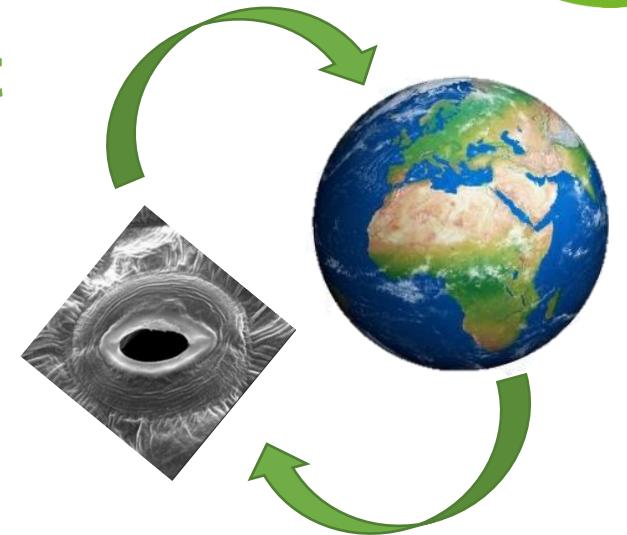




# Influence de l'élévation du CO<sub>2</sub> sur l'efficience d'utilisation de l'eau: régulation stomatique et contrôle de la transpiration

Nathalie LEONHARDT

Plant Environmental Physiology and Stress Signalling (PEPSS)



**BIAM**

Green Solutions for Tomorrow

Institut de Biosciences et biotechnologies d'Aix-Marseille

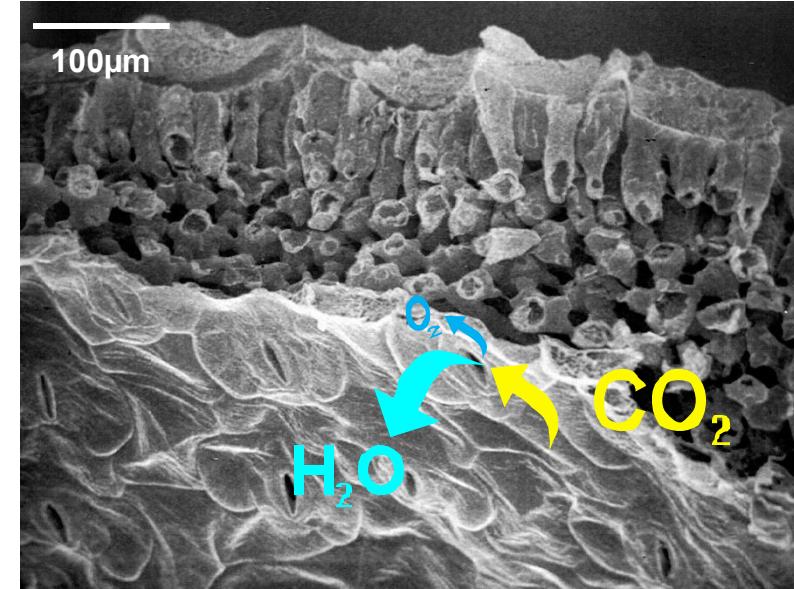
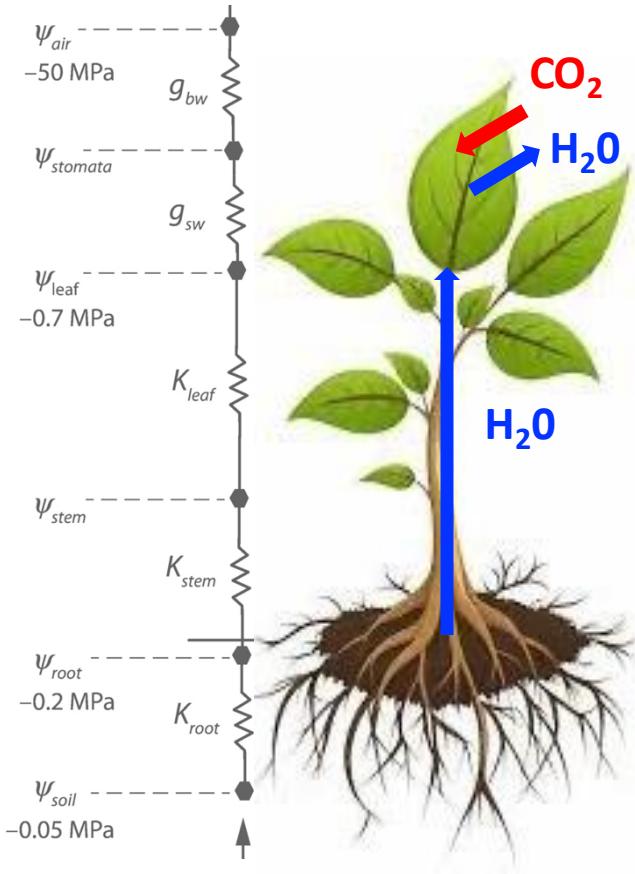
Colloque: Les plantes dans un environnement à fort CO<sub>2</sub> – Contraintes et opportunités



