



# Comment améliorer la photosynthèse à l'aide des biotechnologies

**Michael HODGES**

Institute des Sciences des Plantes Paris-Saclay



CNRS/INRAe UMR9213/1403

Université de Paris-Saclay, ORSAY, France

# Pourquoi essayer d'améliorer la photosynthèse ?

## 4 facteurs impactant le rendement des plantes :

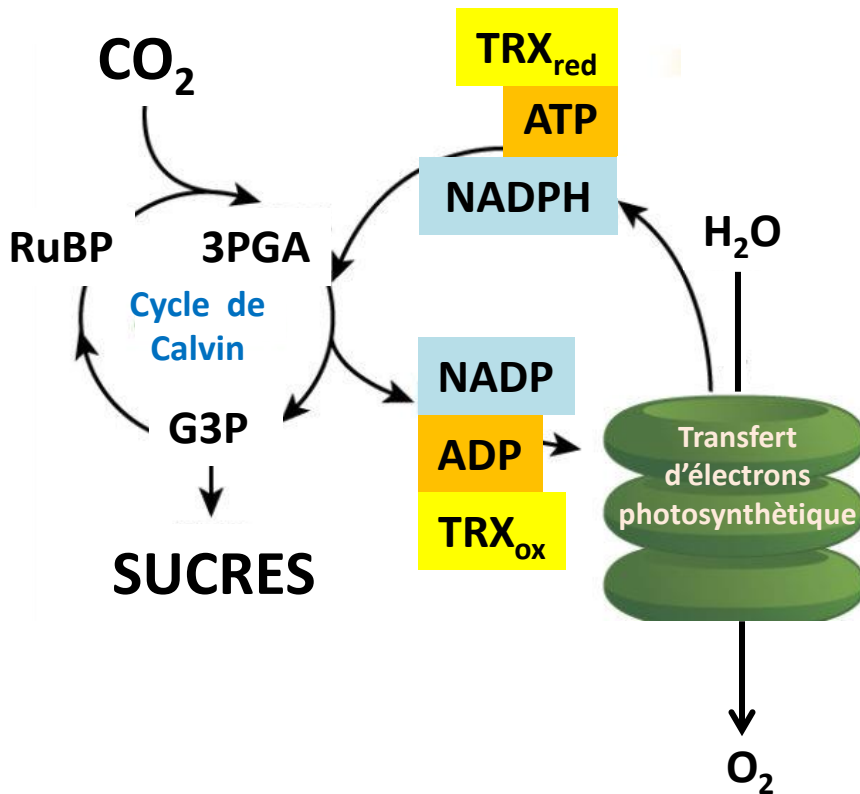
1. L'énergie solaire totale qui atterrit sur une culture au cours de sa vie
2. L'efficacité de la capture de la lumière
3. L'efficacité de sa conversion en biomasse
4. La proportion de biomasse répartie dans les organes récoltés

La conversion de la lumière en biomasse n'a pas encore atteint sa limite biologique

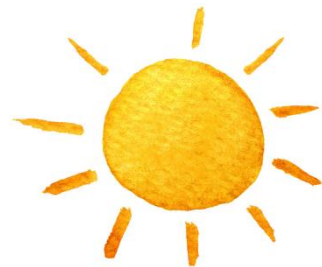
Celle-ci dépend principalement de **la photosynthèse**

# C'est quoi la photosynthèse ?

Côté obscur



Côté lumière



# Qui essaie d'améliorer la photosynthèse ?



**RIPE** = Realizing increased photosynthetic efficiency : <https://ripe.illinois.edu/> @RIPEproject

**C4RICE PROJECT** = Make rice a C4 plant : <https://c4rice.com/> @C4RiceProject



**CAPITALISE** = Combining approaches for photosynthetic improvement to allow increased sustainability in European agriculture : <https://www.capitalise.eu/>  
@photosynth\_2030



P&E  
BIAM  
CADARACHE

**PHOTOBOOST** = A holistic approach to improve the photosynthetic performance and productivity of C3 crops under diverse environmental conditions :  
<http://www.photoboost.org/> @PhotoBoost3

**GAIN4CROPS** = Rewiring photorespiration using natural and synthetic pathways to sustainably increase crop yield : <http://gain4crops.eu/> @gain4crops

L-P&M  
LPCV  
GRENOBLE

# Donc, quels sont les cibles?



## Côté lumière

- Photoprotection
- Transferts d'électrons photosynthétiques
- Smart canopies



## Côté obscure

- Uptake & diffusion du CO<sub>2</sub>
- Rubisco
- Régénération du RuBP
- Photorespiration
- CCMs

# Bref, quelles sont les biotechnologies & les plantes?

## *Biotechnologies - Approaches*

- **Transgénèse** = sur-expression
- **Biologie synthétique** = technologies pour des clonages multiples / introduire des voies métaboliques nouvelles



OGM



- **Variabilité génétique**
- **Techniques de phénotypage** = à haut-débit / aux champs
- **Modélisation *in silico***
- **Mutagénèse** = modifier l'activité d'une protéine / améliorer l'activité d'une enzyme

## *Plantes*

### *Modèles*

Arabidopsis

Tabac

« **Cultivées** »

Pomme de terre

Riz

Caméline

Concombre

Soja

Tomate

Tournesol

Maïs

Manioc (Cassava)

Niébé (Cowpea)

Orge



# Bref, quelles sont les biotechnologies & les plantes?

## *Biotechnologies - Approaches*

- **Transgénèse** = sur-expression
- **Biologie synthétique** = technologies pour des clonages multiples / introduire des voies métaboliques nouvelles



OGM



- **Variabilité génétique**
- **Techniques de phénotypage** = à haut-débit / aux champs
- **Modélisation *in silico***
- **Mutagénèse** = modifier l'activité d'une protéine / améliorer l'activité d'une enzyme

## *Plantes*

### *Modèles*

Arabidopsis  
Tabac



### « *Cultivées* »

Pomme de terre

Riz

Caméline

Concombre

Soja

Tomate

Tournesol

Maïs

Manioc (Cassava)

Niébé (Cowpea)

Orge



# Alors, de quoi je vais parler?

- **Régénération du RuBP** = sur-expression d'enzymes du cycle de Calvin
- **Photorespiration** = expression de voies du catabolisme du glycolate dans le chloroplaste (bypass photorespiratoire)
- **Photoprotection** = sur-expression des enzymes impliquées dans la dissipation en chaleur de l'excès d'énergie absorbée par les chlorophylles (qNP  $\longrightarrow$  qE/qZ)

1. Introduction du processus cible
2. Les espèces végétales
3. La(les) biotechnologie(s)
4. Quelques exemples

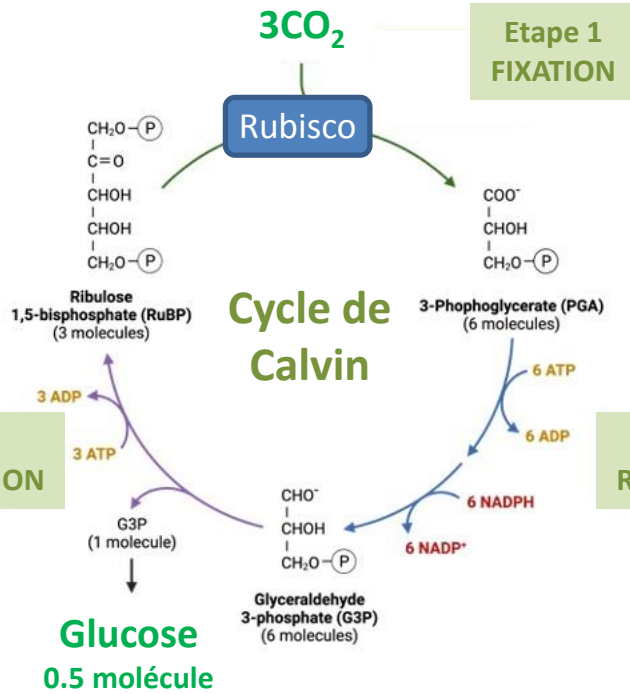


# Alors, de quoi je vais parler?

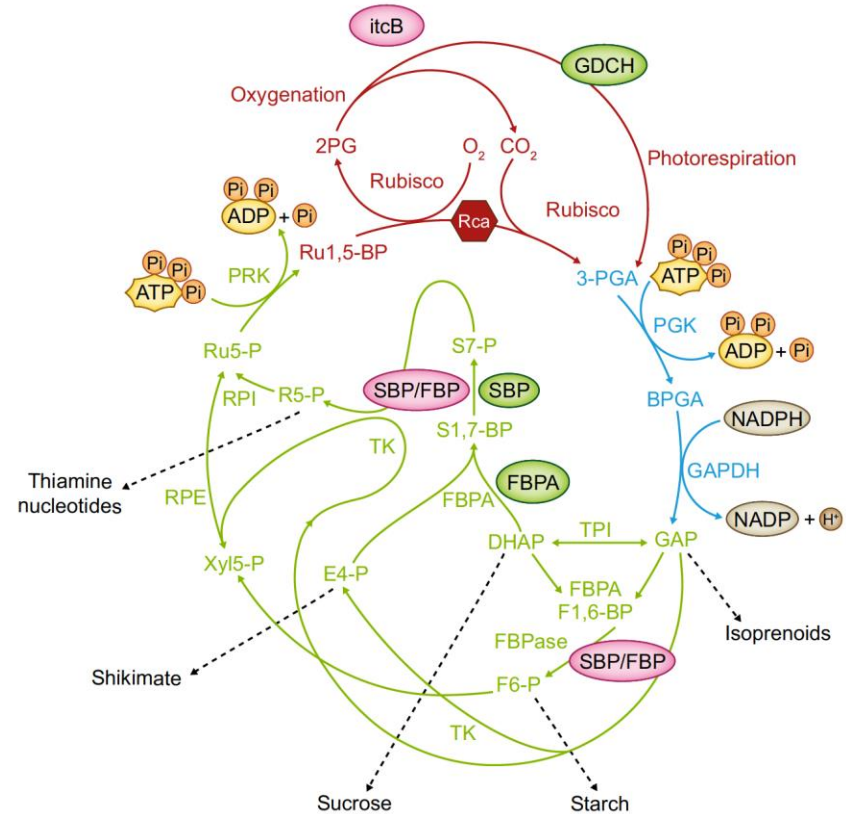
- **Régénération du RuBP** = sur-expression d'enzymes du cycle de Calvin
- **Photorespiration** = expression de voies du catabolisme du glycolate dans le chloroplaste (bypass photorespiratoire)
- **Photoprotection** = sur-expression des enzymes impliquées dans la dissipation en chaleur de l'excès d'énergie absorbée par les chlorophylles (qNP  $\longrightarrow$  qE/qZ)

