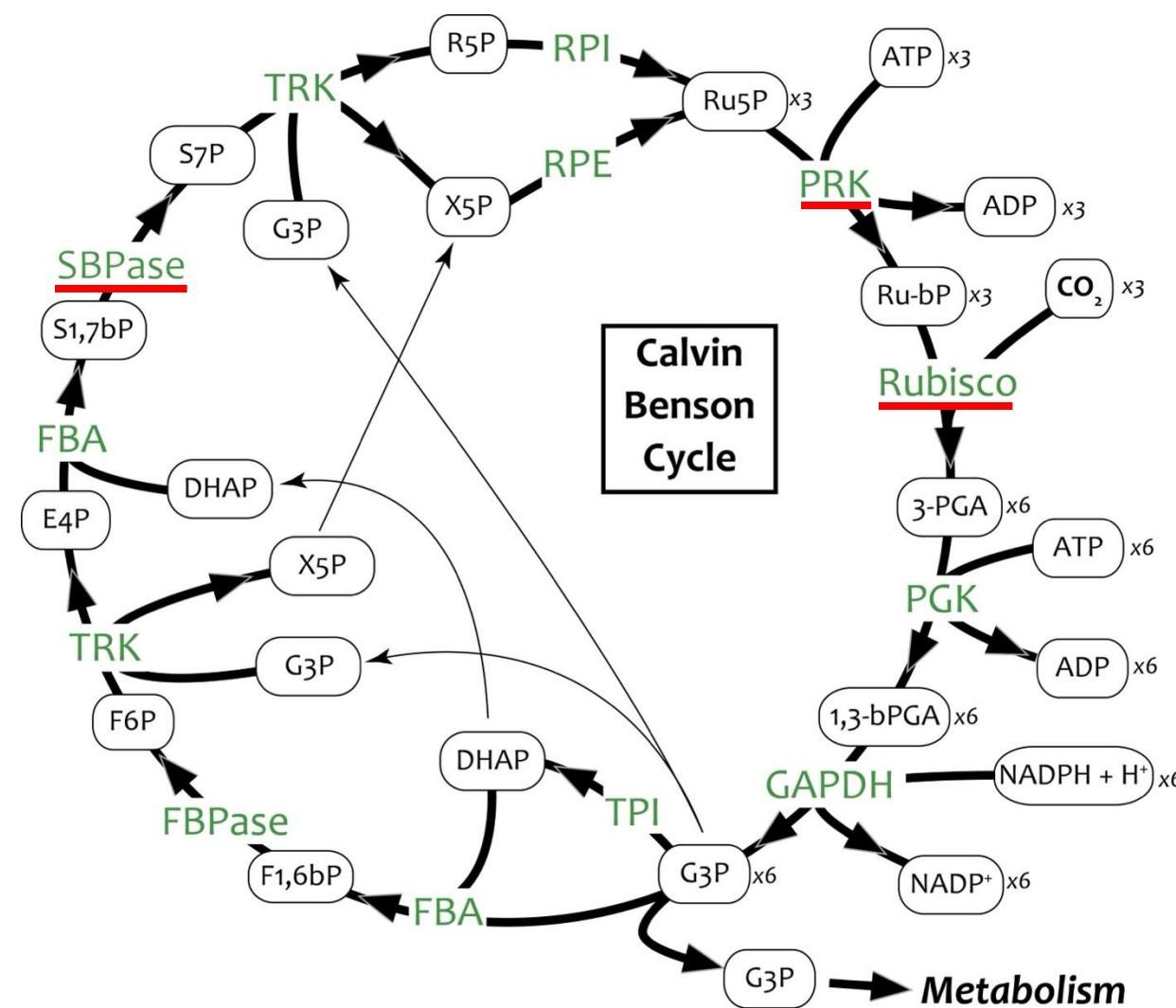
95% du C
organique
fixé.



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

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

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



13 réactions
11 enzymes

1 carboxylase : la Rubisco

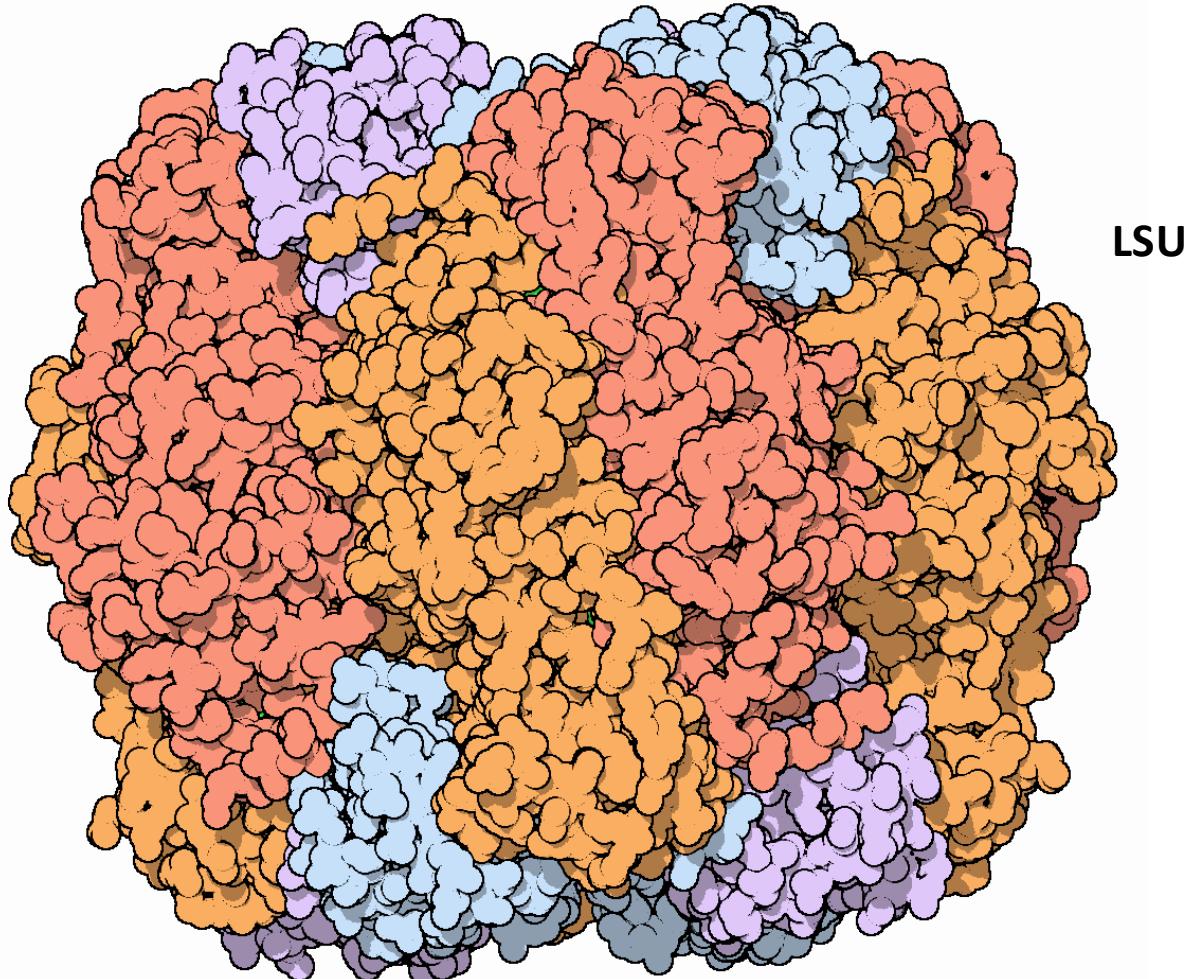
3 enzymes uniques au cycle :
SBPase, PRK et Rubisco