PEPR FairCarboN

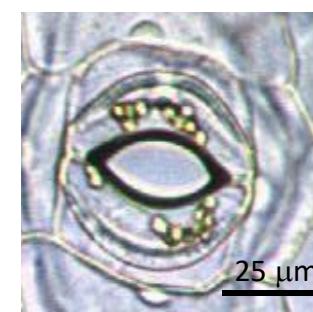
mardi 30 septembre 2025

# Les stomates contrôlent les échanges gazeux entre les plantes et l'atmosphère



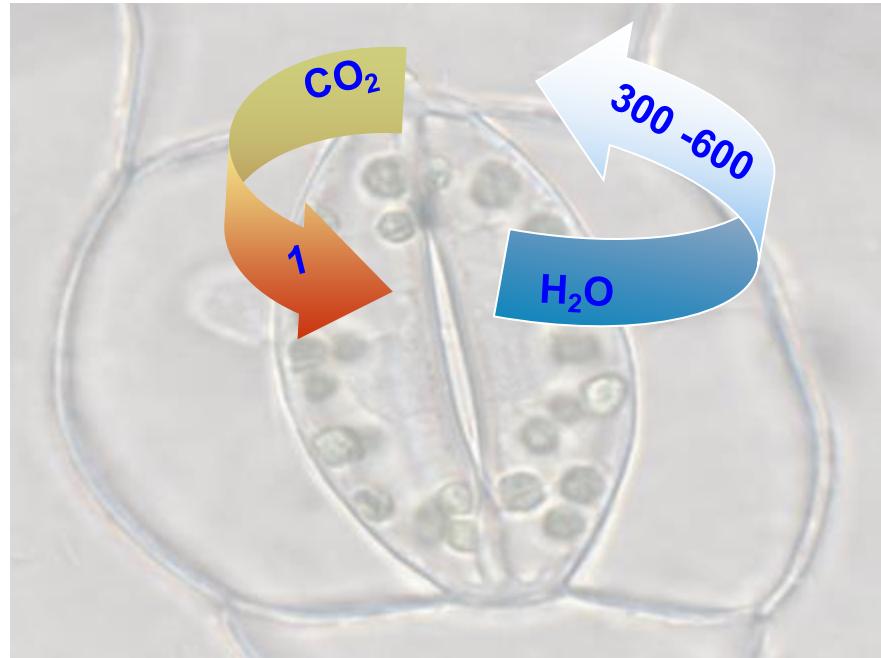
Light

Dark  
 $\text{eCO}_2$



→ La conductance stomatique,  $gs$  ( $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ): taux d'échanges gazeux (absorption de  $\text{CO}_2$ ) et de transpiration à travers les stomates foliaires, déterminée par l'ouverture stomatique.

# La régulation de l'ouverture du pore optimise le flux de transpiration et la prise de CO<sub>2</sub> pour la photosynthèse.



## Water Use Efficiency

(Efficience d'utilisation de l'eau)

$$WUE = \frac{\text{Net CO}_2 \text{ uptake in mg}}{\text{H}_2\text{O loss (transpired) in g}}$$

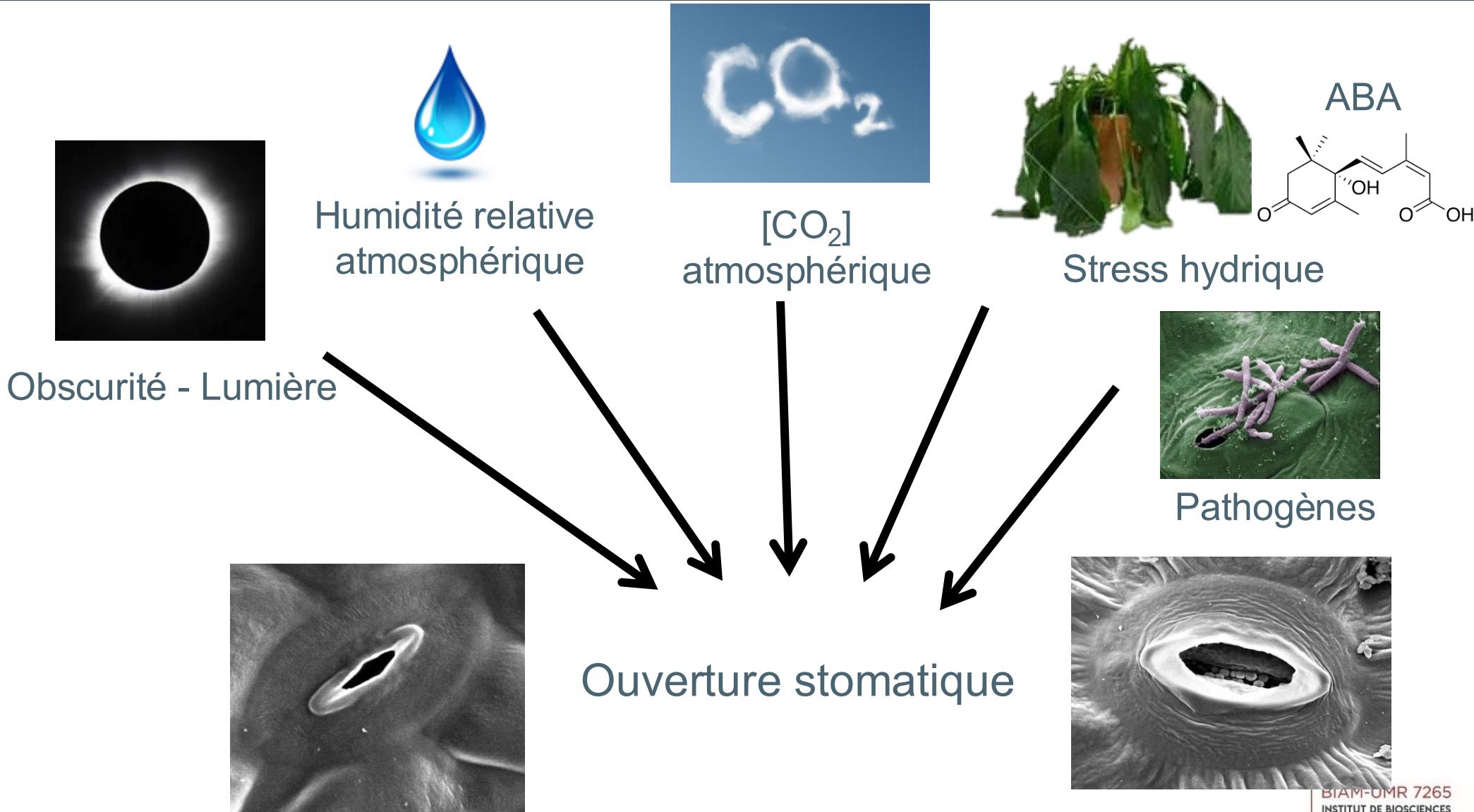
(Fisher and Turner, 1978)