1. Introduction du processus cible
2. Les espèces végétales
3. La(les) biotechnologie(s)
4. Quelques exemples

# Régénération du RuBP



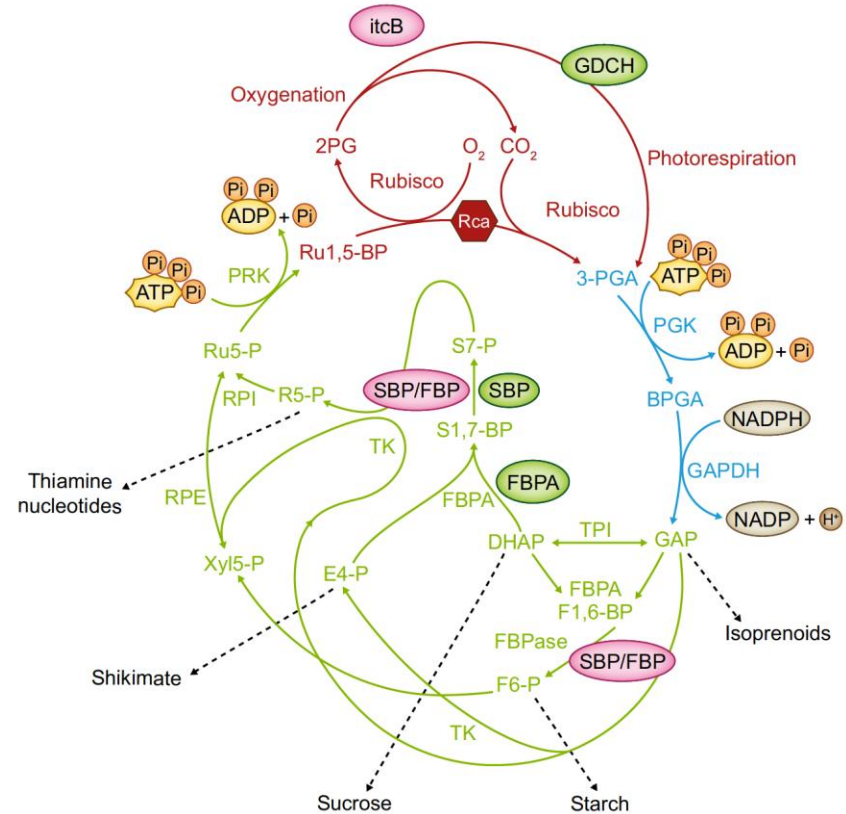
Created with Biorender



# Régénération du RuBP

## Cibles

- **SBP** = sédoheptulose-1,7-bisphosphatase
  - **SBP/FBP** = sédoheptulose-1,7-bisphosphatase/fructose-1,6-bisphosphatase bifonctionnelle cyanobactérienne
  - **FBPA** = fructose-1,6-bisphosphate aldolase
- 
- **itcB** = transporteur (putatif)
  - **GDCH** = glycine décarboxylase H-protéine
  - **Cytc<sub>6</sub>** = cytochrome c<sub>6</sub>



# Régénération du RuBP

## Sur-expression d'1 enzyme



- Clonage: « old school » avec enzymes de restriction
- ADNc d'origine cyanobactérienne ou végétale
- Optimisation des codons
- Addition d'une séquence « PT »
  - *PsrbcS SlrbcS NtrbcS*
- Utilisation de divers promoteurs / terminateurs
  - Promoteurs: *35SCamV Pcisv-flt36 RTVP rbcS2B*
  - Termineurs: *Nos 35S*
- Transformation par *Agrobacterium* avec 1 construit

# Régénération du RuBP

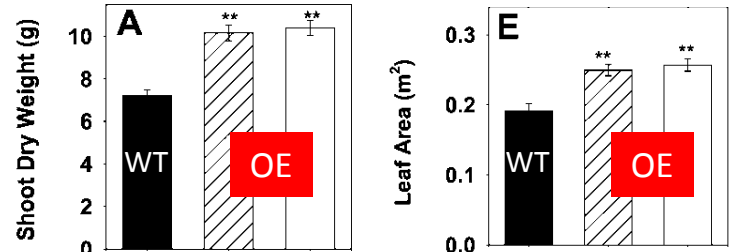
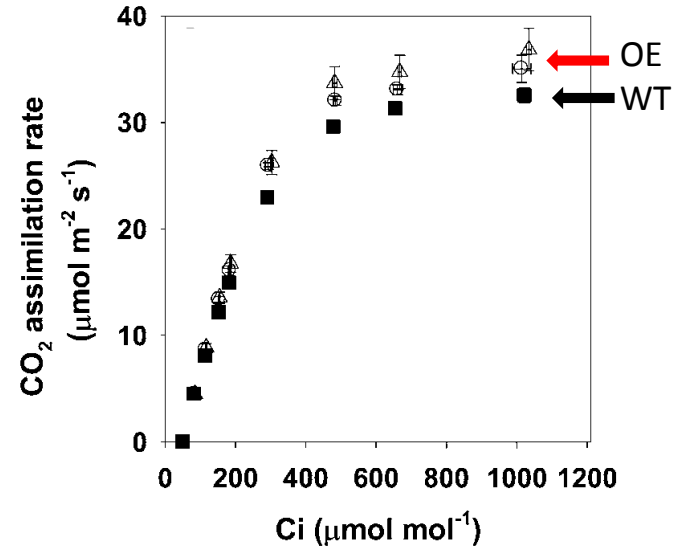
## Cible

- **SBP** = sédoheptulose-1,7-bisphosphatase



Increased Sedoheptulose-1,7-Bisphosphatase Activity in Transgenic Tobacco Plants **Stimulates Photosynthesis and Growth** from an Early Stage in Development<sup>1</sup>

Stephane Lefebvre, Tracy Lawson, Mike Fryer, Oksana V. Zakhleniuk, Julie C. Lloyd, and Christine A. Raines\*



Lefebvre *et al* 2005 Plant Physiol 138, 451–460

# Régénération du RuBP

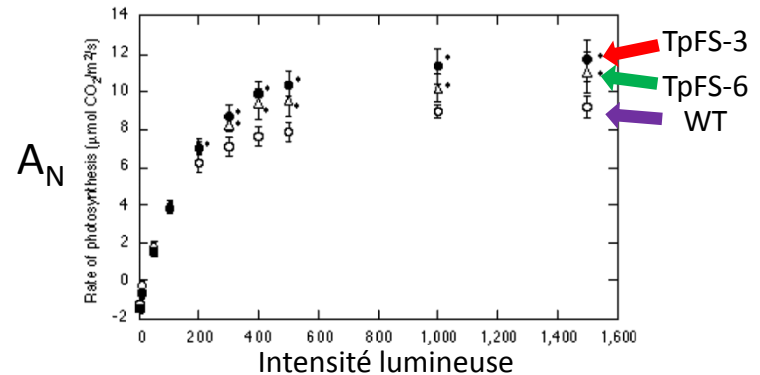
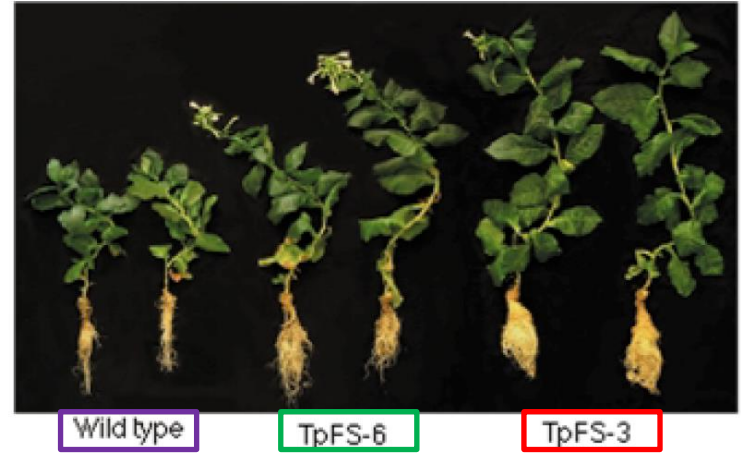
## Cible

- **SBP/FBP** = sédoheptulose-1,7-bisphosphatase/fructose-1,6-bisphosphatase



Overexpression of a cyanobacterial fructose-1,6-/sedoheptulose-1,7-bisphosphatase in tobacco enhances photosynthesis and growth

Yoshiko Miyagawa<sup>1†</sup>, Masahiro Tamoi<sup>2†</sup>, and Shigeru Shigeoka<sup>1,2\*</sup>



# Régénération du RuBP

## Cible

- **SBP/FBP** = sedoheptulose-1,7-bisphosphatase/fructose-1,6-bisphosphatase



*Journal of Experimental Botany*, Vol. 68, No. 3 pp. 715–726, 2017  
doi:10.1093/jxb/erw435 Advance Access publication 12 December 2016  
This paper is available online free of all access charges (see [http://jxb.oxfordjournals.org/open\\_access.html](http://jxb.oxfordjournals.org/open_access.html) for further details)

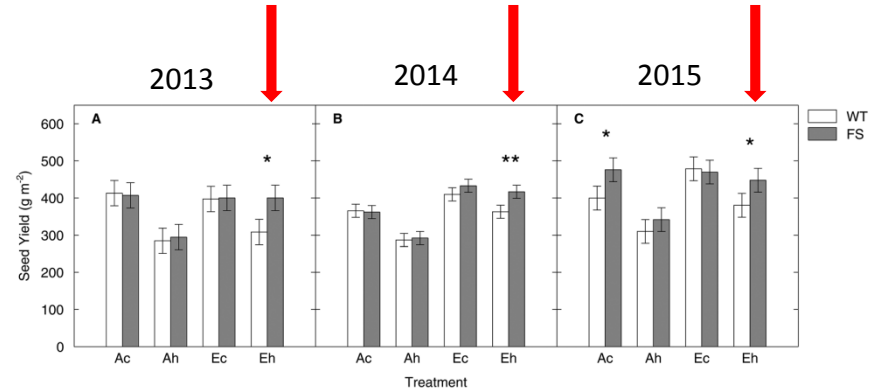


RESEARCH PAPER

**Expression of cyanobacterial FBP/SBPase in soybean prevents yield depression under future climate conditions**

Iris H. Köhler<sup>1,2</sup>, Ursula M. Ruiz-Vera<sup>2</sup>, Andy VanLoocke<sup>3</sup>, Michell L. Thomey<sup>1,2</sup>, Tom Clemente<sup>4</sup>, Stephen P. Long<sup>2,5,6</sup>, Donald R. Ort<sup>1,2,6</sup> and Carl J. Bernacchi<sup>1,2,6,\*</sup>

## Rendement en graines



Ac = 400  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  [CO<sub>2</sub>]

Ah = 400  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  [CO<sub>2</sub>] + 3.5 °C

Ec = 600  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  [CO<sub>2</sub>]

Eh = 600  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  [CO<sub>2</sub>] + 3.5 °C