Photosynthèse : Cycle de Calvin-Benson : Rubisco

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



SSU



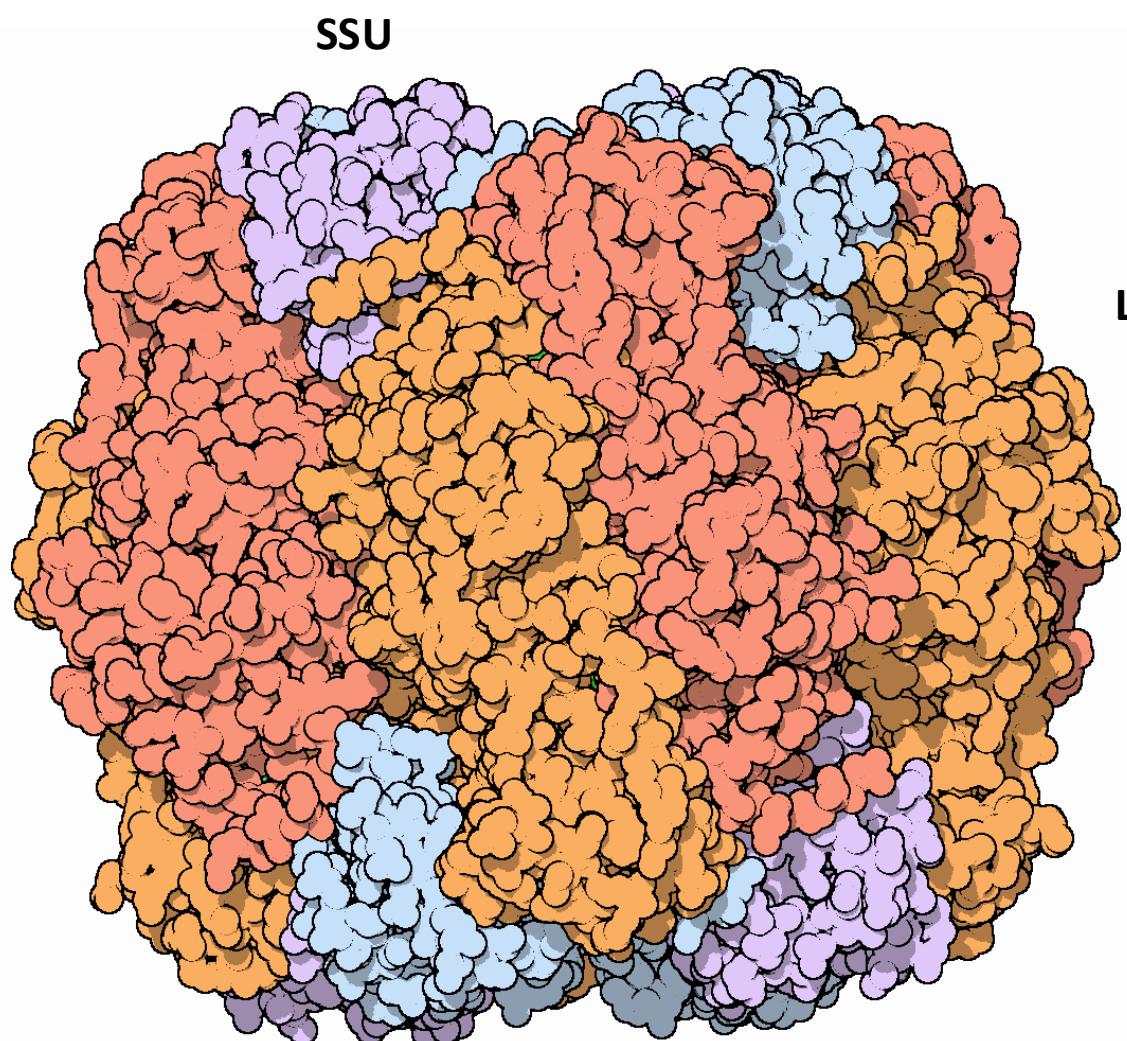
LSU

Ribulose-1,5-Bisphosphate
Carboxylase / Oxygénase

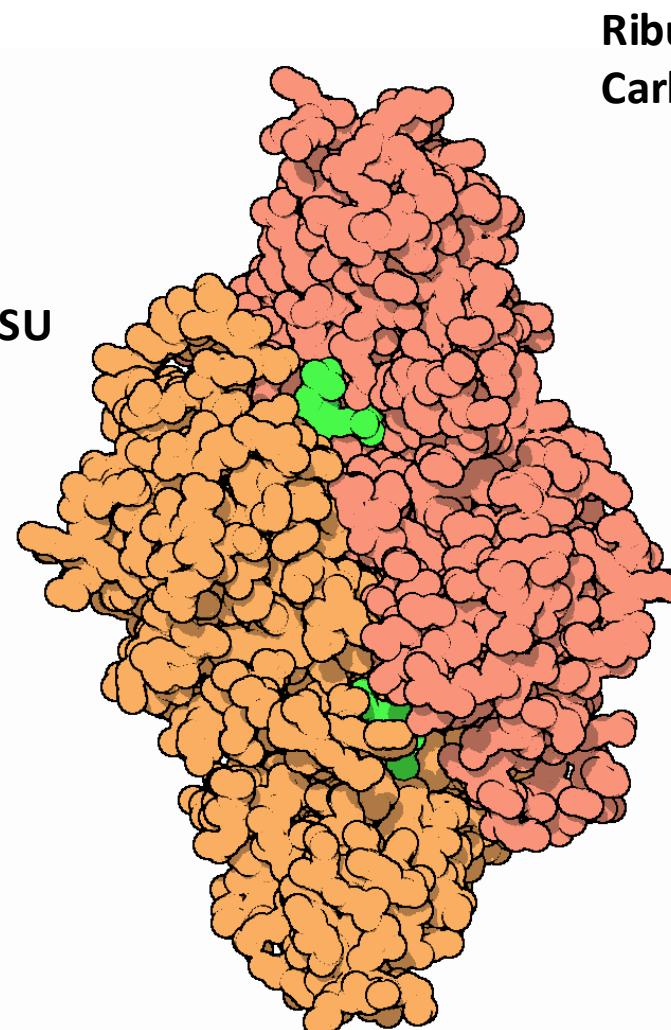
Forme I : L₈S₈
8 grandes sous-unités (LSU)
8 petites sous-unités (SSU)

Photosynthèse : Cycle de Calvin-Benson : Rubisco : Carboxylase

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



LSU

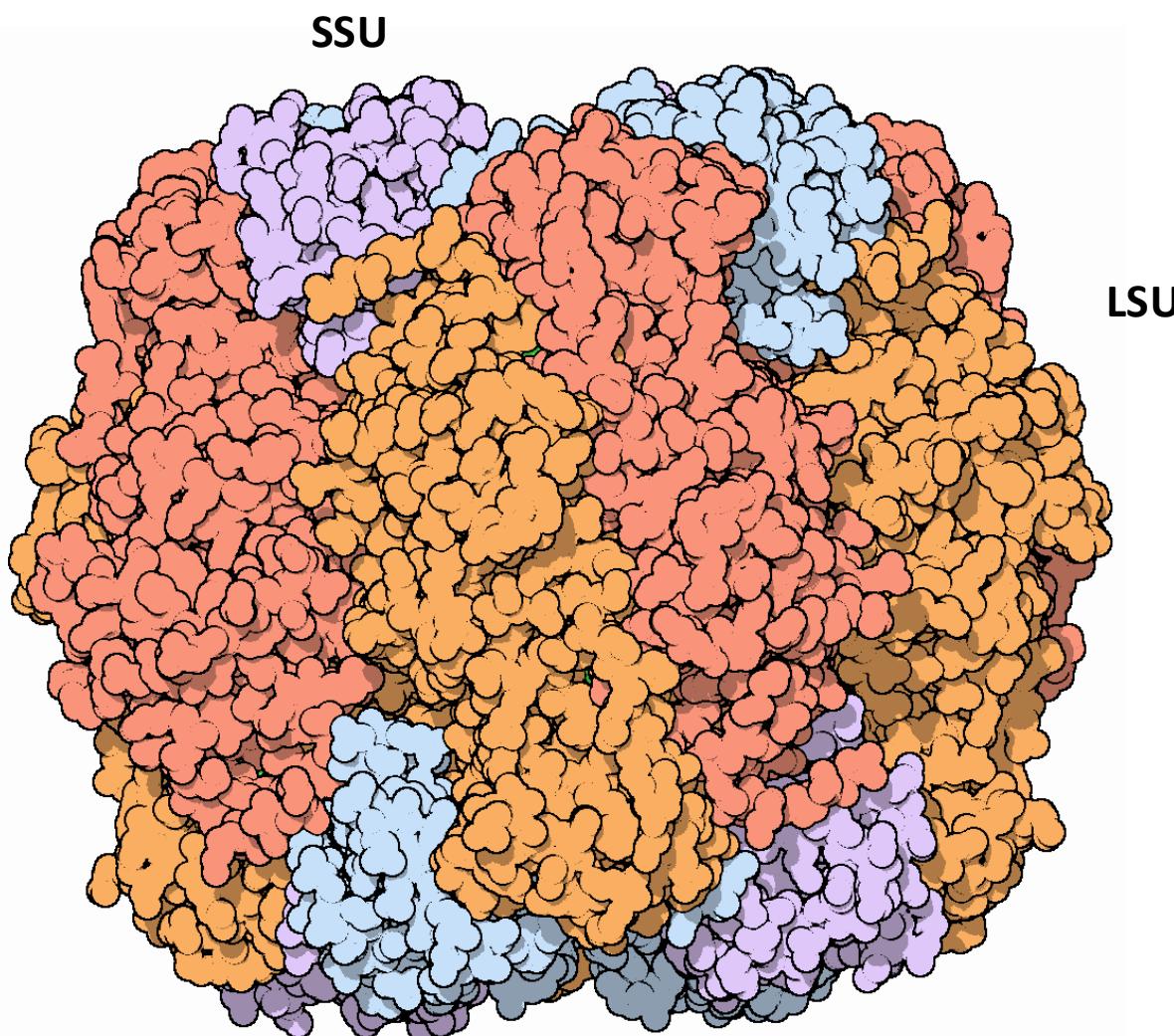


Ribulose-1,5-Bisphosphate
Carboxylase / Oxygénase

Forme I : L₈S₈
8 grandes sous-unités (LSU)
8 petites sous-unités (SSU)

Dimère LSU₂ contient
les sites catalytiques.

Photosynthèse : Cycle de Calvin-Benson : Rubisco : Carboxylase



**Ribulose-1,5-Bisphosphate
Carboxylase / Oxygénase**

Extrait de Riz
(SDS-PAGE)