$$WUE = \frac{\text{Dry matter or crop yield in kg}}{\text{Water used in evapotranspiration in m}^3}$$

(Teare et al., 1973)

- En réponse à un stress hydrique, la perte d'eau via le flux de transpiration peut être réduite rapidement (~30-60 min) et très efficacement (>90% de réduction) par la fermeture des stomates.

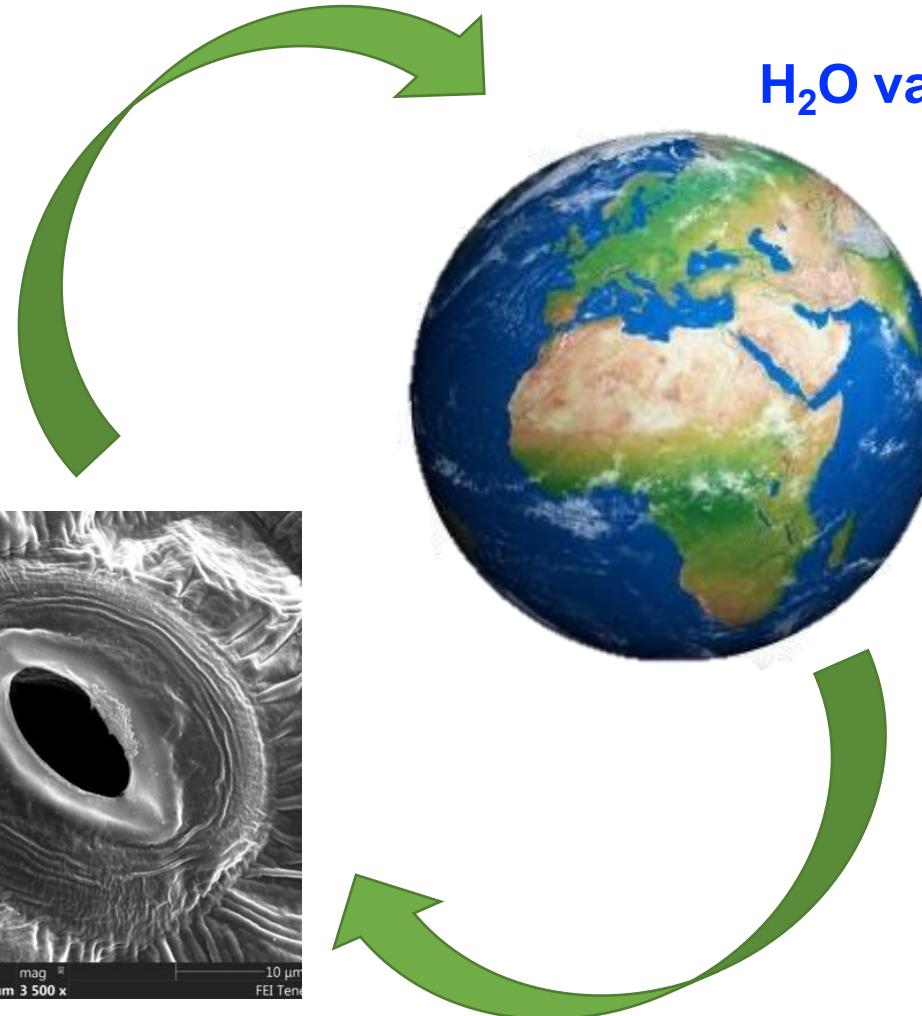
# Les Stomates répondent à divers signaux environnementaux