Soy-T-FACE

Köhler *et al* 2016 J Exp Bot 68, 715-26

# Régénération du RuBP

## Cible

- **FBPA** = fructose-1,6-bisphosphate aldolase



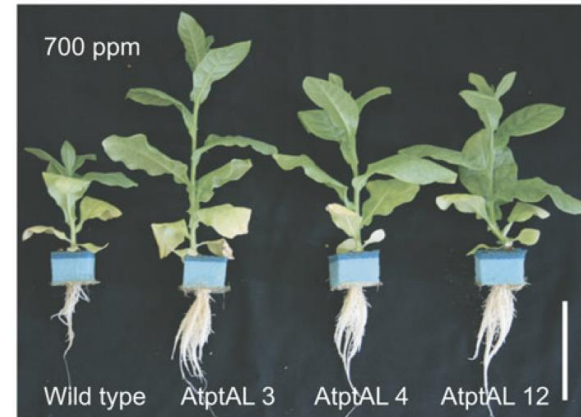
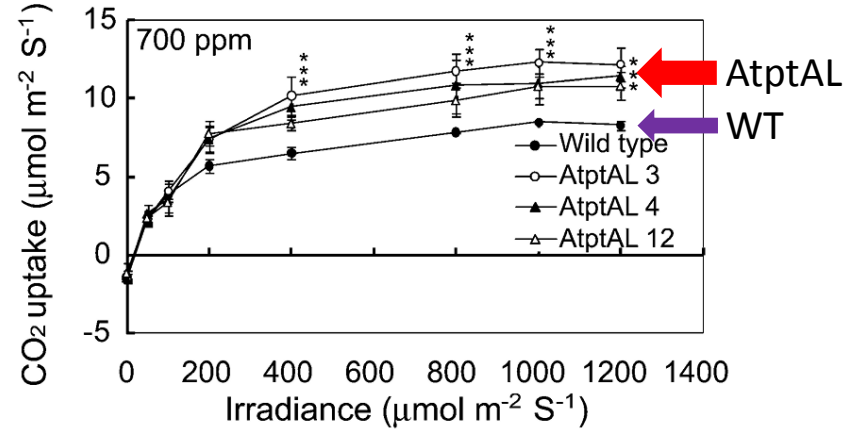
*Journal of Experimental Botany*, Vol. 63, No. 8, pp. 3001–3009, 2012  
doi:10.1093/jxb/ers004 Advance Access publication 8 February, 2012

RESEARCH PAPER

**Increased fructose 1,6-bisphosphate aldolase in plastids  
enhances growth and photosynthesis** of tobacco plants

Kimio Uematsu, Nobuaki Suzuki, Tomoko Iwamae, Masayuki Inui and Hideaki Yukawa\*

Journal of  
Experimental  
Botany  
www.jxb.oxfordjournals.org





# Régénération du RuBP

## Cible

- **FBPA** = fructose 1,6-bisphosphate aldolase



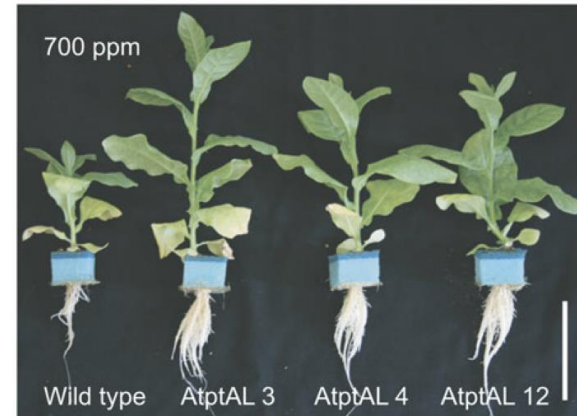
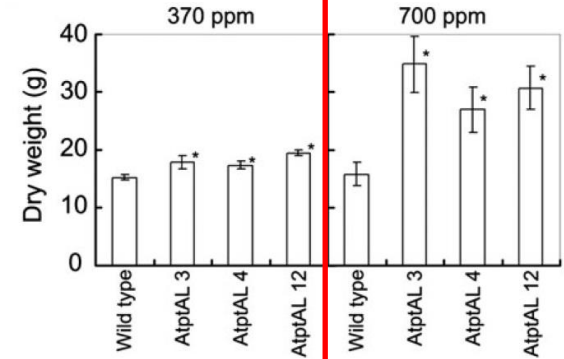
*Journal of Experimental Botany*, Vol. 63, No. 8, pp. 3001–3009, 2012  
doi:10.1093/jxb/ers004 Advance Access publication 8 February, 2012

RESEARCH PAPER

**Increased fructose 1,6-bisphosphate aldolase in plastids  
enhances growth and photosynthesis** of tobacco plants

Kimio Uematsu, Nobuaki Suzuki, Tomoko Iwamae, Masayuki Inui and Hideaki Yukawa\*

  
Journal of  
Experimental  
Botany  
www.jxb.oxfordjournals.org



# Régénération du RuBP

## Pyramidage de cibles



### Sur-expression : plusieurs ADNc

- Clonage avec enzymes de restriction
- Clonage avec Gateway
- Clonage avec Golden Gate
- Transformation par *Agrobacterium*
- Transformation de plantes déjà OE

- Simkin *et al* **2015** J Ex Bot 66, 4075–90

Tabac = SBPase + FBPA

Tabac = SBPase + ictB

Tabac = SBPase + FBPA + ictB

- Simkin *et al* **2017** Plant Biotech J 15, 805–16

Arabidopsis = SBPase + FBPA

Arabidopsis = SBPase + FBPA + GDC-H

- López-Calcano *et al* **2020** Nat Plants 6, 1054–63

Tabac = SBPase + Cyt<sub>c</sub><sub>6</sub>

Tabac = bi-SBP/FBPase + Cyt<sub>c</sub><sub>6</sub>

# Régénération du RuBP

## Pyramidage de cibles



bi-SBP/FBPase + Cyt<sub>c</sub><sub>6</sub> = **S<sub>B</sub>C<sub>6</sub>**  
SBPase + Cyt<sub>c</sub><sub>6</sub> = **SC<sub>6</sub>**

nature  
plants

ARTICLES

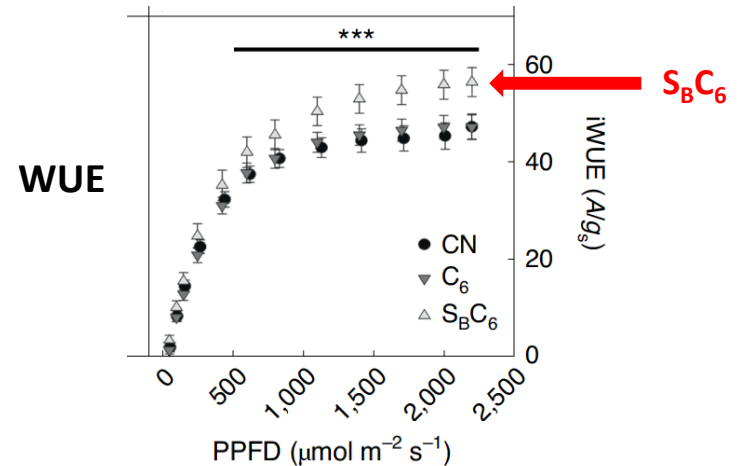
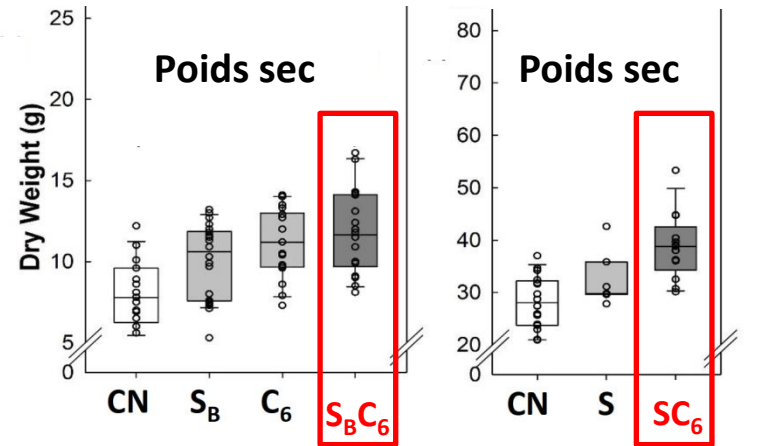
<https://doi.org/10.1038/s41477-020-0740-1>



## Stimulating photosynthetic processes increases productivity and water-use efficiency in the field

Patricia E. López-Calcano <sup>1,3</sup> , Kenny L. Brown <sup>1,3</sup>, Andrew J. Simkin <sup>1,2,3</sup>, Stuart J. Fisk <sup>1</sup>, Silvere Vialet-Chabrand <sup>1</sup>, Tracy Lawson <sup>1</sup> and Christine A. Raines <sup>1</sup>

López-Calcano *et al* 2020 Nature Plants 6, 1054-63



# Régénération du RuBP - Conclusions

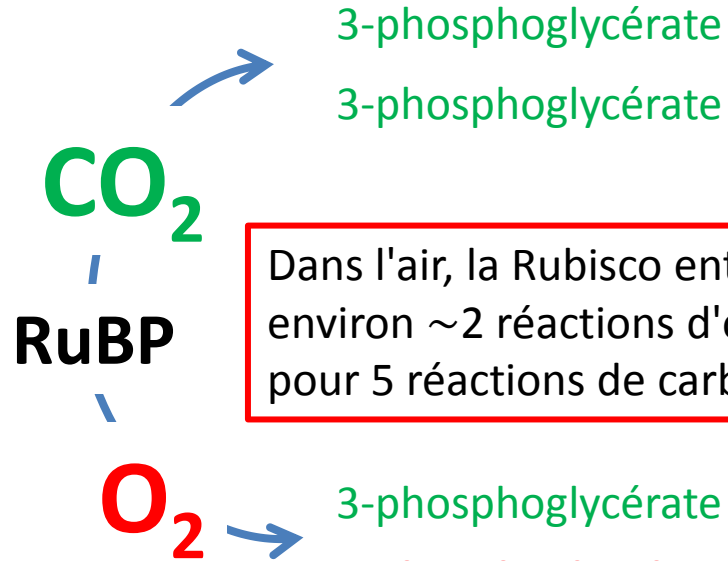
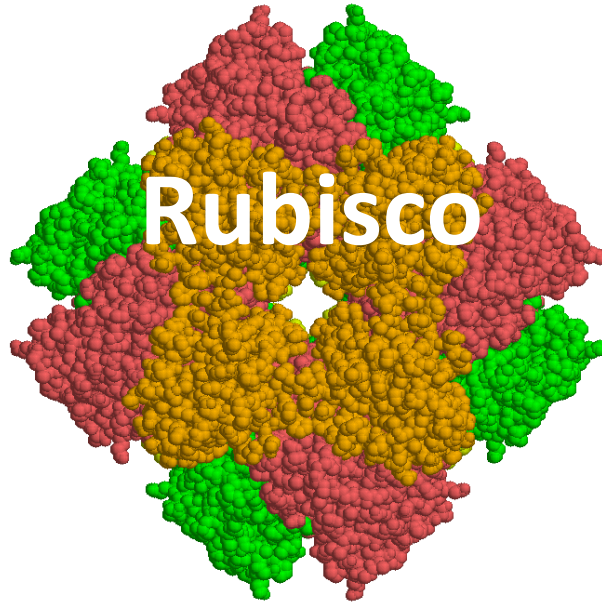
- Amélioration de la fixation photosynthétique du CO<sub>2</sub>
- Augmentation de la biomasse
- Augmentation du rendement en graines
- Pyramidage = encore mieux
- Meilleure réponse aux conditions associées avec le changement climatique