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



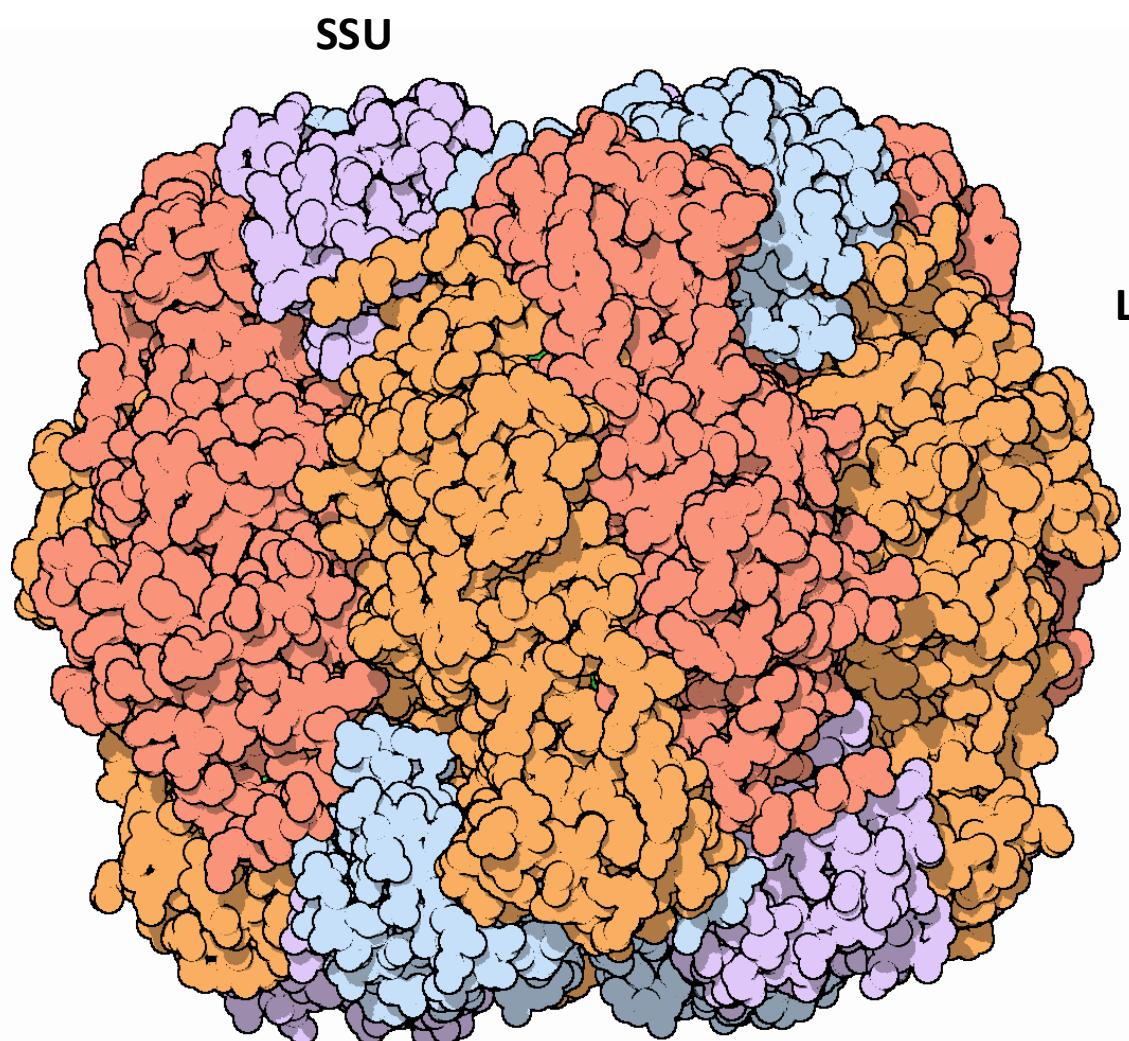
Jusqu'à 50% des
protéines solubles

0,73 Gt sur Terre

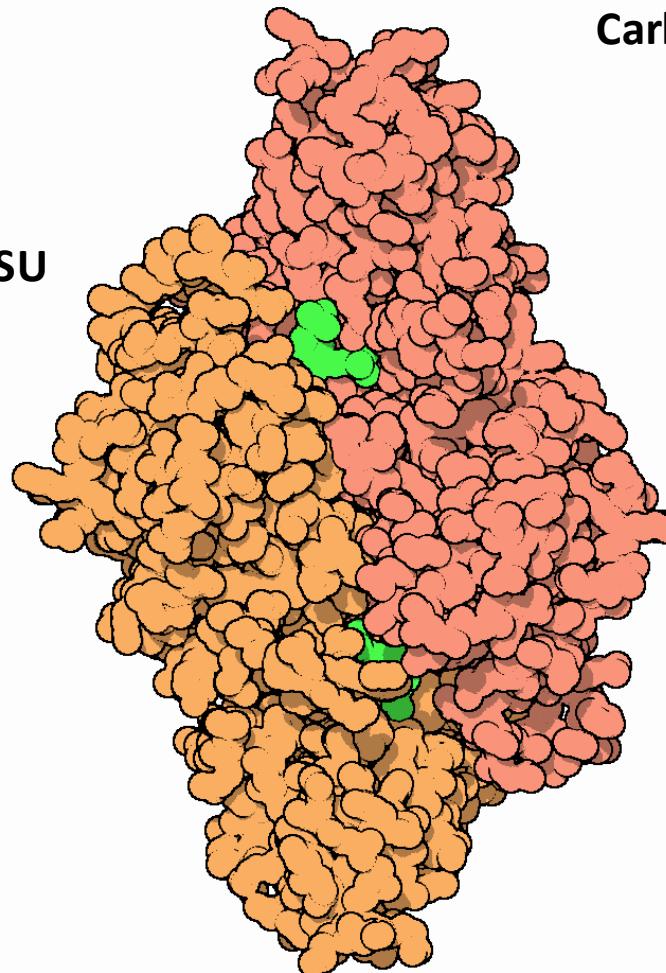
Bar-on et Milo, 2019, *PNAS*

Photosynthèse : Cycle de Calvin-Benson : Rubisco : Carboxylase

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



LSU



Ribulose-1,5-Bisphosphate
Carboxylase / Oxygénase

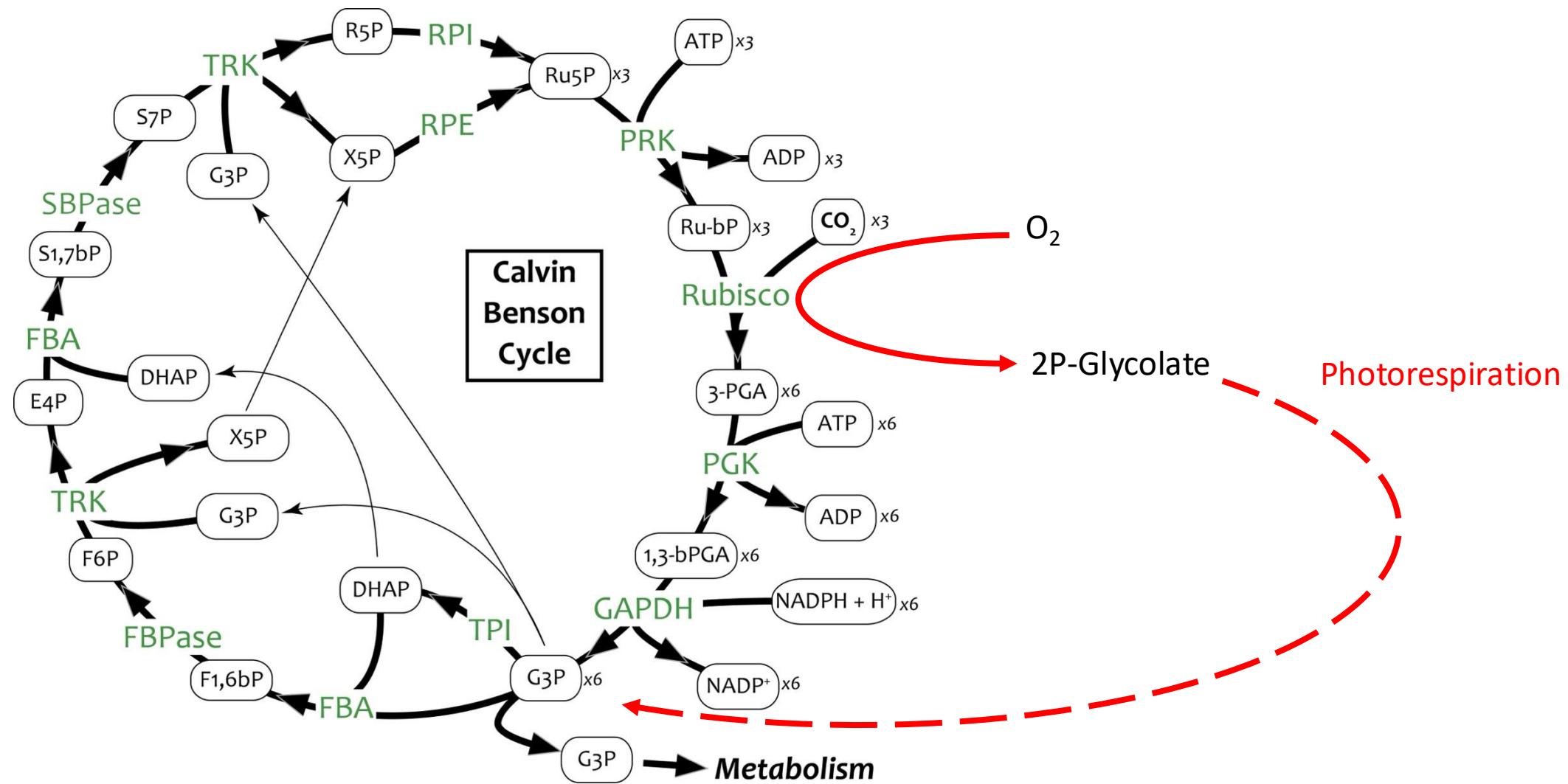
Forme I : L₈S₈
8 grandes sous-unités (LSU)
8 petites sous-unités (SSU)

Dimère LSU₂ contient
les sites catalytiques.

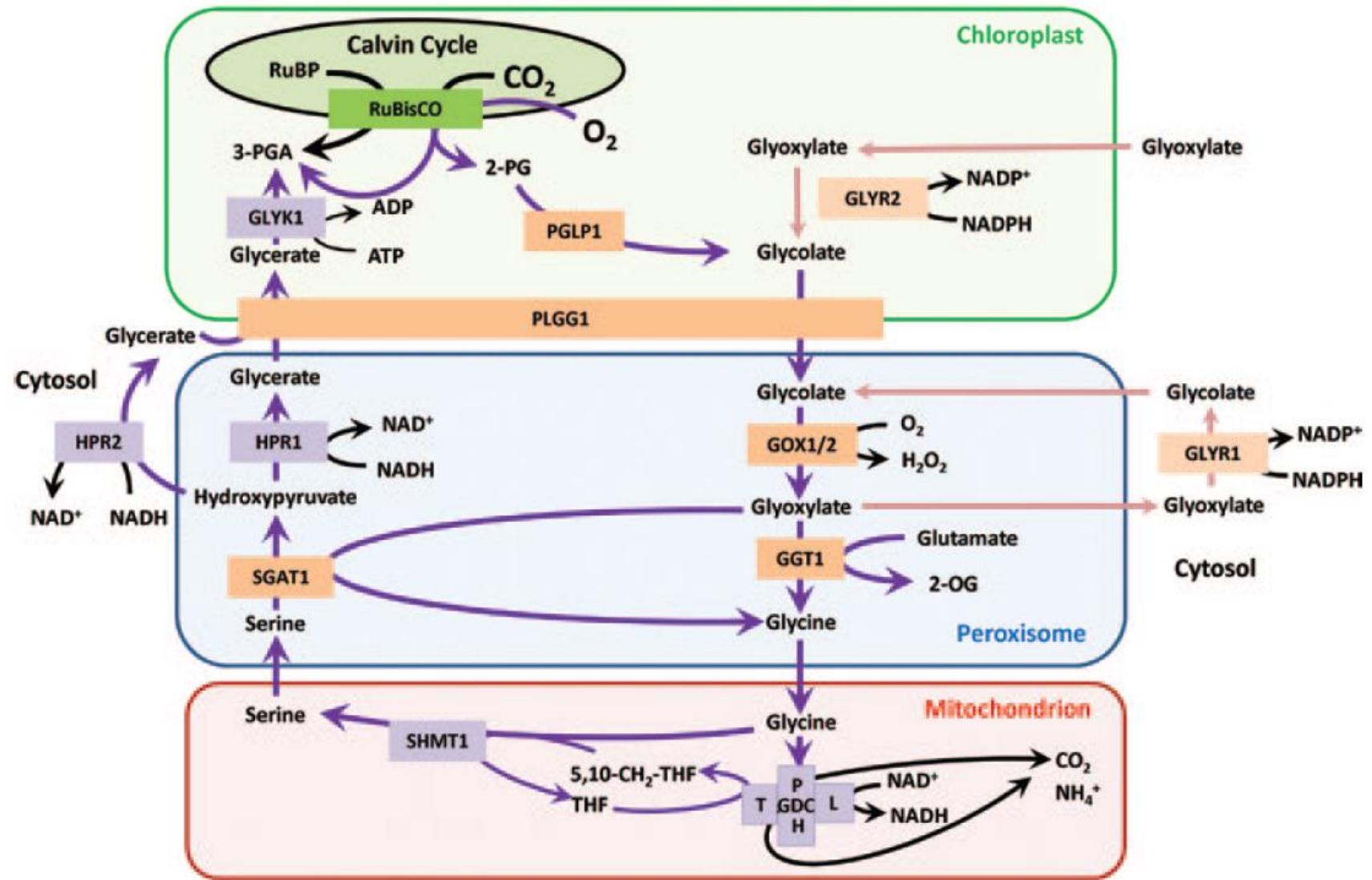
Différencie mal
CO₂ Vs O₂

Photosynthèse : Cycle de Calvin-Benson : Rubisco : Oxygénase

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



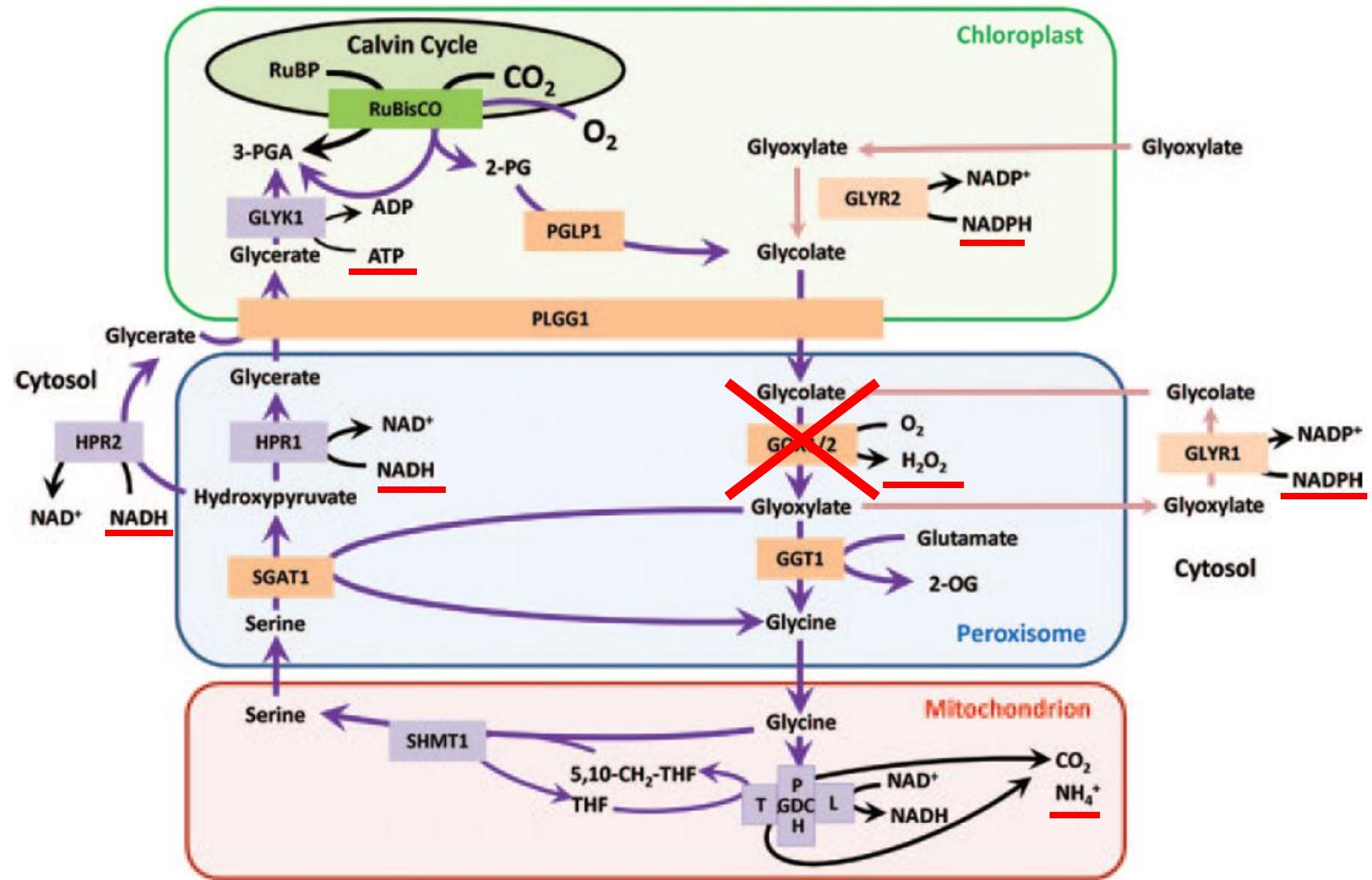
Photosynthèse : Photorespiration



Photorespiration :

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

Photosynthèse : Photorespiration



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 !