# Stomates et les cycles globaux du carbone et de l'eau

Evapotranspiration:  
35.000 Gt/an

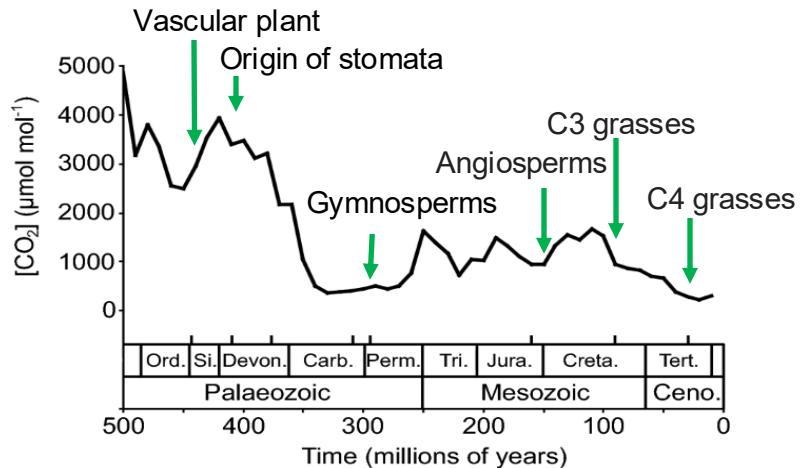
$\text{CO}_2$   
350-400 Gt/an



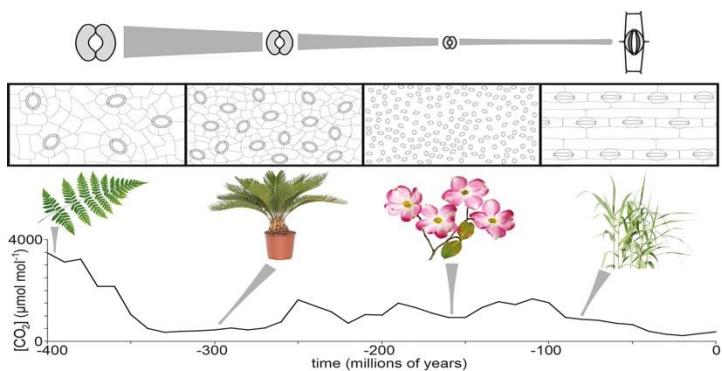
$\text{H}_2\text{O}$  vapeur d'eau atmosphérique):  
13.000 Gt ( $\text{km}^3$ )

a $\text{CO}_2$  (420ppm) :  
3.300 Gt

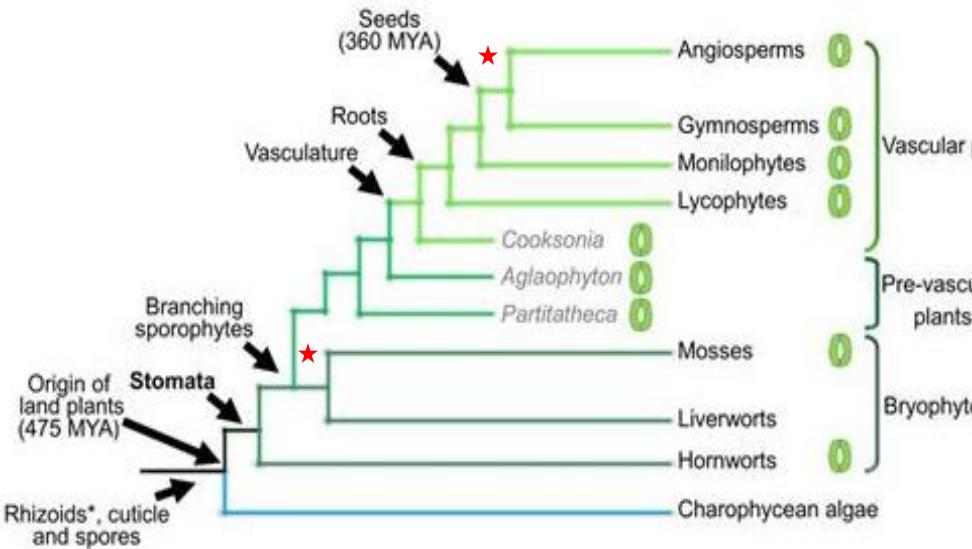
# De la formation à la fonction : le rôle central du CO<sub>2</sub> dans la régulation stomatique



Haworth, M. et al. (2021).



Haworth, M. et al. (2023).