# Alors, de quoi je vais parler?

- **Régénération du RuBP** = sur-expression d'enzymes du cycle de Calvin
- **Photorespiration** = expression de voies du catabolisme du glycolate dans le chloroplaste (bypass photorespiratoire)
- **Photoprotection** = sur-expression des enzymes impliquées dans la dissipation en chaleur de l'excès d'énergie absorbée par les chlorophylles (qNP  $\longrightarrow$  qE/qZ)

1. Introduction du processus cible
2. Les espèces végétales
3. La(les) biotechnologie(s)
4. Quelques exemples

# Où commence la photorespiration ?

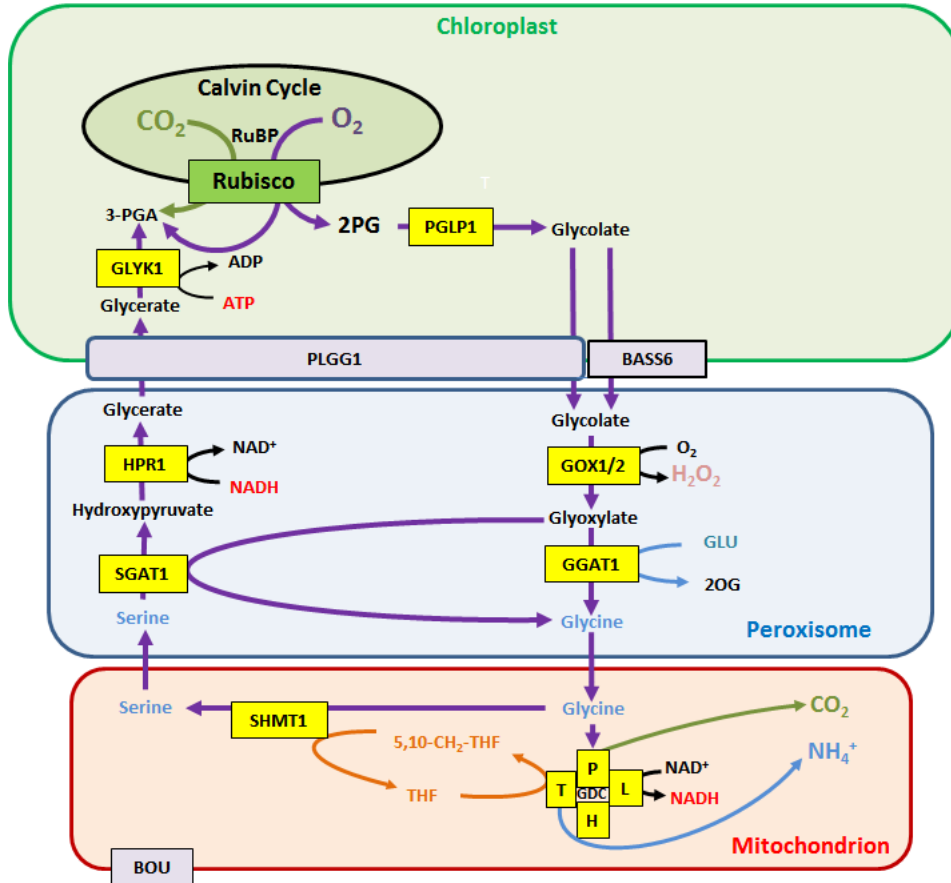


Dans l'air, la Rubisco entreprend environ ~2 réactions d'oxygénation pour 5 réactions de carboxylation



- Triose-phosphate isomérase
- SBPase
- Phosphofructokinase

# C'est quoi le cycle photorespiratoire?

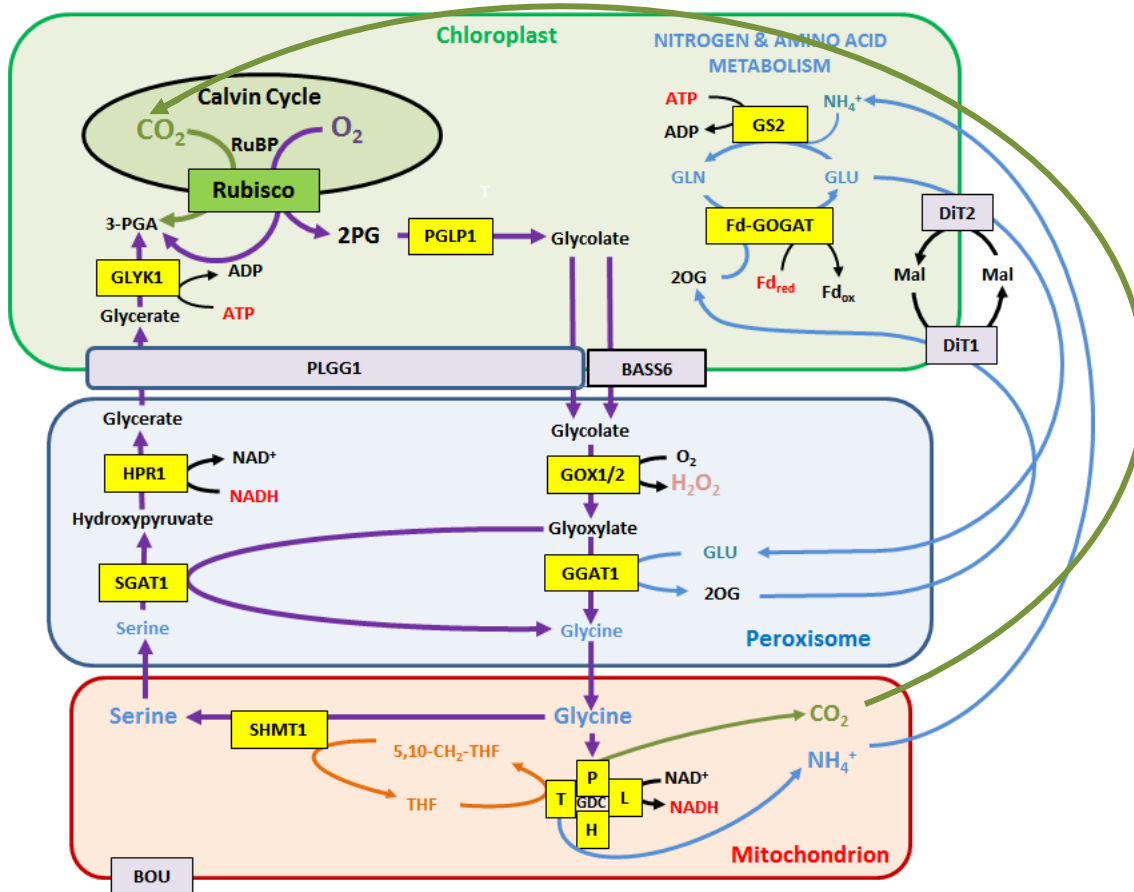


- 9 enzymes
- 4 compartiments



- Libère du  $\text{CO}_2$
- Libère du  $\text{NH}_4^+$

# C'est quoi le cycle photorespiratoire?



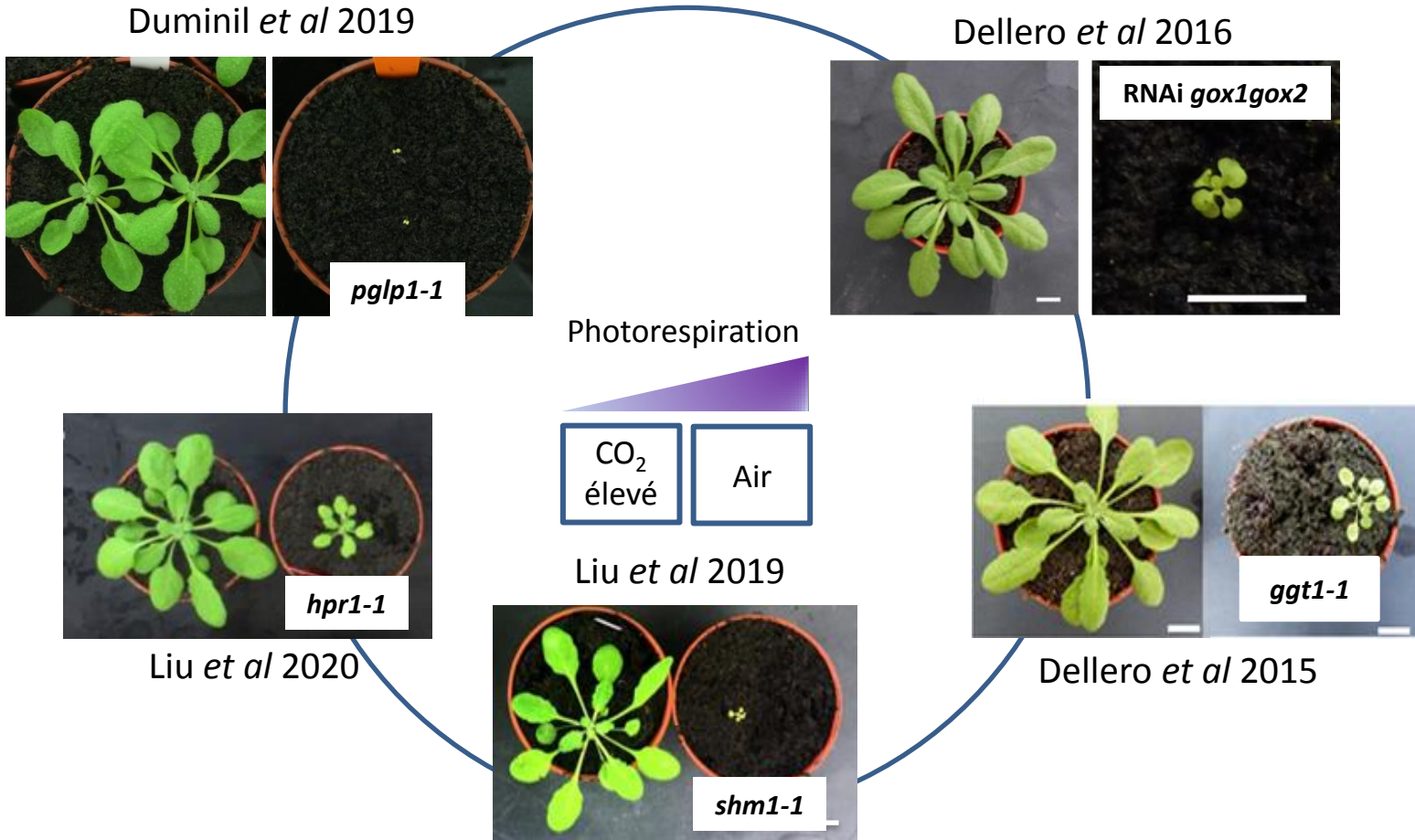
- 9 enzymes
- 4 compartiments



- Libère du  $\text{CO}_2$
- Libère du  $\text{NH}_4^+$
- Utilise de l'énergie & du pouvoir réducteur