Photosynthèse : Photorespiration

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

Col-0



amiRgox1/2

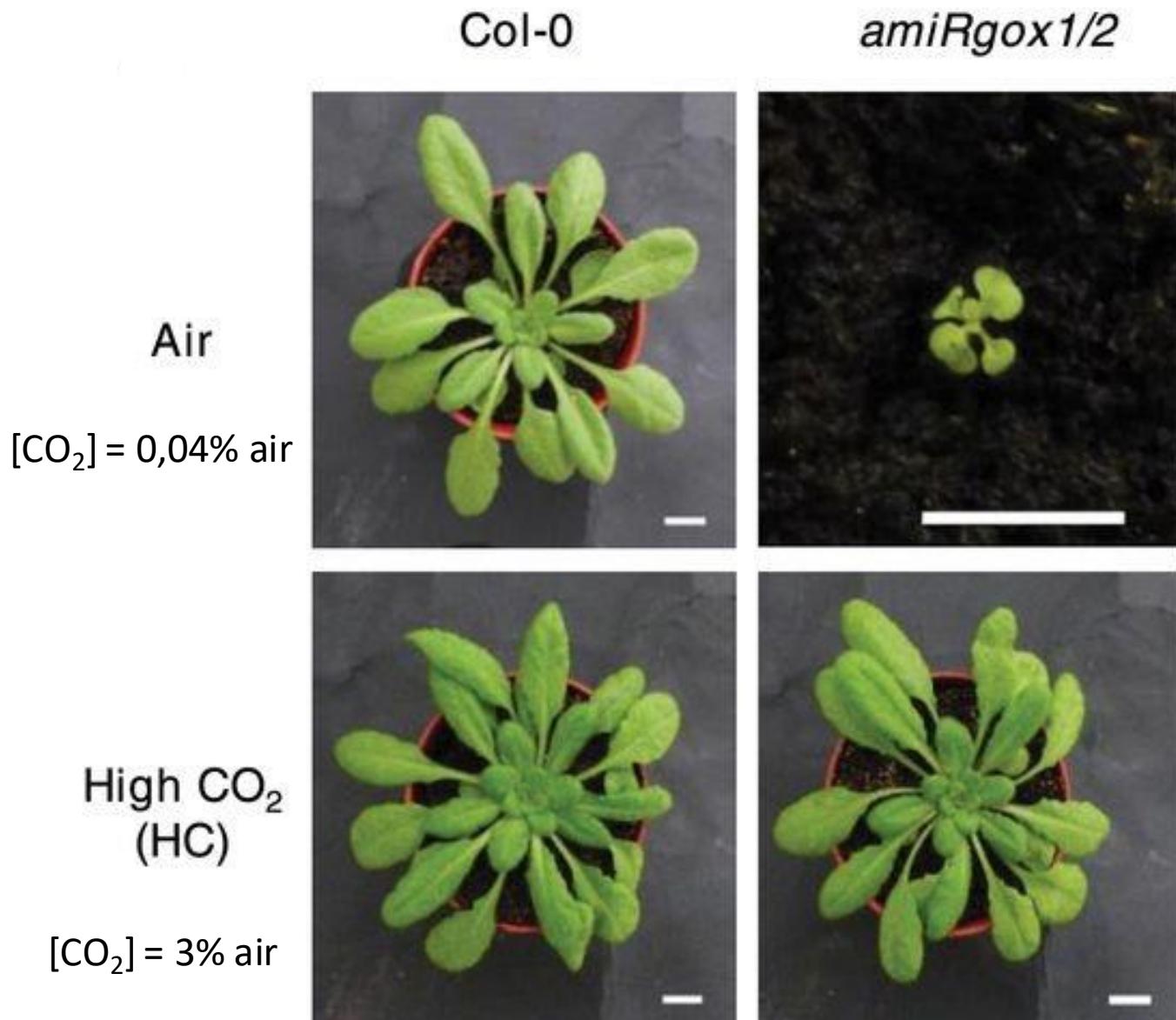


Photorespiration :

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

Coût pour la cellule.
Augmente avec la T° !

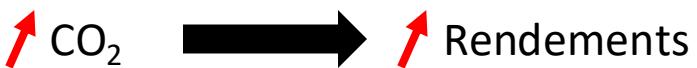
Photosynthèse : Photorespiration



Photorespiration :

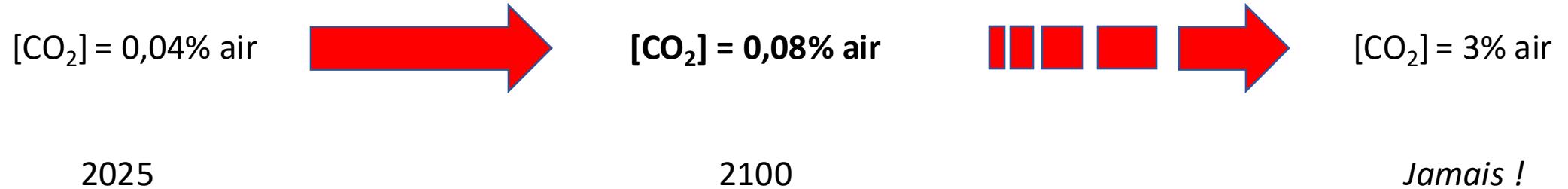
- Consomme de l'énergie
- Relargue du CO₂
- Relargue de l'azote
- Génère des ROS

Coût pour la cellule.
Augmente avec la T° !

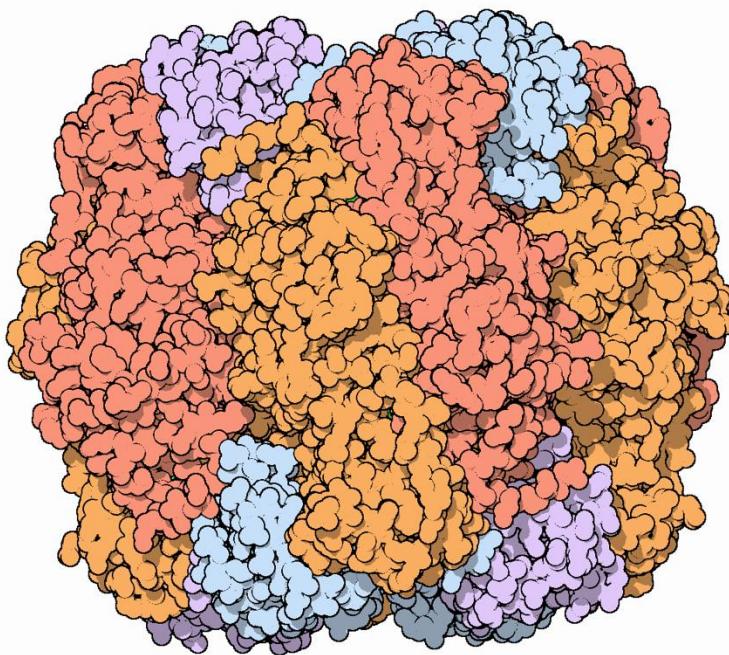


Photosynthèse et CO₂ de l'anthropocène

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



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



Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase / Oxygénase

Paramètres catalytiques :

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

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

Jusqu'à 50% des protéines solubles

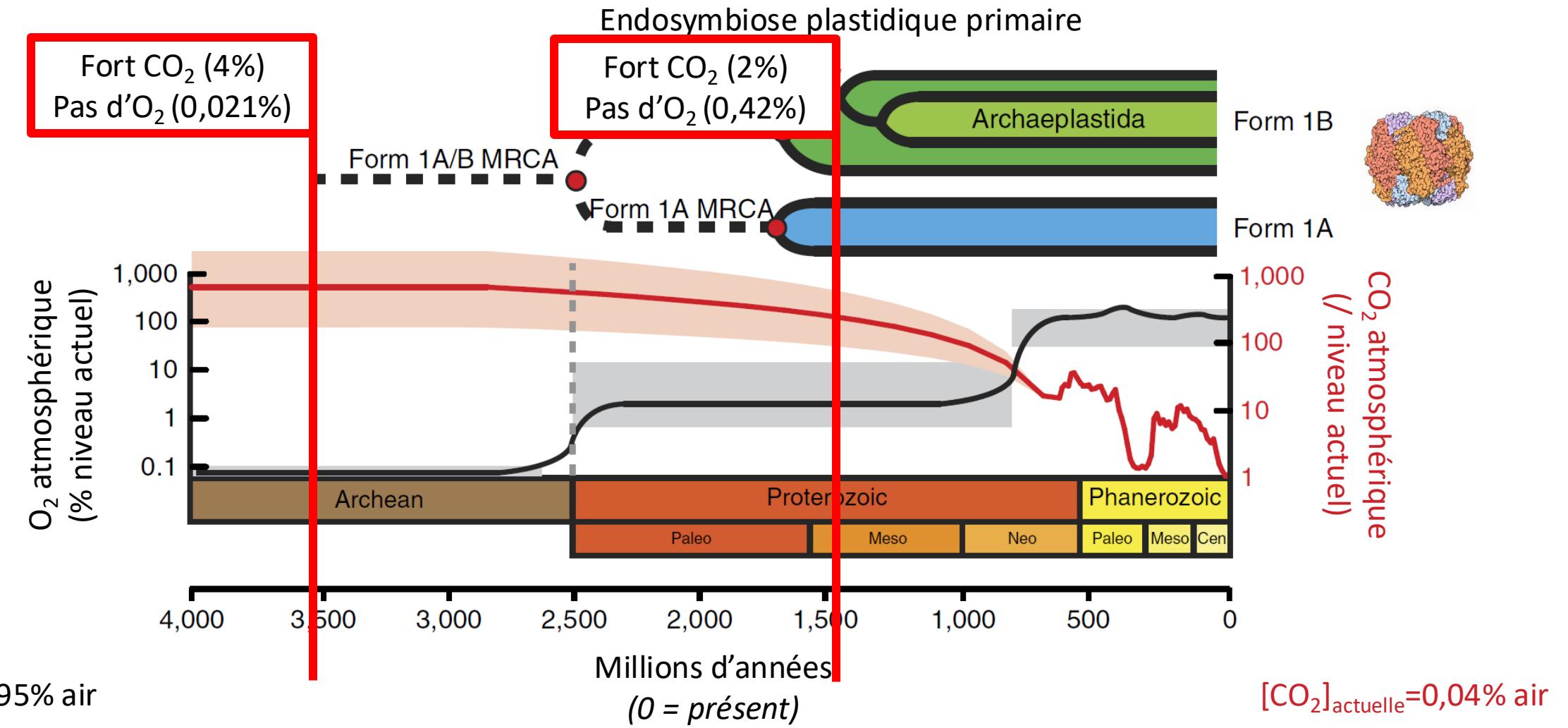
Différencie mal CO₂ Vs O₂
→ Photorespiration