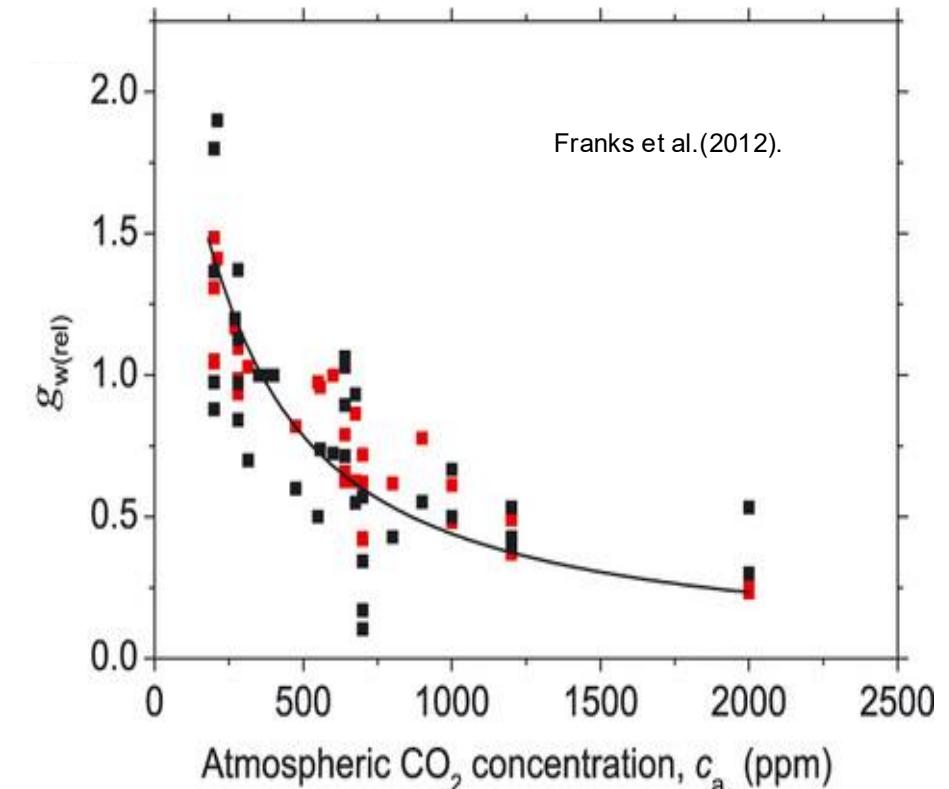
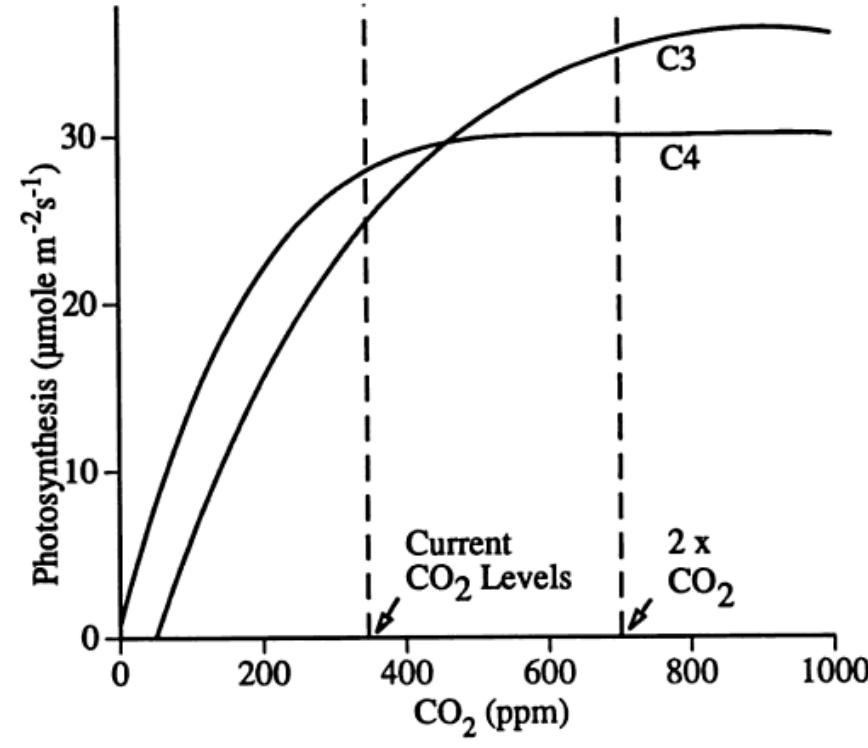
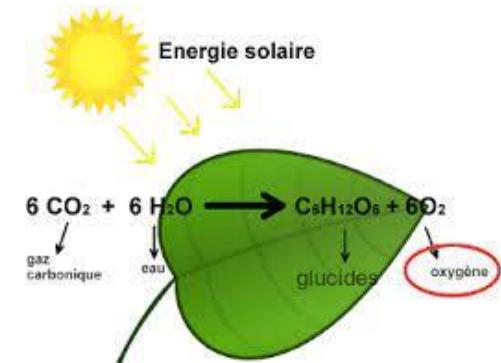


Modifié de plantstomata.wordpress.com

→ Comprendre comment la régulation stomatique a évolué lors de l'augmentation/diminution du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans l'histoire géologique est un défi pour prédire l'adaptation future.

Haworth et al. (2018).

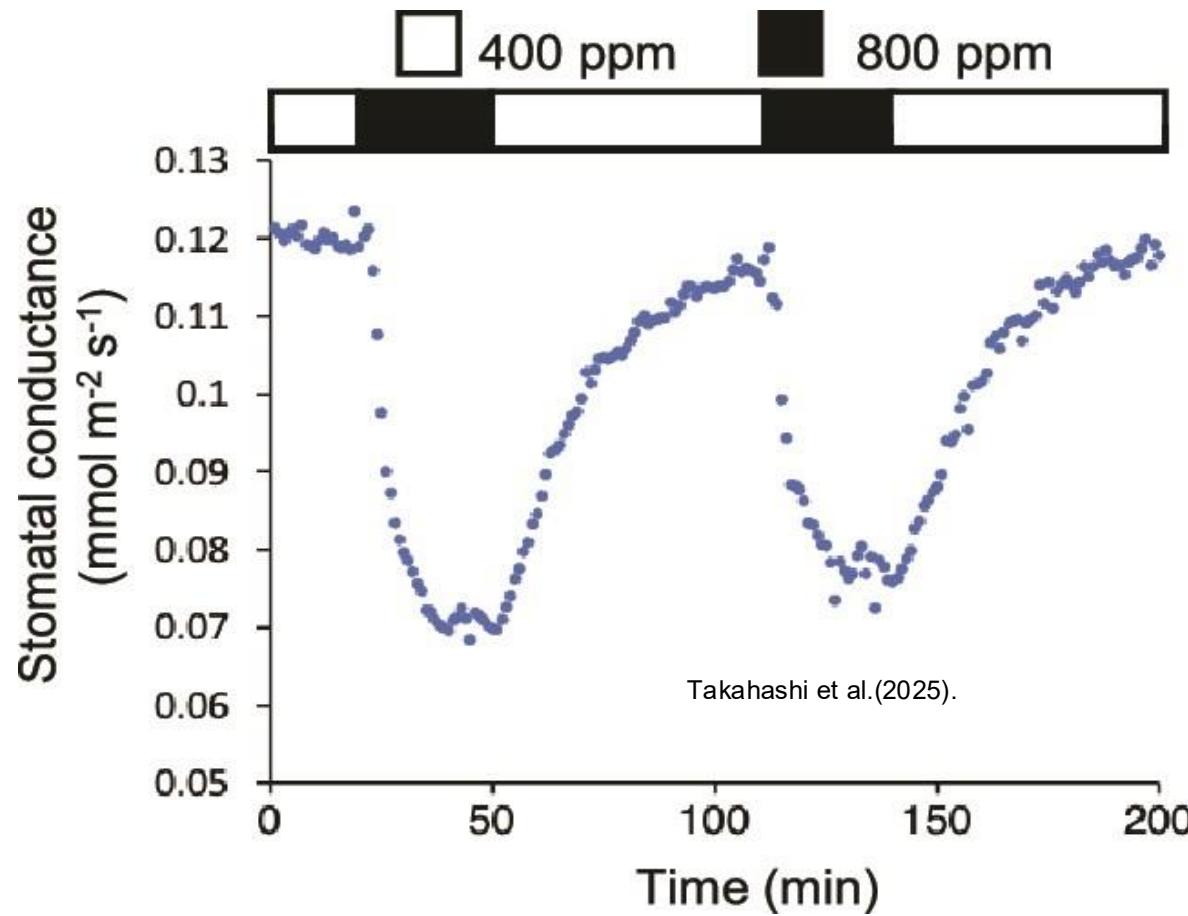
# Photosynthèse et conductance stomatique en réponse aux CO<sub>2</sub>