# La photorespiration est essentielle à la croissance des plantes dans l'air



# La photorespiration est essentielle à la croissance des plantes dans l'air

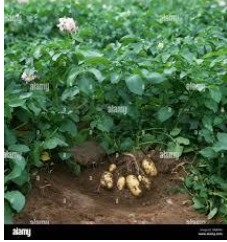
## Cependant

- Ce processus métabolique à haut flux a un coût énergétique estimé qui va réduire l'efficacité photosynthétique théorique des plantes-C<sub>3</sub> de 48% (Zhu *et al* 2008)
- Aux États-Unis, on estime que la photorespiration réduit le rendement du blé et du soja de 20 % & 36 %, respectivement
- Cela devrait augmenter avec des températures plus élevées et des périodes de sécheresse plus longues en raison du changement climatique (Walker *et al* 2016)

### **Idée :**

**Créer une voie photorespiratoire artificielle dans le chloroplaste qui ne libère plus de NH<sub>3</sub> et qui produit du CO<sub>2</sub> à proximité de la Rubisco**

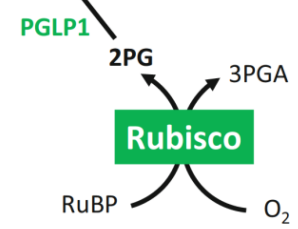
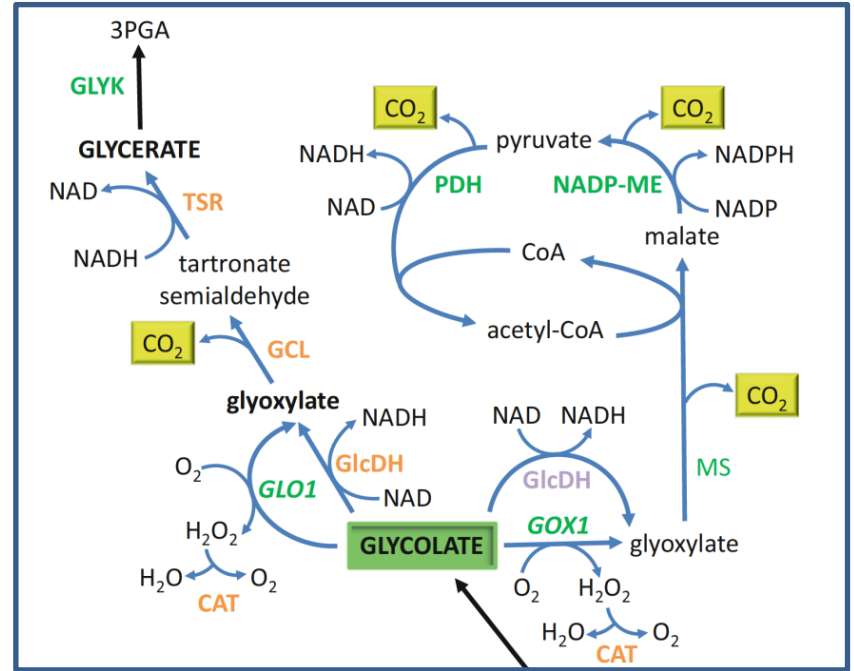
# Bypass photorespiratoire



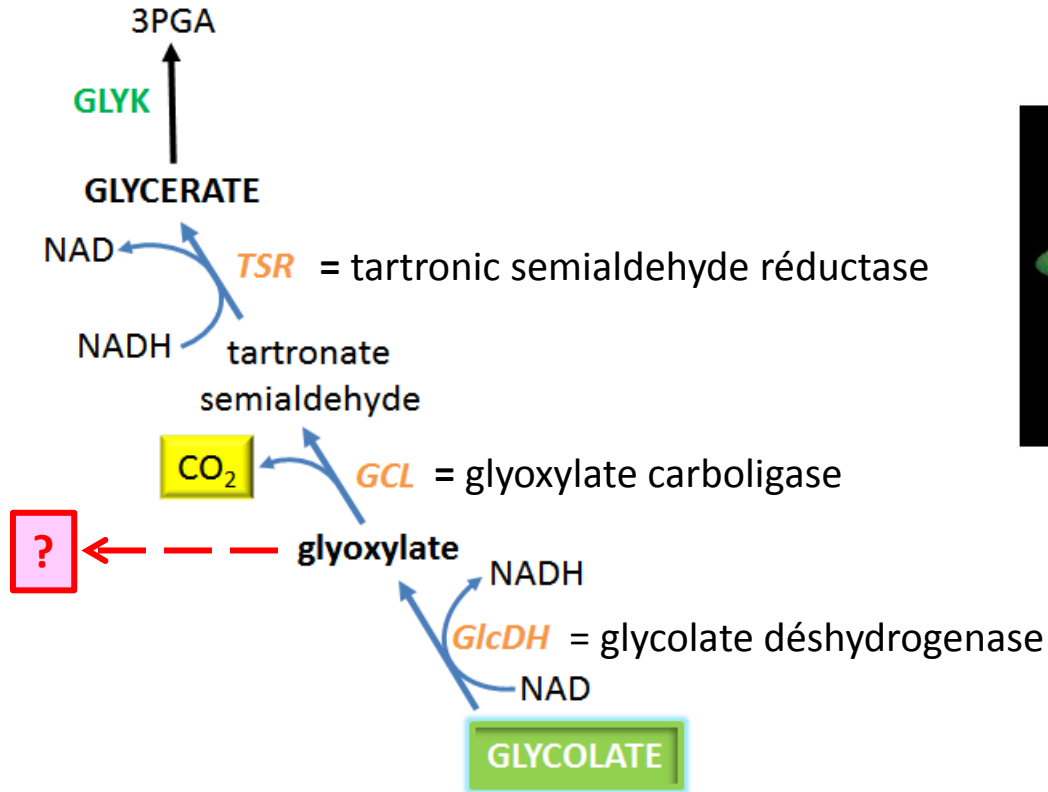
- Clonages: « old school » / gateway / golden gate
- ADNc d'origine *E. coli*, algue & plante
- Optimisation de codons
- Addition d'une séquence « PT »
- Utilisation de divers promoteurs / terminateurs
- Production d'une poly-protéine
- Transformation par *Agrobacterium* avec plusieurs construits



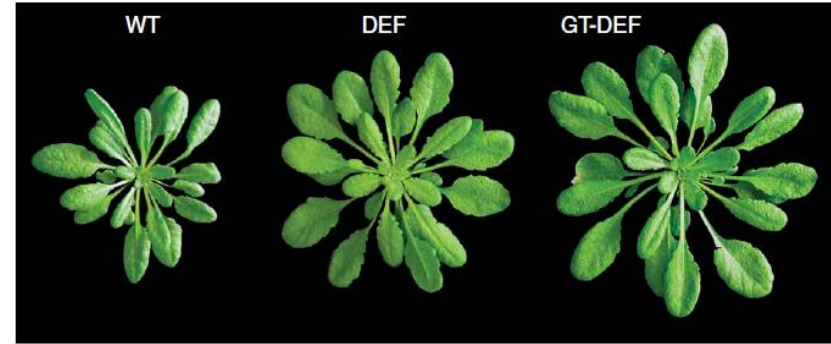
# Bypass photorespiratoire



# Bypass photorespiratoire



## *Arabidopsis thaliana*



Net  $\text{CO}_2$  assimilation ( $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )

WT	DEF	GT-DEF
5.5	6.7	8.2

# Bypass photorespiratoire

*Solanum tuberosum*

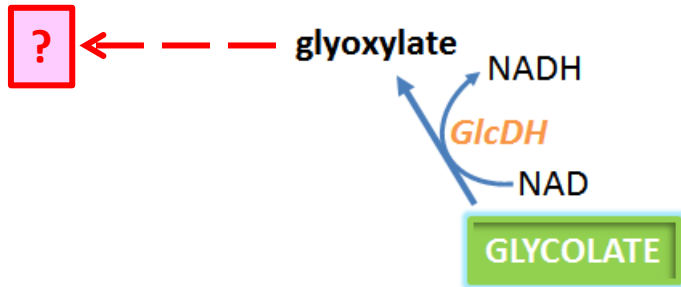
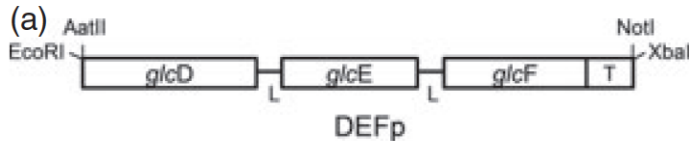
WT

DEF lines



The expression of a recombinant glycolate dehydrogenase polyprotein in potato (*Solanum tuberosum*) plastids strongly enhances photosynthesis and tuber yield

Greta Nölke<sup>1</sup>, Marcel Houdelet<sup>1</sup>, Fritz Kreuzaler<sup>1</sup>, Christoph Peterhänsel<sup>2</sup> and Stefan Schillberg<sup>1,3,\*</sup>