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



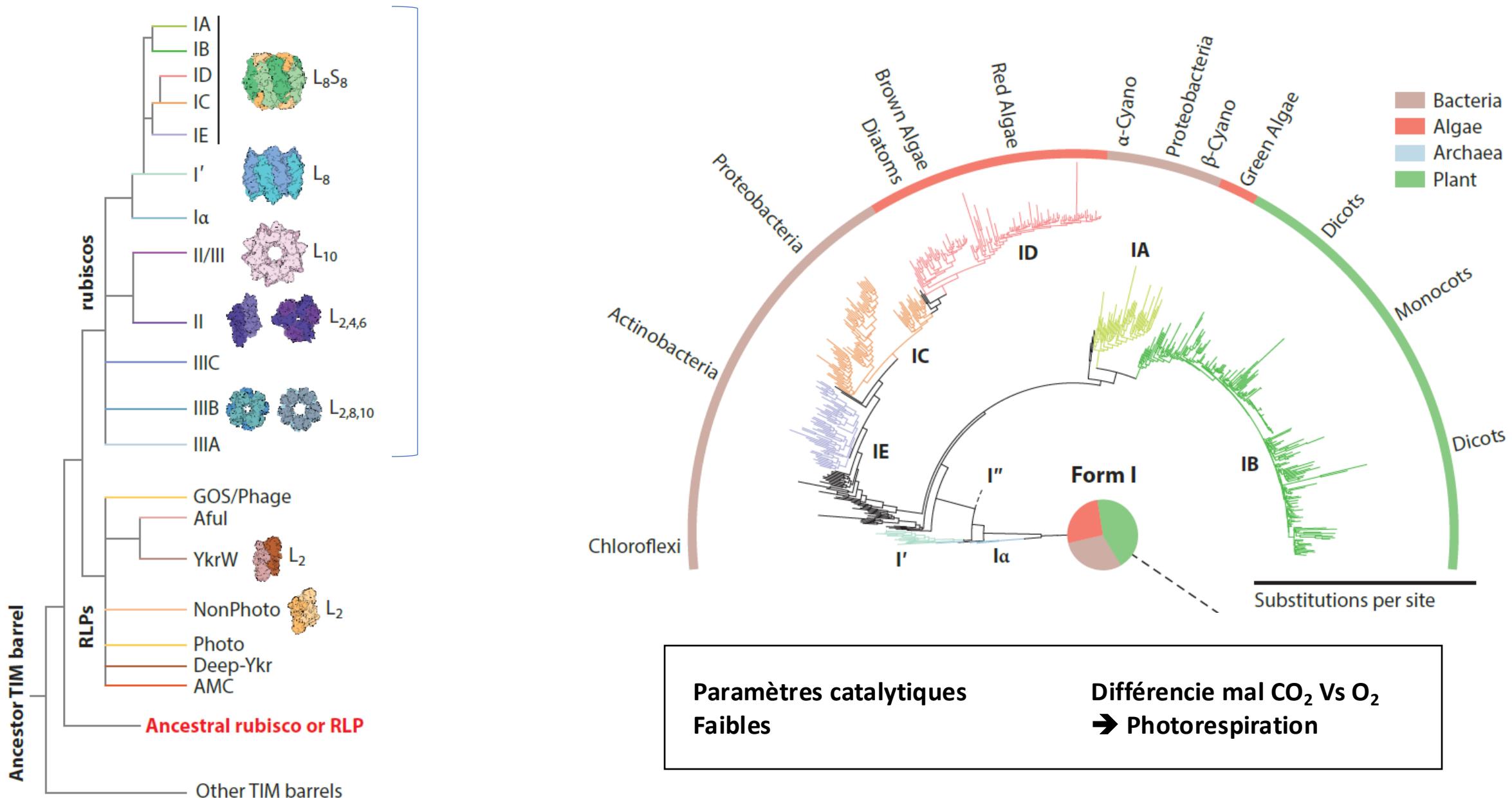
L'évolution sélectionne toujours la meilleure solution disponible au moment donné et donc dans les conditions données.

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

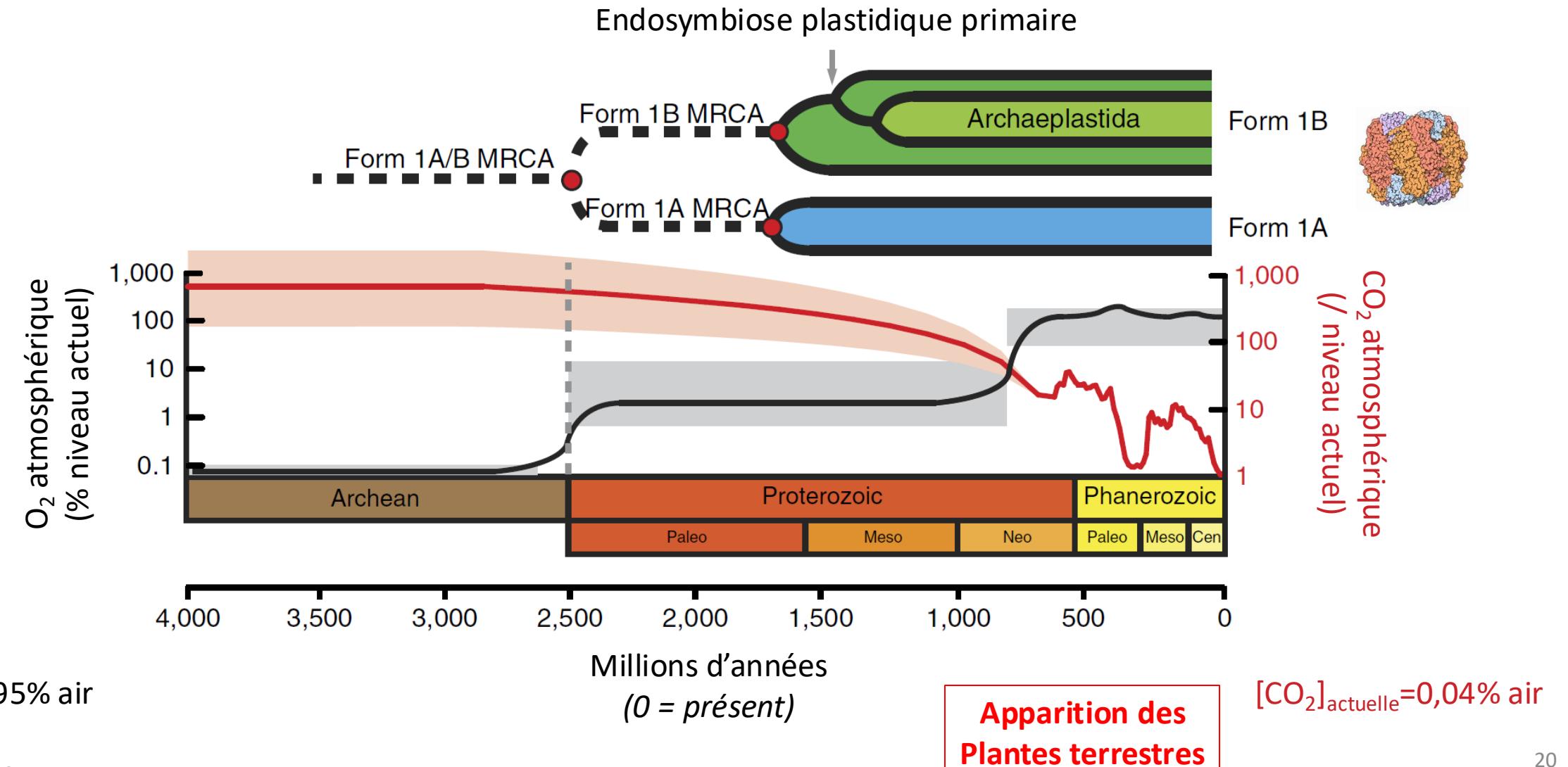


Evolution de la Rubisco : Diversité

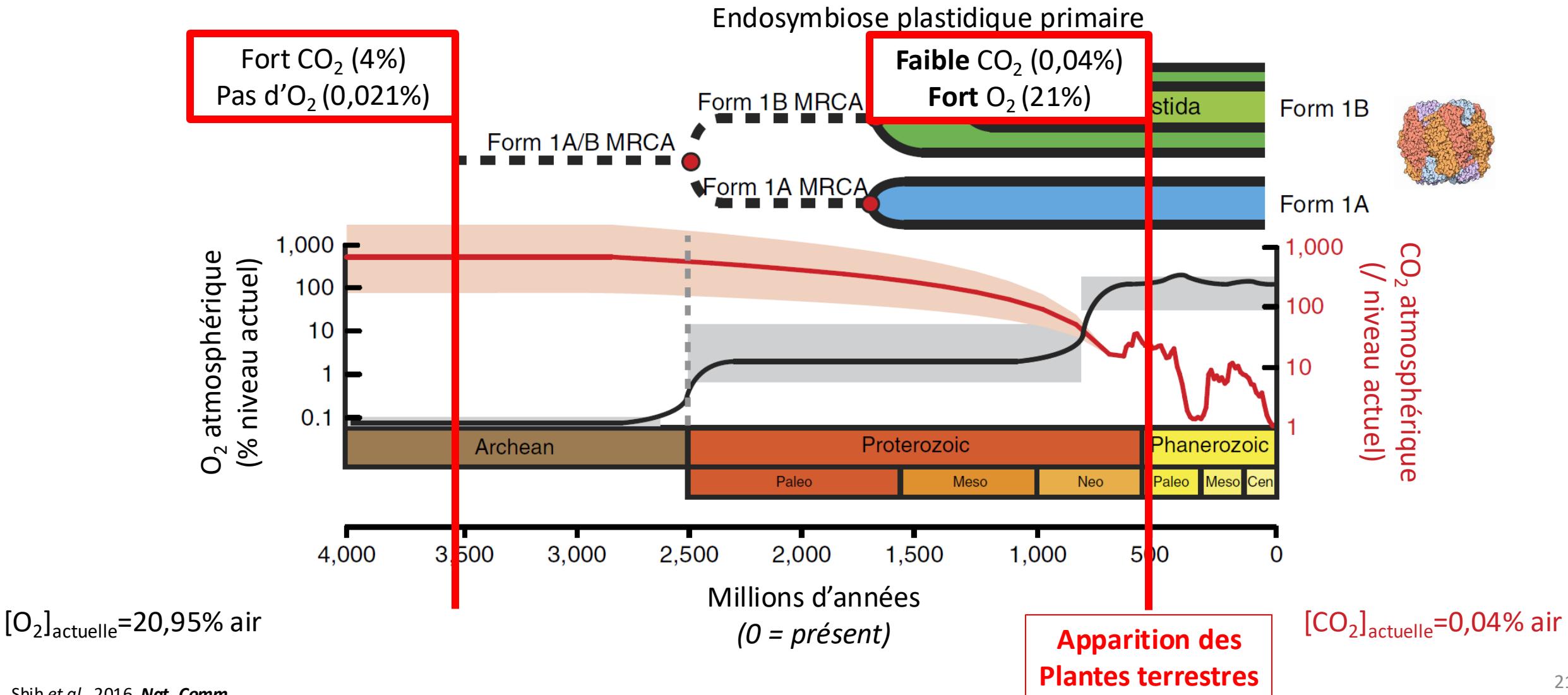
Evolution de la Rubisco pour l'assimilation du CO₂ par les plantes, 30/9/2025