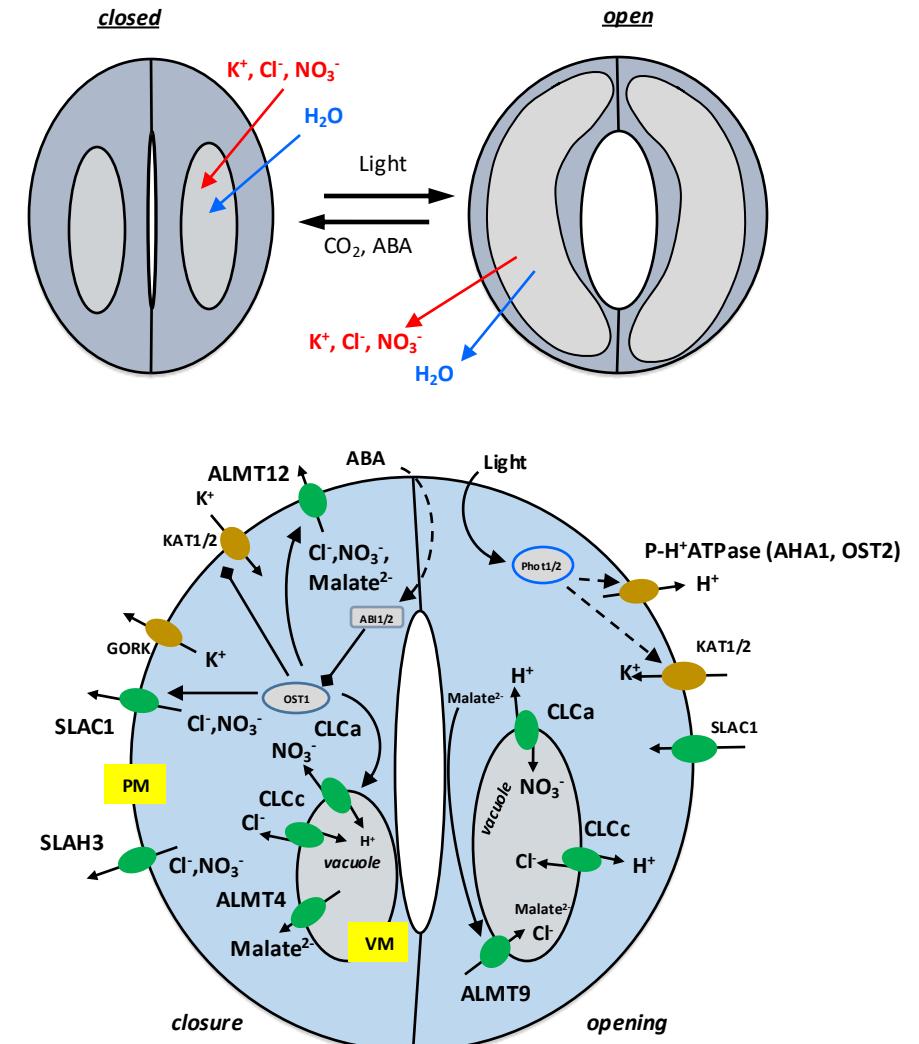
Kaiser & Drennen(1997).

→ Dialogue entre photosynthèse (mésophylle) et régulation stomatique ?