# Bypass photorespiratoire

Dalal et al. *Biotechnol Biofuels* (2015) 8:175  
DOI 10.1186/s13068-015-0357-1



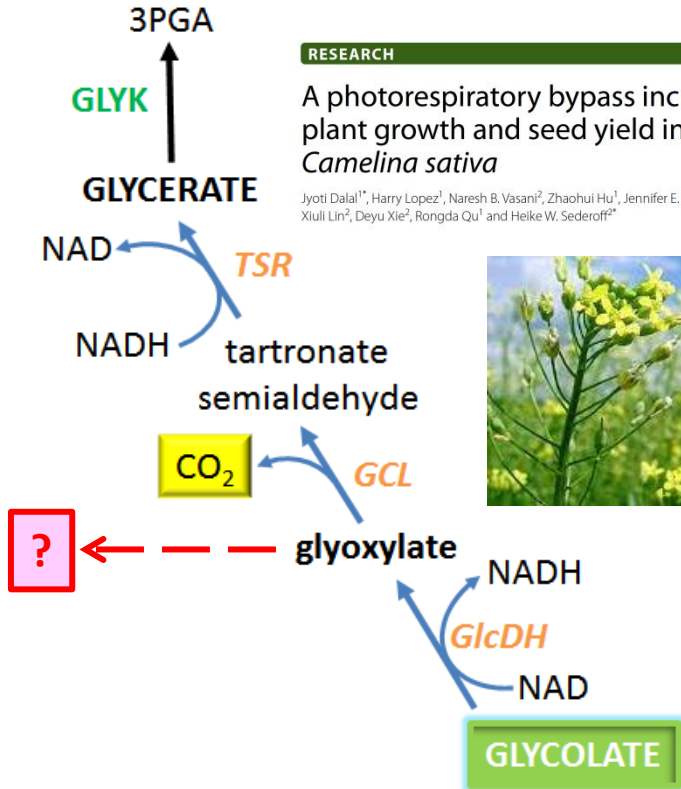
RESEARCH

Open Access

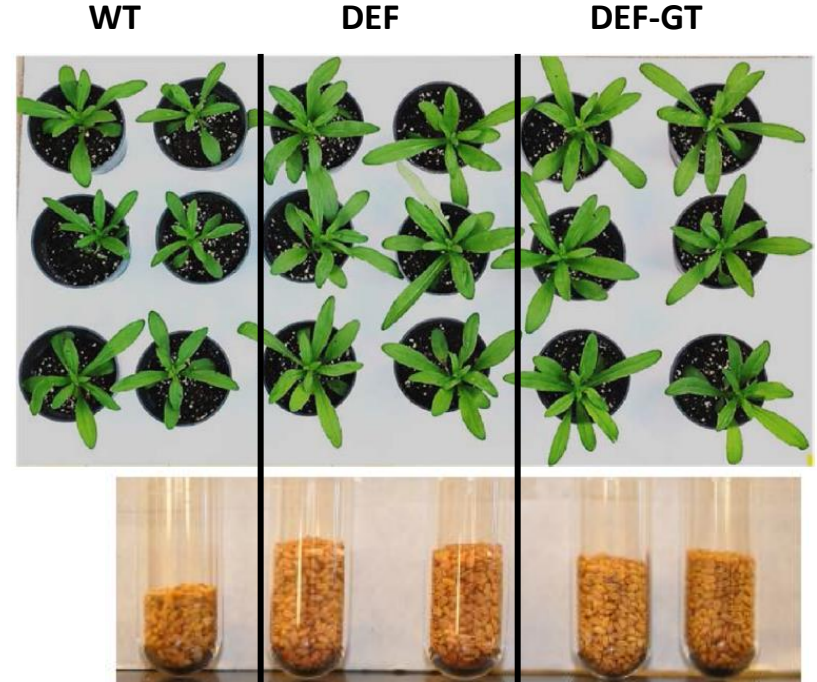


A photorespiratory bypass increases plant growth and seed yield in biofuel crop *Camelina sativa*

Jyoti Dalal<sup>1\*</sup>, Harry Lopez<sup>2</sup>, Naresh B. Vasani<sup>2</sup>, Zhaohui Hu<sup>1</sup>, Jennifer E. Swift<sup>2</sup>, Roopa Yalamanchilli<sup>2</sup>, Mia Dvora<sup>2</sup>, Xiuli Lin<sup>2</sup>, Deyu Xie<sup>2</sup>, Rongda Qu<sup>1</sup> and Heike W. Sederoff<sup>2\*</sup>



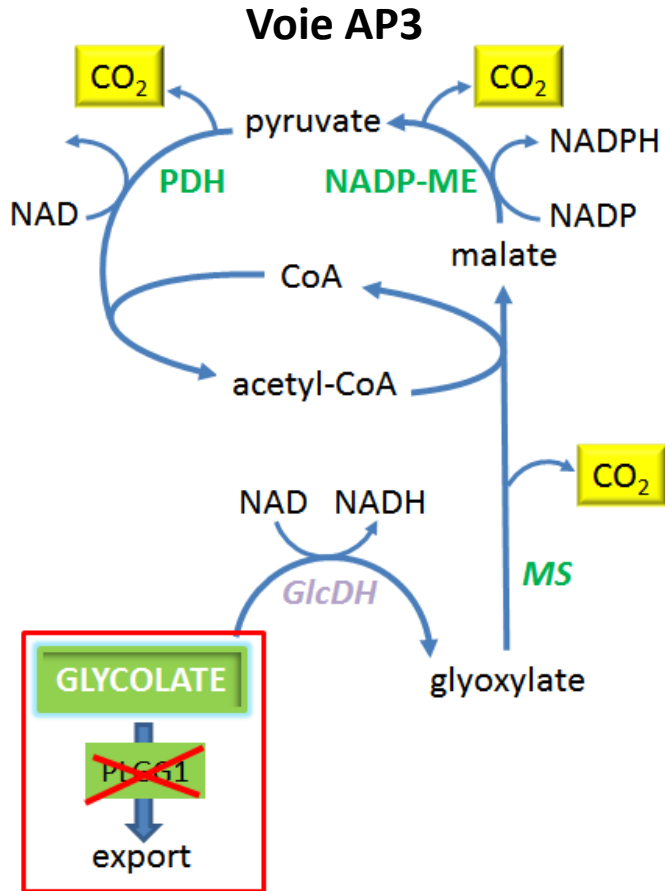
*Camelina sativa*



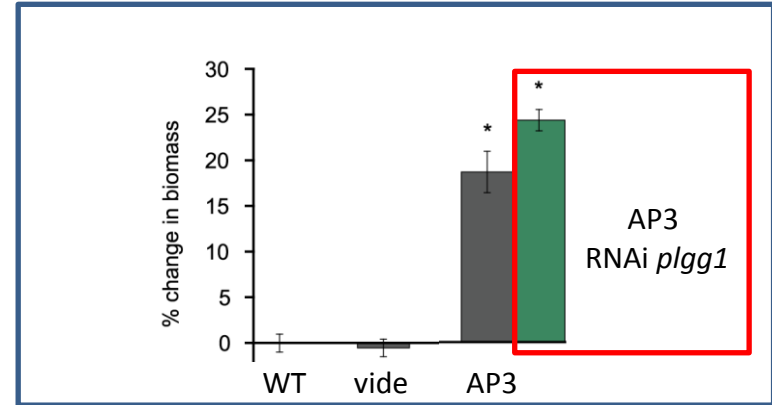




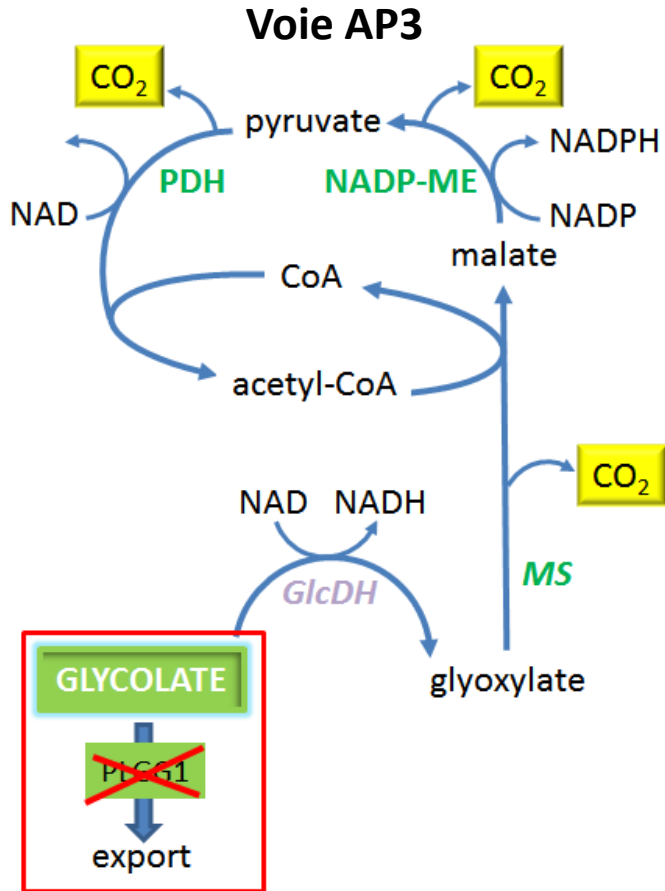
# Bypass photorespiratoire



WT AP3-8 AP3-9 AP3-10 AP3-1 AP3-5 AP3-8  
 RNAi *plgg1*

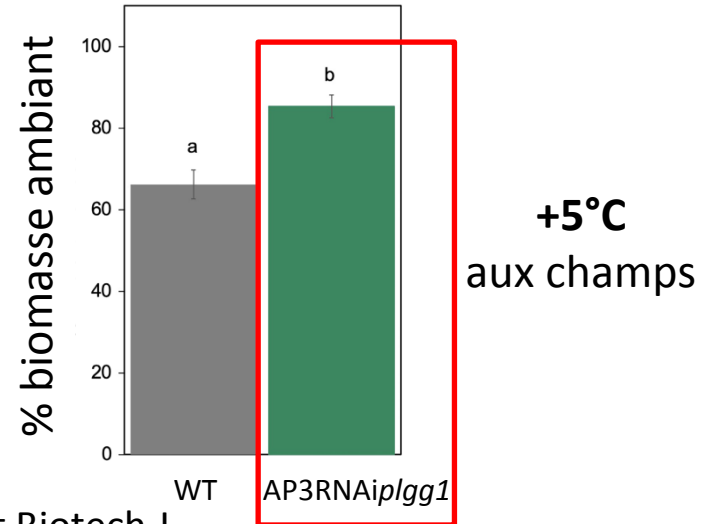


# Bypass photorespiratoire



## Alternative pathway to photorespiration protects growth and productivity at elevated temperatures in a model crop

Amanda P. Cavanagh<sup>1,a</sup> , Paul F. South<sup>1,2,b</sup> , Carl J. Bernacchi<sup>1,2</sup>  and Donald R. Ort<sup>1,3,\*</sup> 



# Bypass photorespiratoire : conclusions

- ✓ Les bypass photorespiratoires chloroplastiques peuvent améliorer la photosynthèse, la biomasse et le rendement

Peuvent-ils être améliorés et si oui, comment ?

- Un bypass photorespiratoire incomplet produisant du glyoxylate dans le chloroplaste est également bénéfique

Ca marche comment ?