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



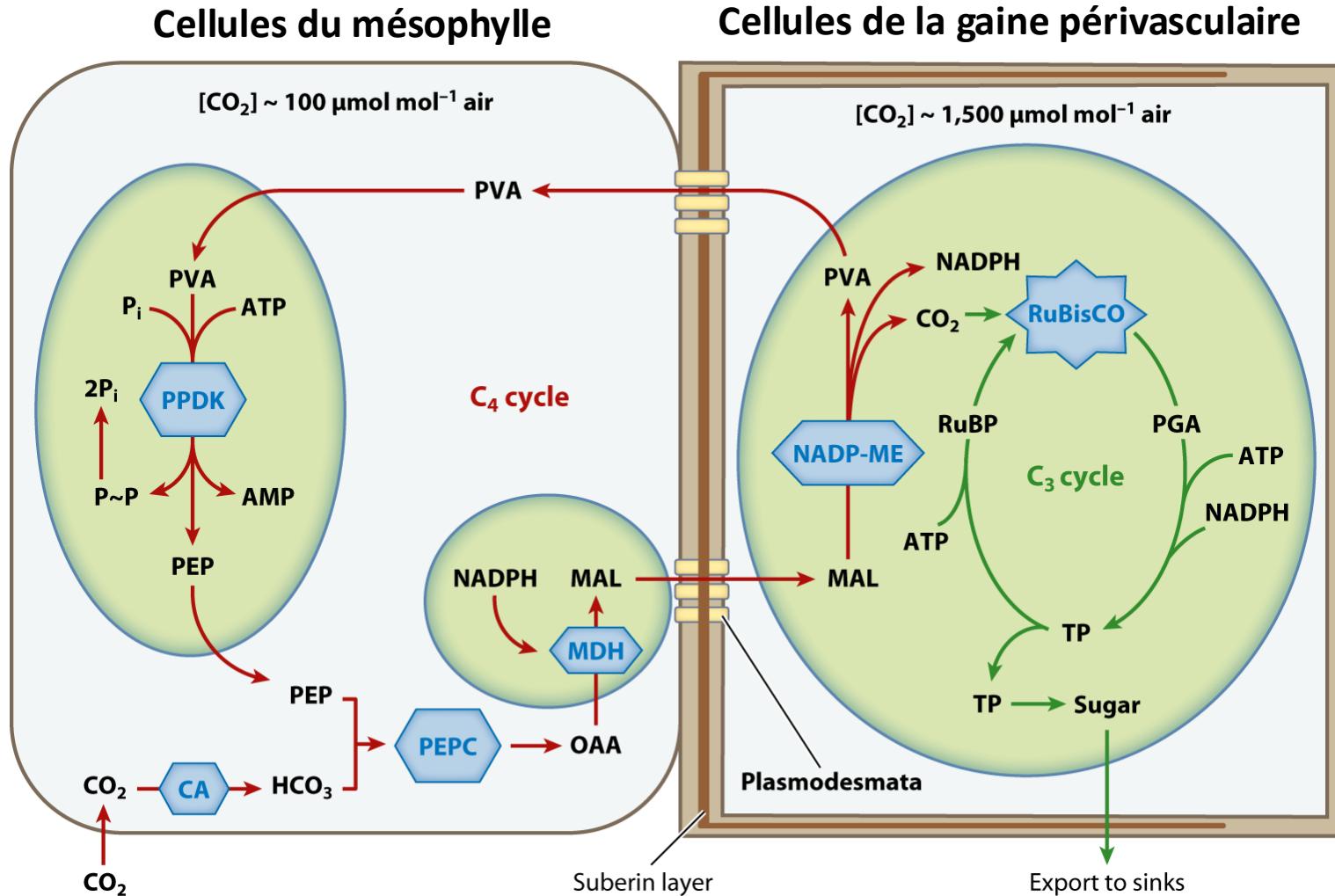
L'évolution a-t-elle sélectionné une enzyme aussi peu efficace ?



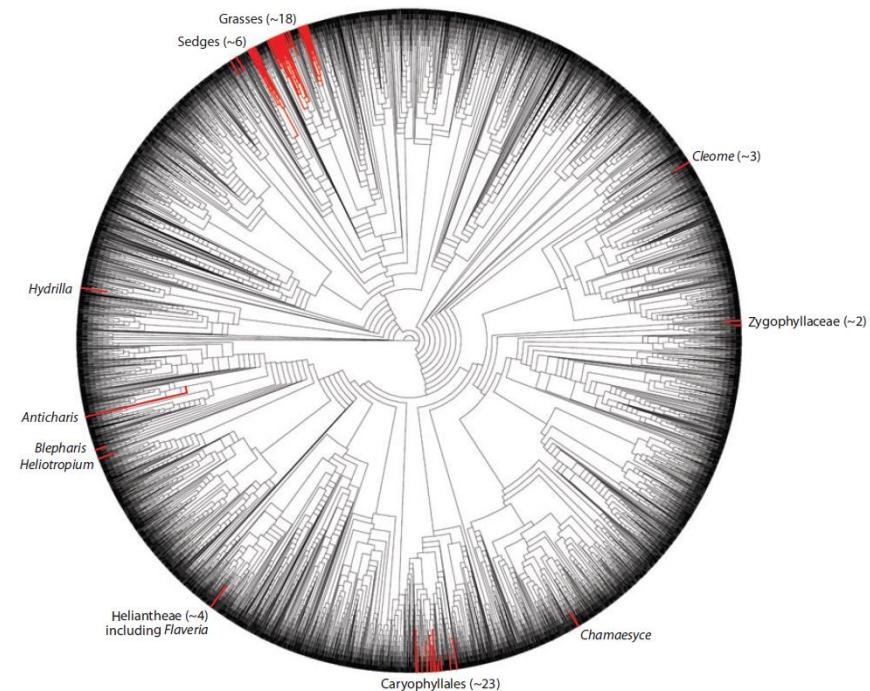
Photosynthèse : Solution évolutive au « problème Rubisco » : séparation physique

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

Photosynthèse en C₄ : 2 types cellulaires



Une solution très favorable...

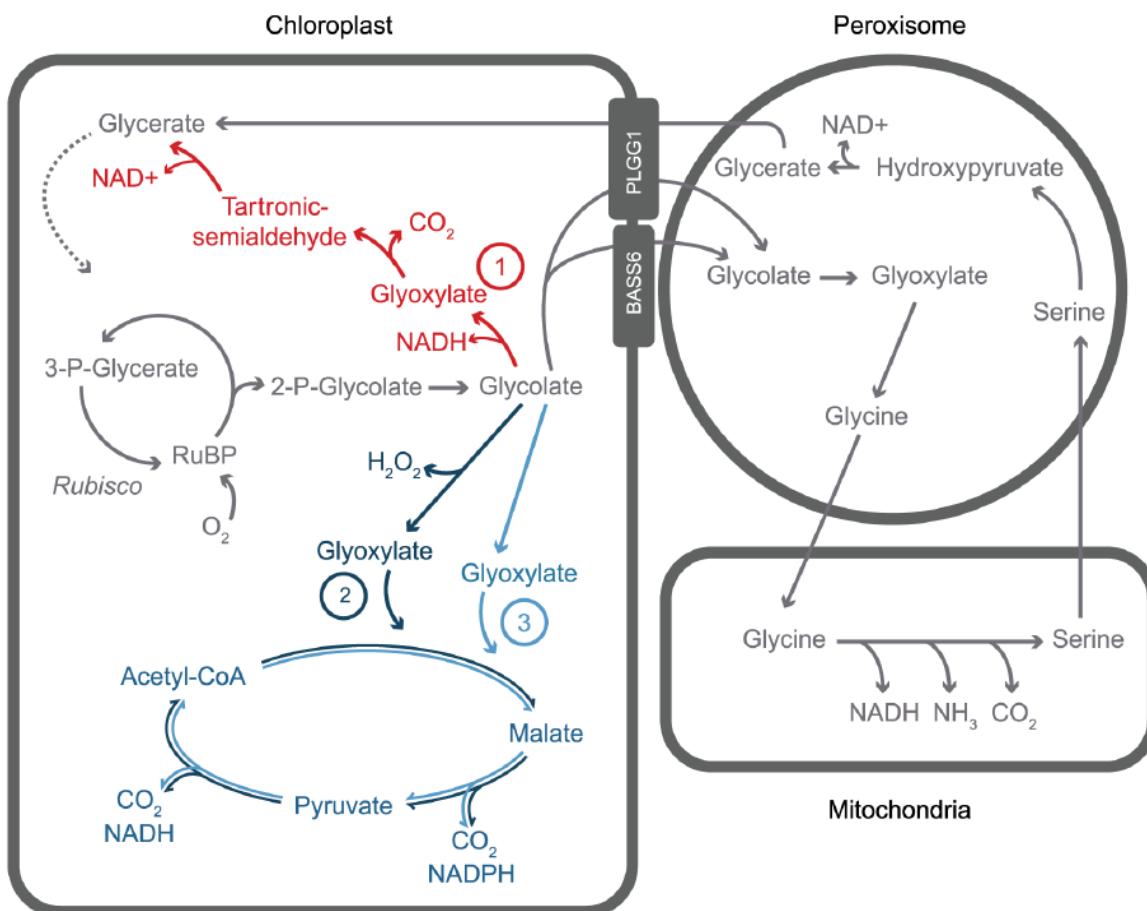


...apparue indépendamment
plus de 60 fois !

Photosynthèse : Solution synthétique au « problème Rubisco »

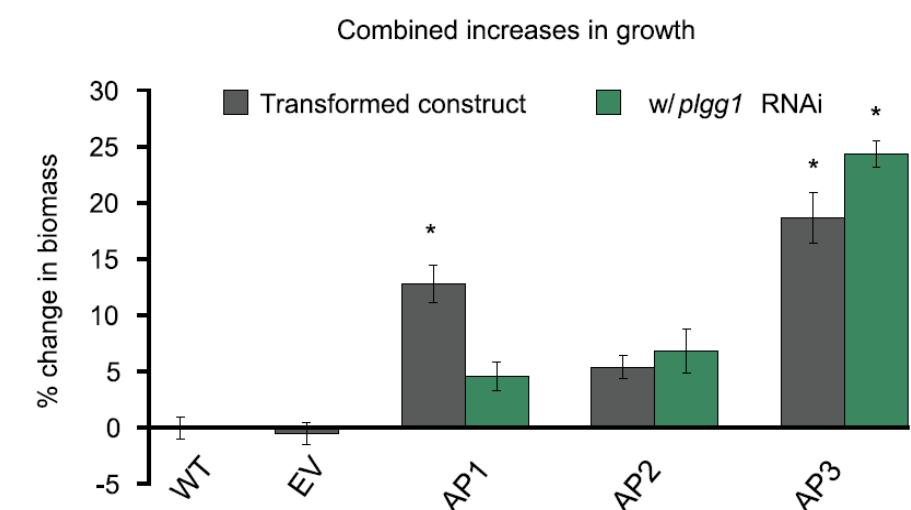
Evolution de la Rubisco pour l'assimilation du CO₂ par les plantes, 30/9/2025

Eliminer la photorespiration en la court-circuitant.