# Un mécanisme de perception du CO<sub>2</sub> rapide et réversible



(d'après revue Takahashi et al. 2025)

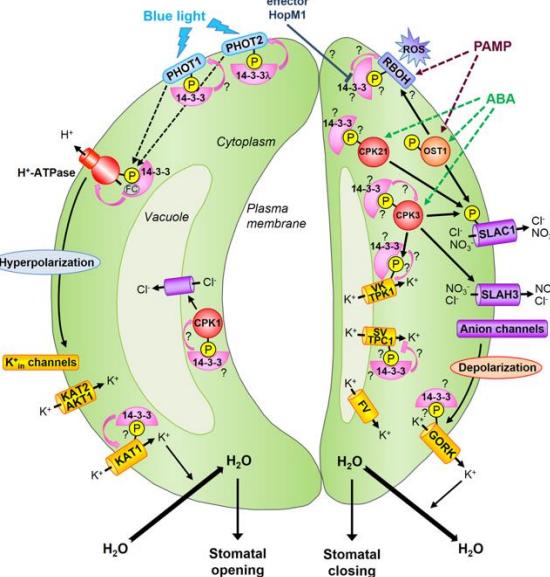


# Caractérisation des mécanismes physiologiques et moléculaires de la conductance stomatique

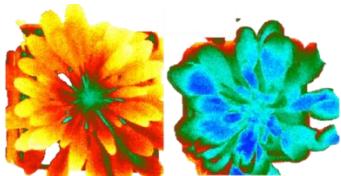
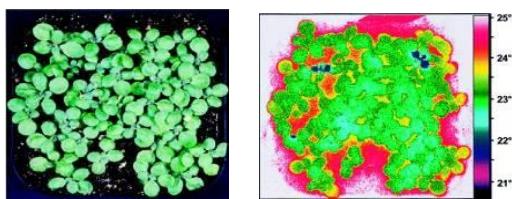
## ❖ Mécanismes physiologiques:



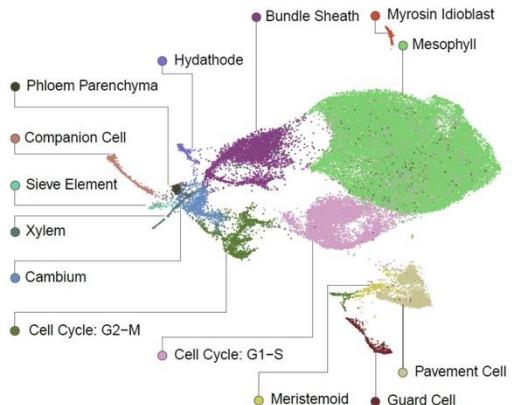
## ❖ Mécanismes moléculaires:



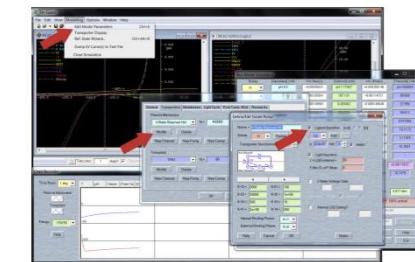
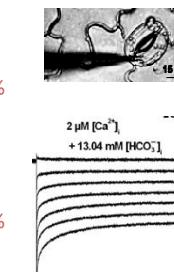
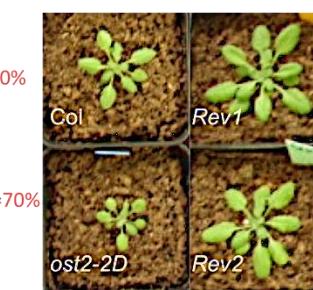
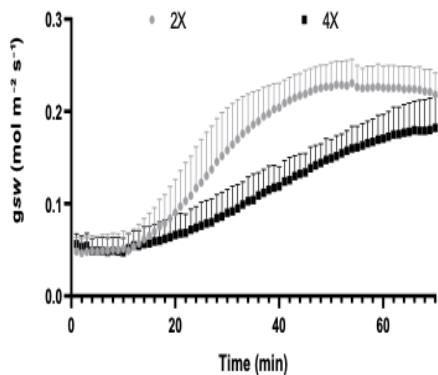
## Approches génétiques



## Approches transcriptomiques



## Identification des acteurs moléculaires



# Compréhension des mécanismes moléculaires

## ➤ Signalisation stomatique au CO<sub>2</sub> :

### ✓ Anhydrases carboniques $\beta$ CA1 et $\beta$ CA4

(Hu et al. 2010; Hu et al. 2015; Kolbe et al., 2018)