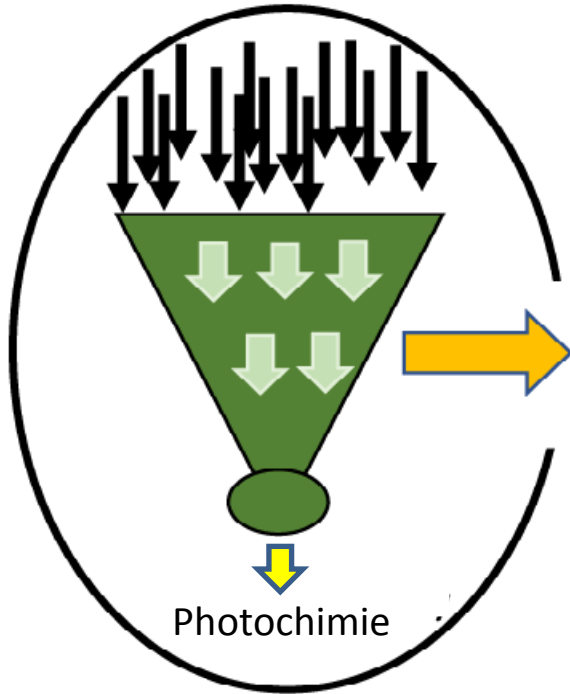
# Alors, de quoi je vais parler?

- **Régénération du RuBP** = sur-expression d'enzymes du cycle de Calvin
- **Photorespiration** = expression de voies du catabolisme du glycolate dans le chloroplaste (bypass photorespiratoire)
- **Photoprotection** = sur-expression des enzymes impliquées dans la dissipation en chaleur de l'excès d'énergie absorbée par les chlorophylles (qNP  $\longrightarrow$  qE/qZ)

1. Introduction du processus cible
2. Les espèces végétales
3. La(les) biotechnologie(s)
4. Quelques exemples

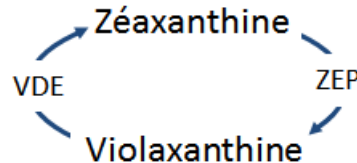
# Photoprotection

Forte lumière



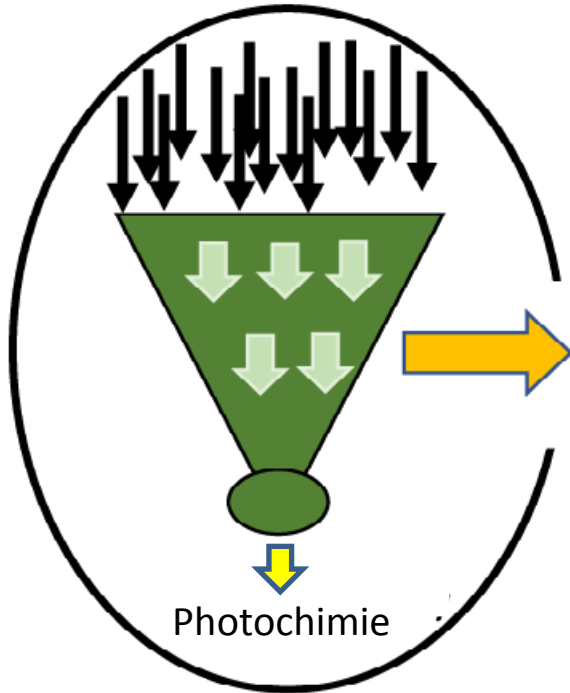
Dissipation de l'énergie d'excitation en chaleur ( $qE/qZ$ )

$\Delta pH + PsbS +$  Cycle des xanthophylles +  $\Delta$ Conformation du LHC2



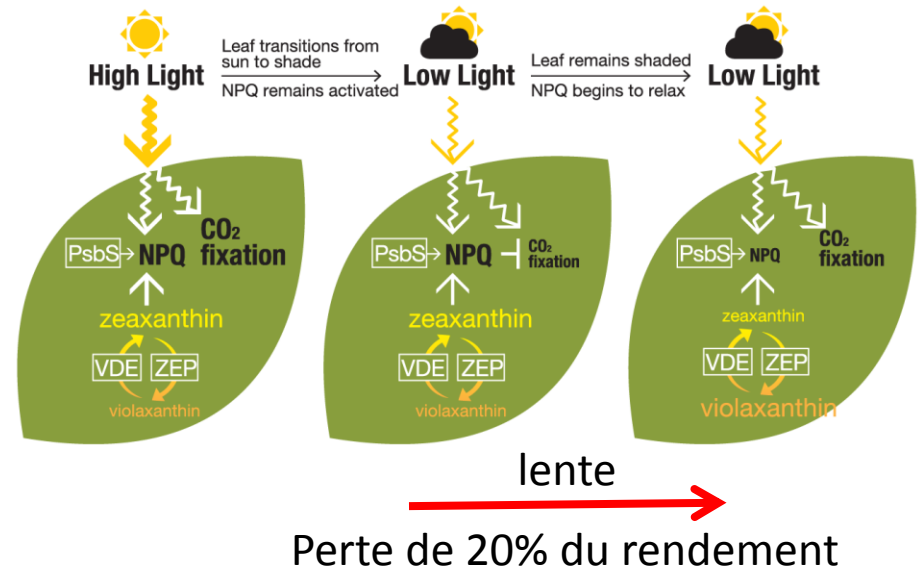
# Photoprotection

Forte lumière



Dissipation de l'énergie d'excitation en chaleur ( $qE/qZ$ )

Murchie & Ruban 2020 Plant J 101, 885–96



➤ **Idée: augmenter la vitesse de relaxation**

Kromdijk *et al* 2017 Science 354, 857-61

# Photoprotection

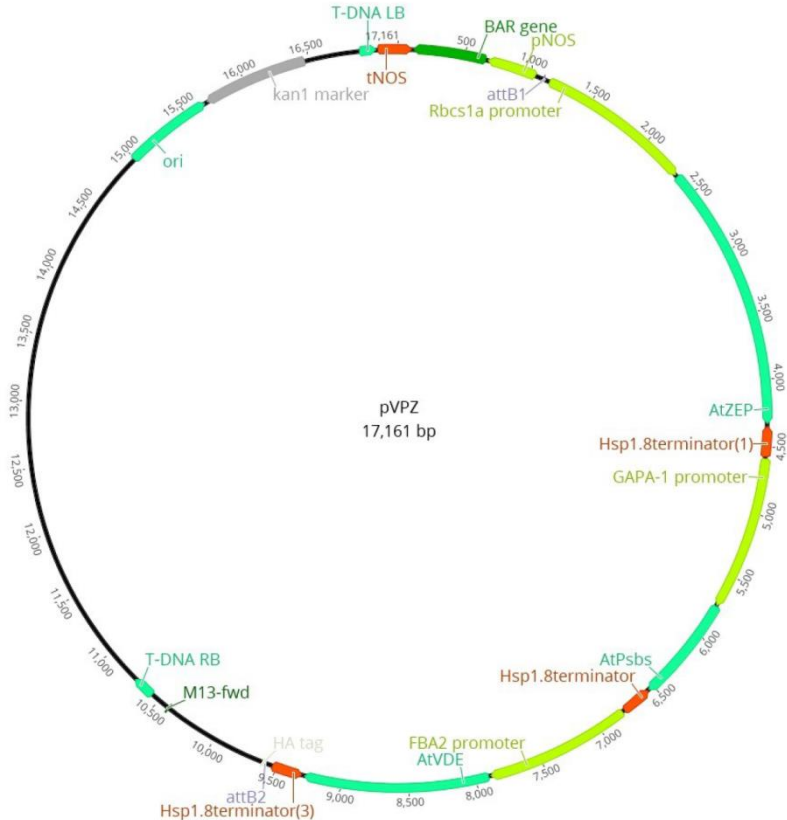
## Transformation avec 1 construit « gateway »

### *Arabidopsis thaliana*

- Sous-unité S de PSII **AtPsbS**
- Zéaxanthine époxydase **AtZEP**
- Violaxanthine désépoxydase **AtVDE**



- Promoteur petite sous-unité 1A Rubisco **Rbcs1A-P**
  - Promoteur sous-unité 1 Glyceraldehyde 3-phosphate déshydrogenase A **GAPA-P**
  - Promoteur Fructose-bisphosphate aldolase 2 **FBA2-P**
  - Promoteur Nopaline synthase **Nos-P**
  - Termineur Heat shock protein 1.8 **HSP1.8-T**
  - Termineur Nopaline synthase **Nos-T**
- ✓ **pEarleygate** comme vecteur d'origine







# Photoprotection

## Soybean photosynthesis and crop yield are improved by accelerating recovery from photoprotection

Amanda P. De Souza<sup>1</sup>, Steven J. Burgess<sup>1,2</sup>, Lynn Doran<sup>1</sup>, Jeffrey Hansen<sup>1</sup>, Lusya Manukyan<sup>1</sup>, Nina Maryn<sup>3</sup>, Dhananjay Gotarkar<sup>2</sup>, Lauriebeth Leonelli<sup>1,4</sup>, Krishna K. Niyogi<sup>3,5</sup>, Stephen P. Long<sup>1,6\*</sup>



TWITTER



**Science Magazine** · 1 j  
Bioengineering soybean plants to improve regulation of photoprotection improved soybean seed yield by up to 33% in field trials. The results in Science could enable a much-needed strategy to increase crop yield and support global food security sustainably. [fcl.d.ly/iqxia7m](https://fcl.d.ly/iqxia7m)



Christine Raines  
a retweeté

**The RIPE Project** @... · 13 h  
Bioengineering photosynthesis to boost crop yields, [@nytimes](#) article reports on our recent study published in [@ScienceMagazine](#) that reports a >20% increase in soybean yield: [nyti.ms/3AleSJT](https://nyti.ms/3AleSJT)

Read the full paper: [bit.ly/3wrEXFY](https://bit.ly/3wrEXFY)



**Beatriz Moreno García, P...**  
[@BeaMorenoGarcia](#)

Increased photosynthesis and yield in a food crop [@RIPEproject](#) featured at [@TheEconomist](#)

Traduire le Tweet



[economist.com](https://economist.com)  
A genetic tweak that makes soya plants 20% more productive

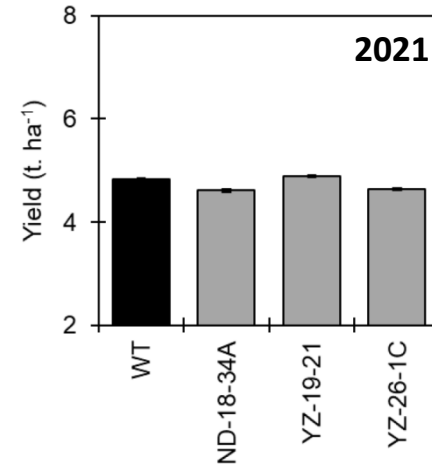
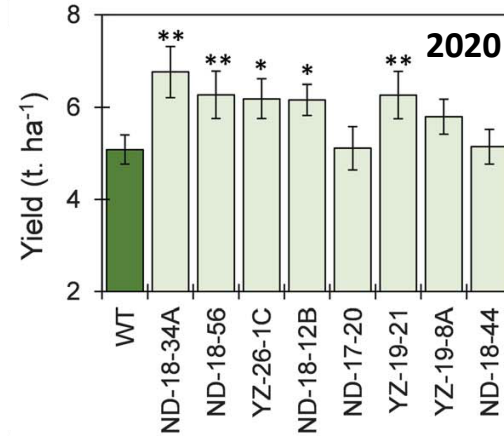
# Photoprotection

## Soybean photosynthesis and crop yield are improved by accelerating recovery from photoprotection

Amanda P. De Souza<sup>1</sup>, Steven J. Burgess<sup>1,2</sup>, Lynn Doran<sup>1</sup>, Jeffrey Hansen<sup>1</sup>, Lusya Manukyan<sup>1</sup>, Nina Maryn<sup>3</sup>, Dhananjay Gotarkar<sup>2</sup>, Lauriebeth Leonelli<sup>1,4</sup>, Krishna K. Niyogi<sup>3,5</sup>, Stephen P. Long<sup>1,6\*</sup>



## Rendement en graines



# Photoprotection

## Soybean photosynthesis and crop yield are improved by accelerating recovery from photoprotection

Amanda P. De Souza<sup>1</sup>, Steven J. Burgess<sup>1,2</sup>, Lynn Doran<sup>1</sup>, Jeffrey Hansen<sup>1</sup>, Lusya Manukyan<sup>1</sup>, Nina Maryn<sup>3</sup>, Dhananjay Gotarkar<sup>2</sup>, Lauriebeth Leonelli<sup>1,4</sup>, Krishna K. Niyogi<sup>3,5</sup>, Stephen P. Long<sup>1,6\*</sup>



Steven Burgess  
@SJB\_SynBio

...