Gain de productivité de biomasse de 25%

Tabac (plante C₃) en serre

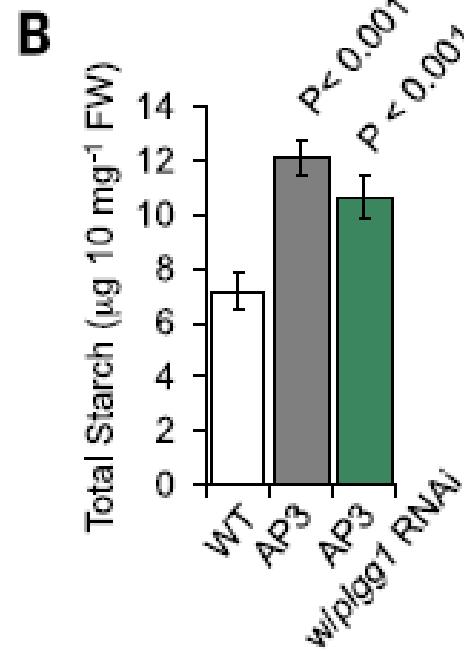
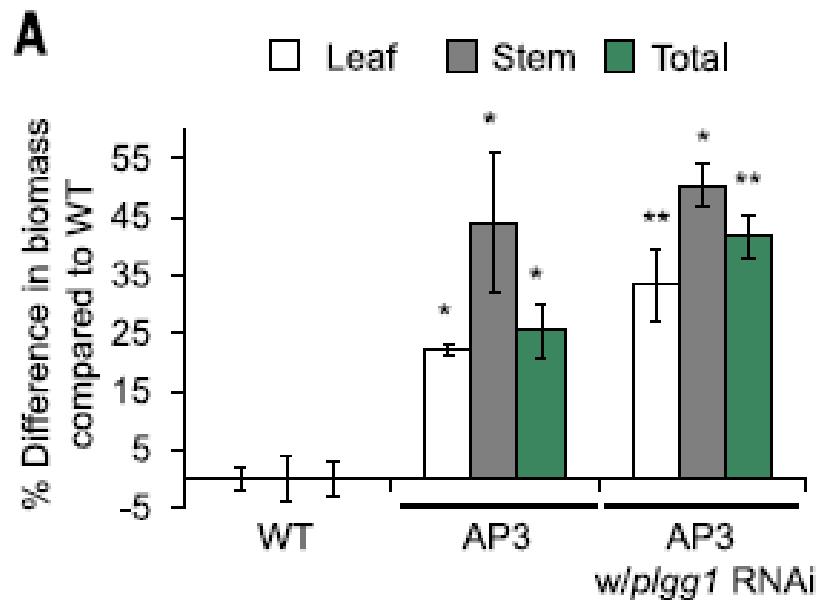


Photosynthèse : Solution synthétique au « problème Rubisco »

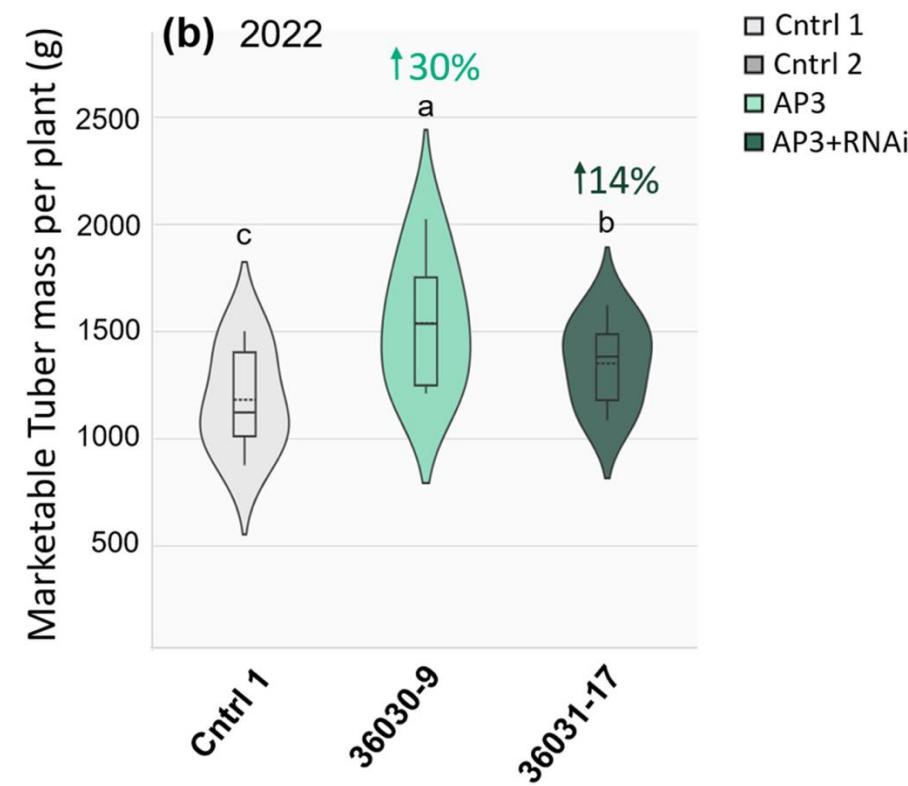
Evolution de la Rubisco pour l'assimilation du CO₂ par les plantes, 30/9/2025

Eliminer la photorespiration en la court-circuitant.

Tabac (plante C₃) en champs



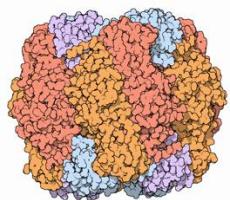
Pomme de Terre (plante C₃) en champs



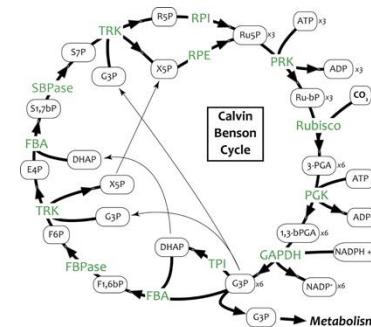
Conclusion

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

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

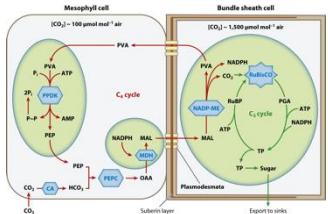


Le Cycle de Calvin-Benson est limité par sa carboxylase, la Rubisco

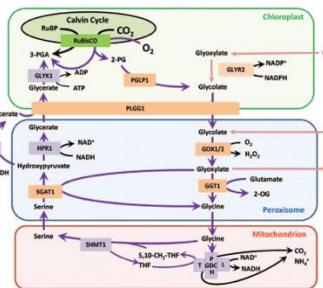


La Rubisco est peu efficace et ne différencie pas le CO₂ de l'O₂.

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

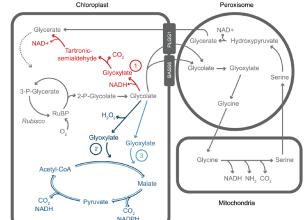


La Photorespiration a un coût pour la plante et des solutions évolutives à cela, dont la photosynthèse en C4, ont été sélectionnées.



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.



Remerciements



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

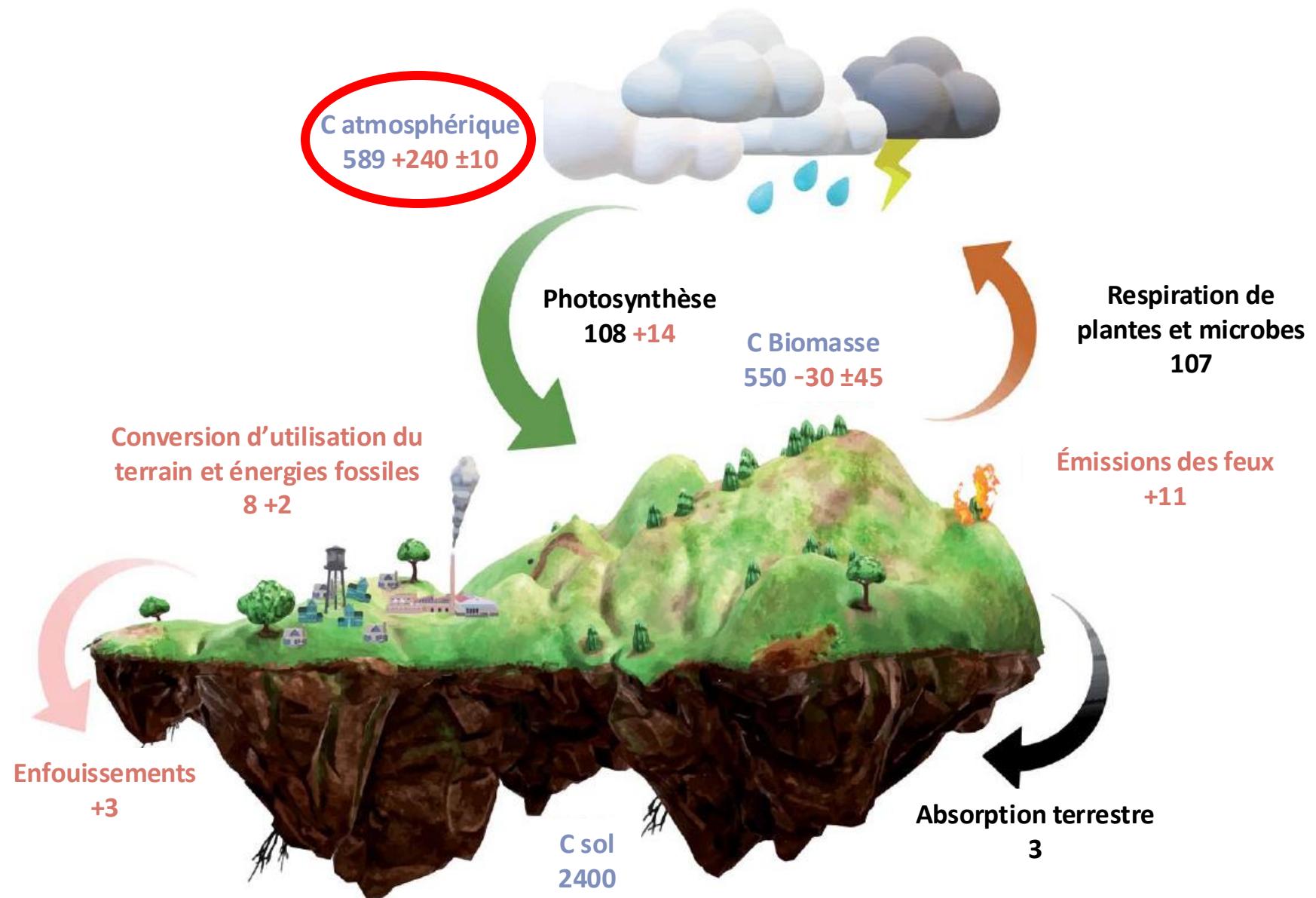
Marta Bertolini
Tanguy Chotel
Bruno Da Silva-Teixeira
Lou Lambert
Mariette Gibier
Laura Morette
Costanza Quel Piñol
Cyril Déjoué
Isabelle Krempholtz

Diapositives supplémentaires

Cycle du carbone

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

En Petagrammes de CO₂
(milliards de tonnes)



Cycle du carbone : les producteurs primaires de C organique



Carbon Cycle



Plantes terrestres

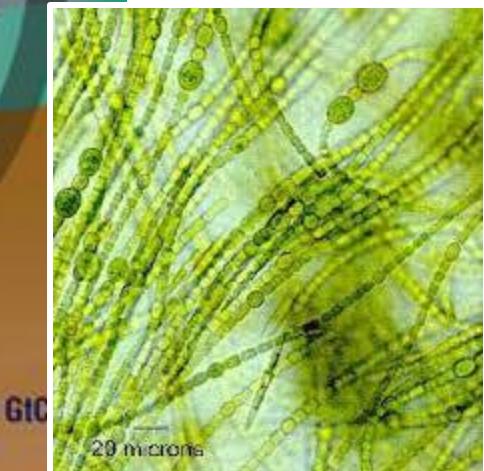
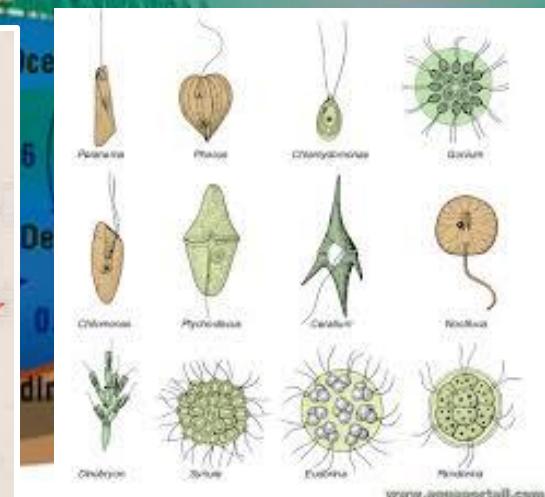
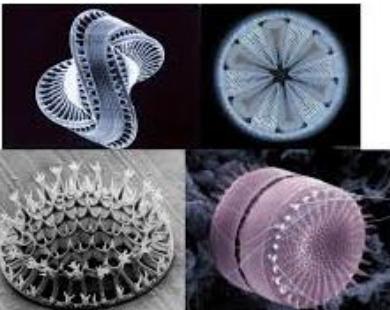
Plantes de culture

Algues:

- Diatomées
- Algues vertes
- Algues rouges
- Dinoflagellées

...

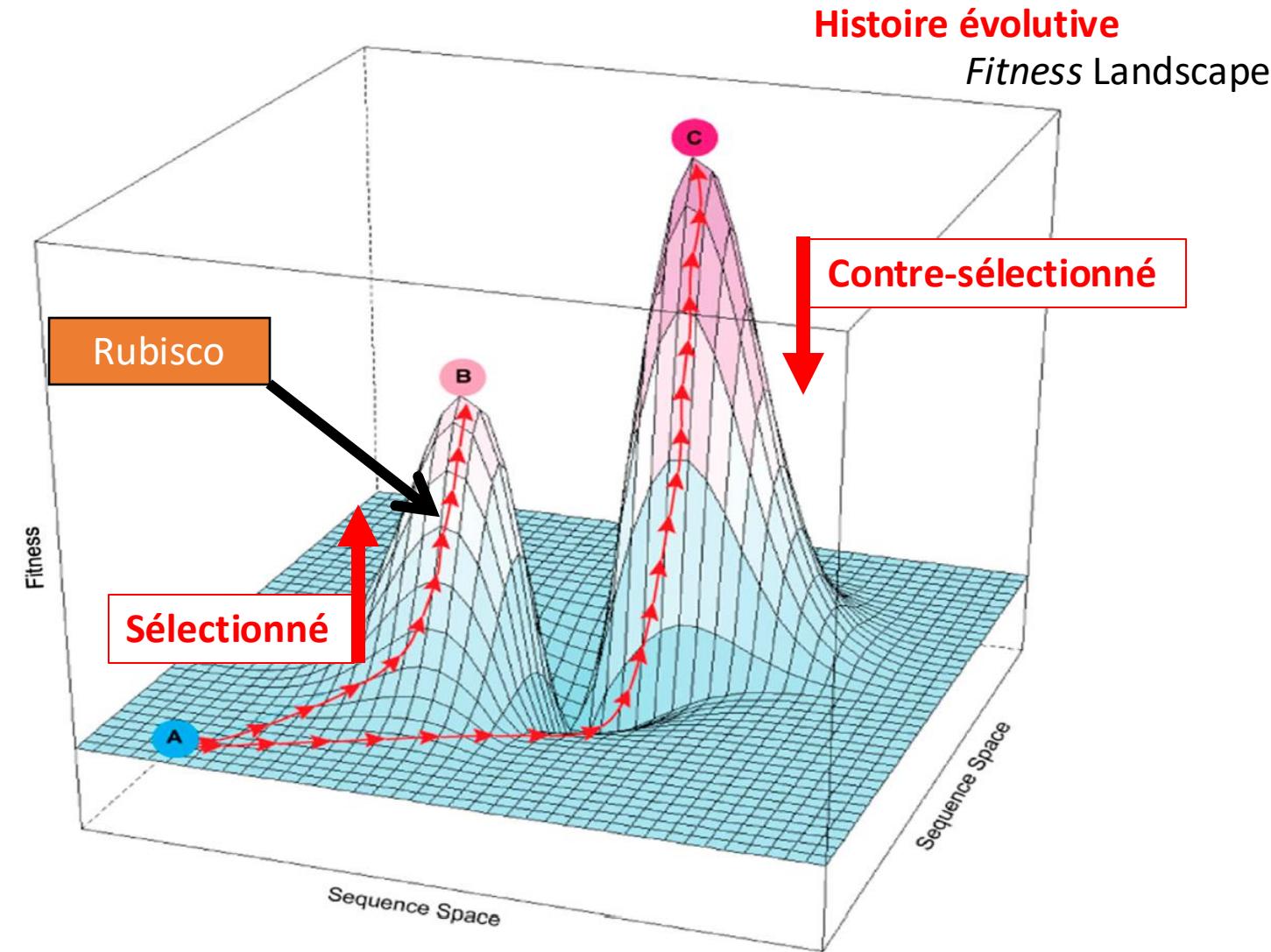
Cyanobactéries

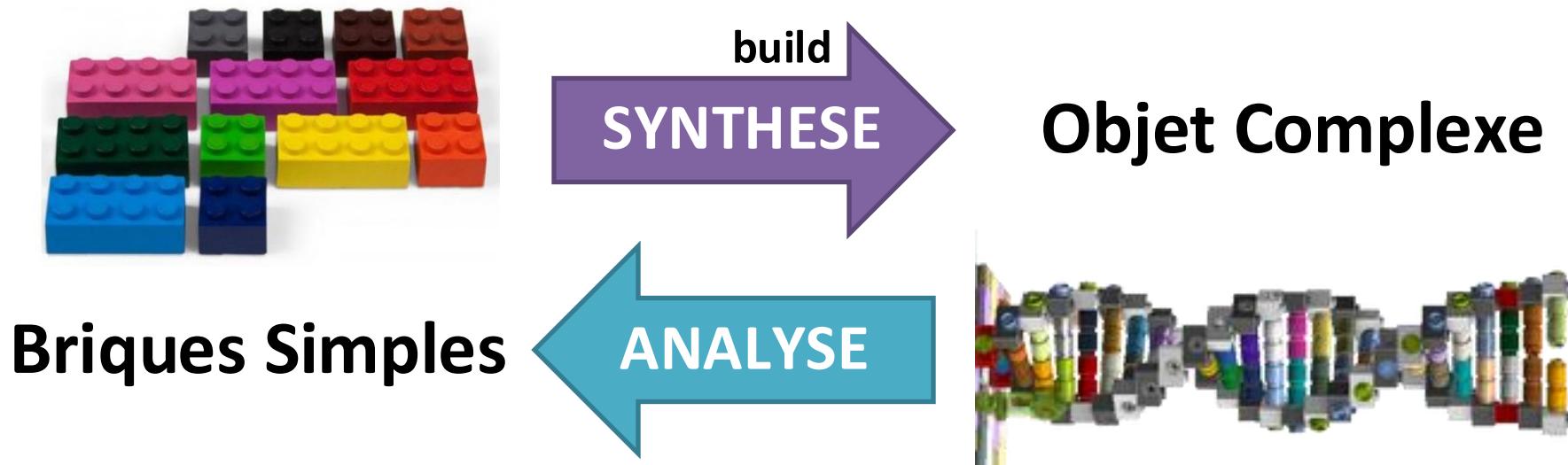


Pourquoi l'évolution a-t-elle *conservée* une enzyme aussi peu efficace ?

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 **differentes** de celles actuelles !





La Synthèse est une méthode puissante de recherche.

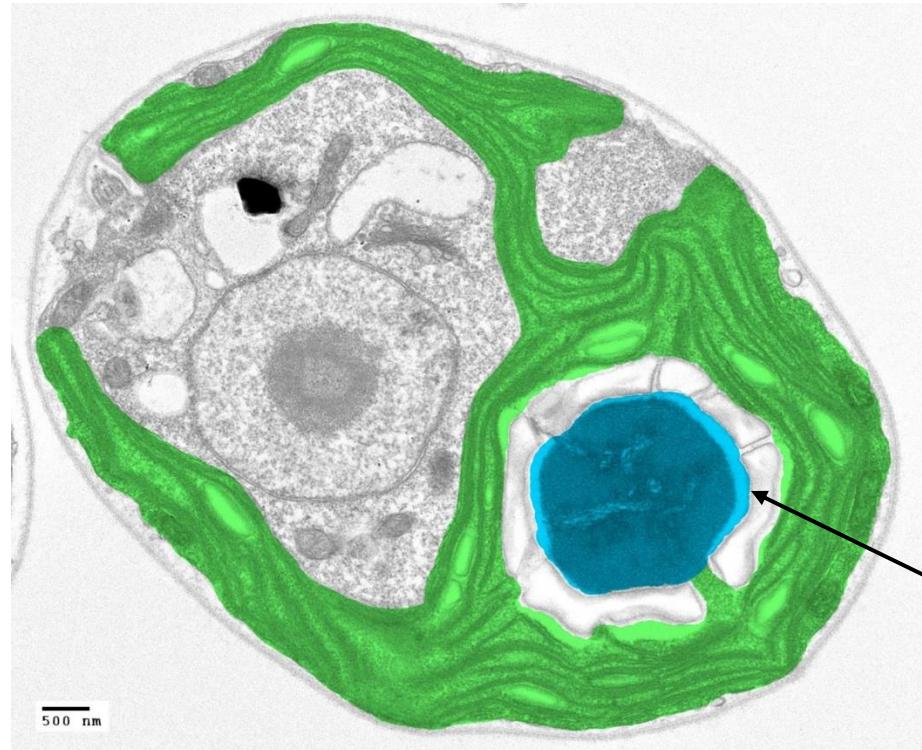
Synthèse et Analyse sont complémentaires

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

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

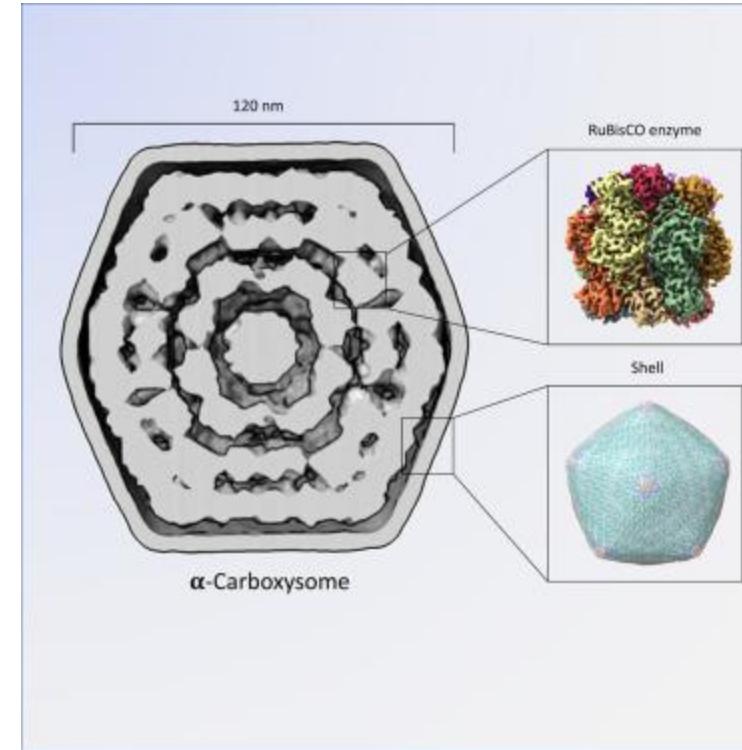
Mécanisme de concentration du carbone : 2 compartiments cellulaires

Pyrénoïde (« Algues »)

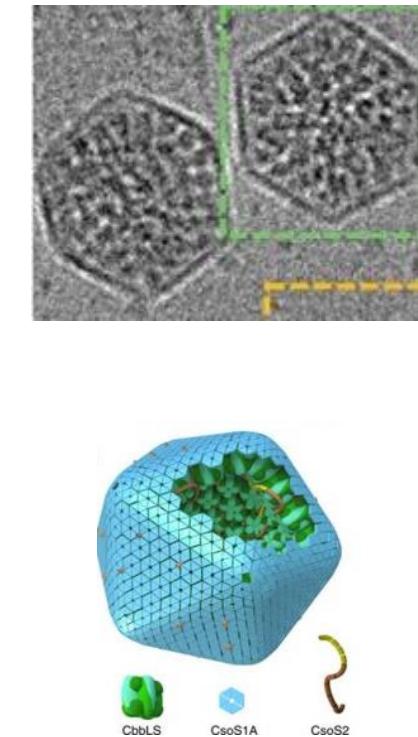


Sous compartiment cellulaire
(gaine d'amidon)

Carboxysome (Cyanobactéries)



Sous compartiment cellulaire
(structure protéique)



Photosynthèse : Solution synthétiques au « problème Rubisco »

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

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

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