We reported that in 1 year, in a small plot experiment, 5/8 transgenic lines produced more total seed mass, at an average of 24.5%, with the largest

being 33%. In a second year this was not seen - likely because the site was hit by a storm and the plants lodged.



# Photoprotection

## High non-photochemical quenching of VPZ transgenic potato plants limits CO<sub>2</sub> assimilation under high light conditions and reduces tuber yield under fluctuating light<sup>oo</sup>

Günter G. Lehretz<sup>1</sup>, Anja Schneider<sup>2</sup>, Dario Leister<sup>2</sup> and Uwe Sonnewald<sup>1\*</sup>



## Accelerated relaxation of photoprotection impairs biomass accumulation in *Arabidopsis*

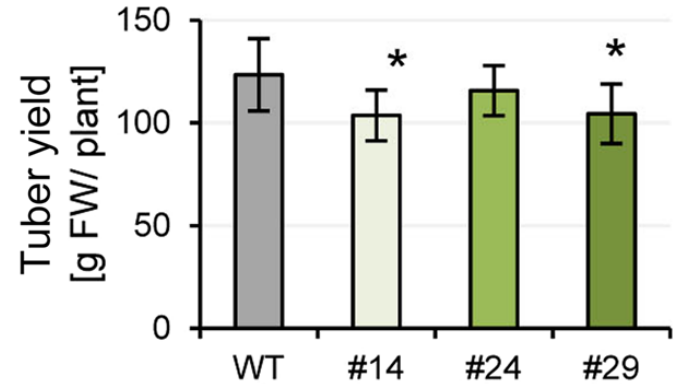
Antoni Garcia-Molina  and Dario Leister \*



# Photoprotection

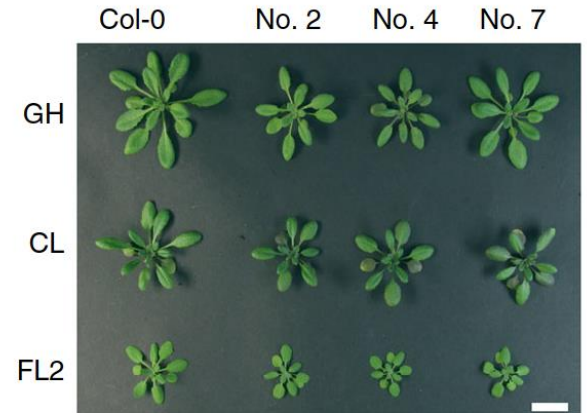
## High non-photochemical quenching of VPZ transgenic potato plants limits CO<sub>2</sub> assimilation under high light conditions and reduces tuber yield under fluctuating light<sup>oo</sup>

Günter G. Lehretz<sup>1</sup>, Anja Schneider<sup>2</sup>, Dario Leister<sup>2</sup> and Uwe Sonnewald<sup>1\*</sup>



## Accelerated relaxation of photoprotection impairs biomass accumulation in *Arabidopsis*

Antoni Garcia-Molina<sup>id</sup> and Dario Leister<sup>id\*</sup>



# Photoprotection

## High non-photochemical quenching of VPZ transgenic potato plants limits CO<sub>2</sub> assimilation under high light conditions and reduces tuber yield under fluctuating light<sup>oo</sup>

Günter G. Lehretz<sup>1</sup>, Anja Schneider<sup>2</sup>, Dario Leister<sup>2</sup> and Uwe Sonnewald<sup>1\*</sup>



## Accelerated relaxation of photoprotection impairs biomass accumulation in *Arabidopsis*

Antoni Garcia-Molina  and Dario Leister \*

- ✓ Les stratégies visant à améliorer la photosynthèse devront être adaptées en fonction des cultures de plantes

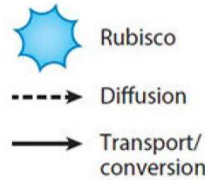
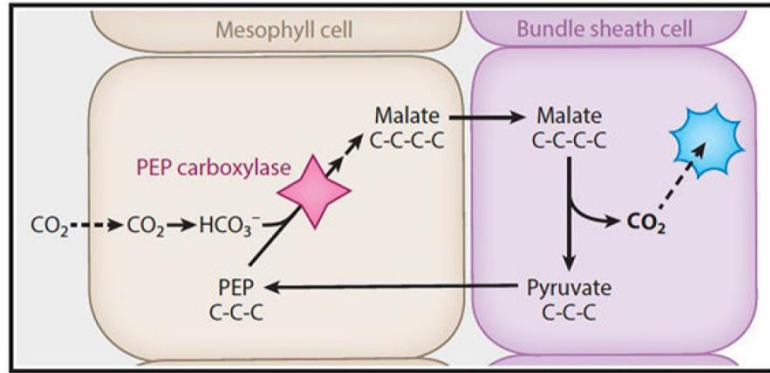


# Conclusions

- ✓ **OUI** – c'est possible d'améliorer la photosynthèse
- ✓ **OUI** – ça peut augmenter la biomasse végétale & le rendement en graines
- ✓ **OUI** – ça peut protéger contre les effets néfastes du changement climatique
  
- ❖ **ATTENTION** – il faut peut-être adapter la (les) stratégie(s) en fonction des cultures de plantes
  
- ❖ Stratégies actuelles ne sont **pas adaptées** au marché Européen
  
- ❖ Pas de stratégie non-OGM pour le moment sauf **l'exploitation de la variation génétique naturelle**

# CCMs : très très brièvement

## Voie C4

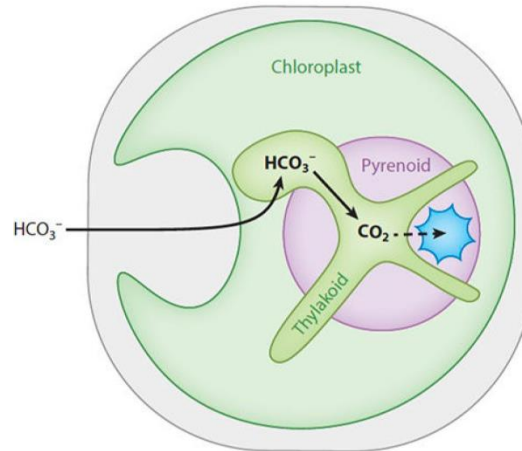
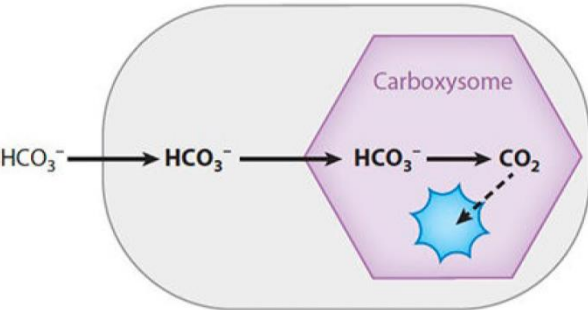


## Pas simple à faire

- Ingénierie du développement tissulaire
- Expression dépendante des tissus
- Faut remplacer la Rubisco
- Composants mal caractérisés
- Expression de beaucoup de protéines

## Pyrénoïde

### Carboxysome



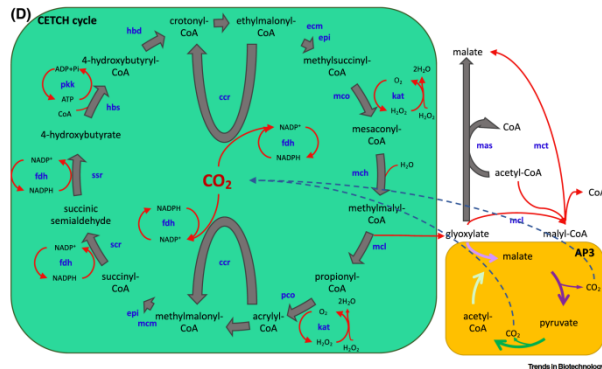
*Annual Review of Plant Biology* 2020. 71, 461–85  
Prospects for Engineering  
Biophysical CO<sub>2</sub> Concentrating  
Mechanisms into Land Plants  
to Enhance Yields

Jessica H. Hennacy and Martin C. Jonikas

Department of Molecular Biology, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544, USA;  
email: jhennacy@princeton.edu, mjonikas@princeton.edu

# Perspectives

- **La variation naturelle** : identifier la variation génétique influençant la photosynthèse (par exemple des paramètres cinétiques et la régulation des enzymes)
- **Expression et coordination des gènes** : identifier des facteurs de transcription
- **Régulation** : identifier des modifications post-traductionnelles
- **Biologie synthétique** : créer des nouvelles voies et des nouvelles enzymes



Synthetic Rewiring of  
Plant CO<sub>2</sub> Sequestration  
Galvanizes Plant  
Biomass Production

Muhammad Naseem,<sup>1,3,\*</sup>  
Özge Osmanoglu,<sup>2,3</sup> and  
Thomas Dandekar<sup>2,\*</sup>



## Design and analysis of synthetic carbon fixation pathways

Arren Bar-Even<sup>a</sup>, Elad Noor<sup>a</sup>, Nathan E. Lewis<sup>b,c</sup>, and Ron Milošević<sup>a,1</sup>



PNAS | May 11, 2010 | vol. 107 | no. 19 | 8889–8894



**MERCI POUR VOTRE ATTENTION**