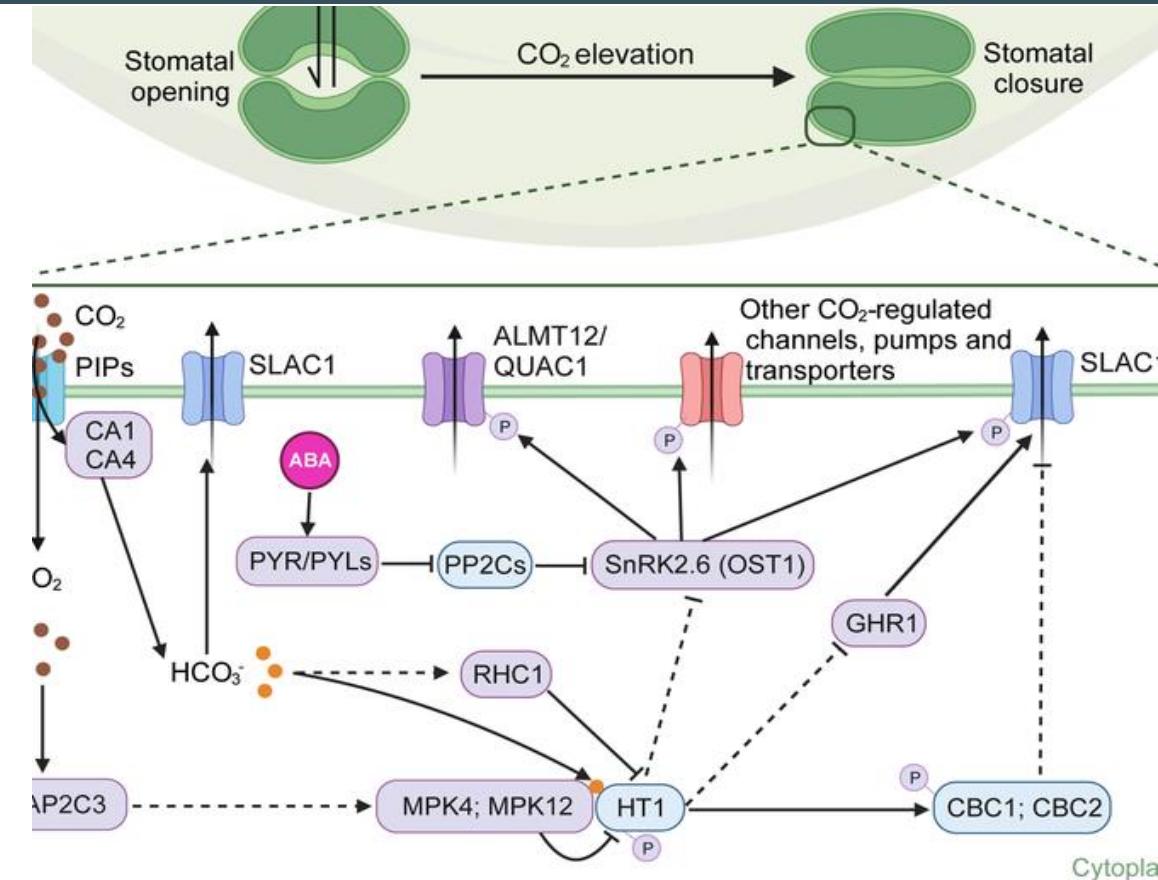
### ✓ Canal anionique SLAC

(Hu et al., 2010; Xu et al., 2011; Yamamoto et al., 2016; Zhang et al., 2018)

### ✓ Module HT1-MPK4/12

(Hashimoto et al., 2006; Hashimoto-Sugimoto et al., 2016; Horak et al., 2016; Takahashi et al., 2022; Jakobson et al., 2016; Toldsepp et al., 2018)

## → Senseur du CO<sub>2</sub> ?



(d'après revue Zhang et al. 2024)

# Compréhension des mécanismes moléculaires

## ➤ Signalisation stomatique au CO<sub>2</sub> :

### ✓ Anhydrases carboniques $\beta$ CA1 et $\beta$ CA4

(Hu et al. 2010; Hu et al. 2015; Kolbe et al., 2018)

### ✓ Canal anionique SLAC

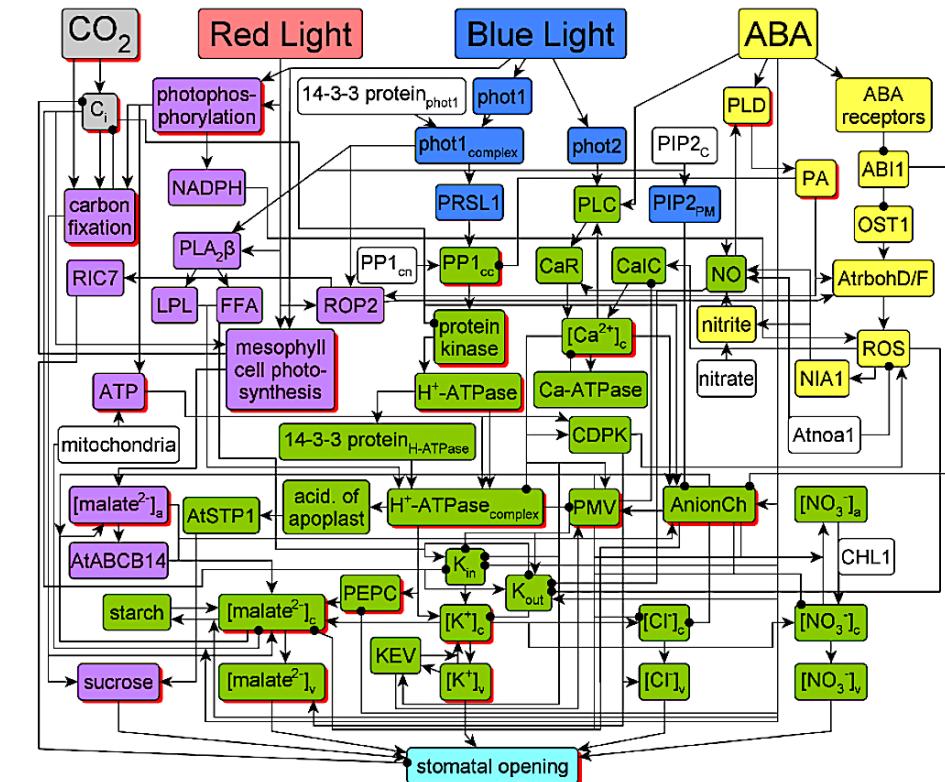
(Hu et al., 2010; Xu et al., 2011; Yamamoto et al., 2016; Zhang et al., 2018)

### ✓ Module HT1-MPK4/12

(Hashimoto et al., 2006; Hashimoto-Sugimoto et al., 2016; Horak et al., 2016; Takahashi et al., 2022; Jakobson et al., 2016; Toldsepp et al., 2018)

➡ Senseur du CO<sub>2</sub> ?

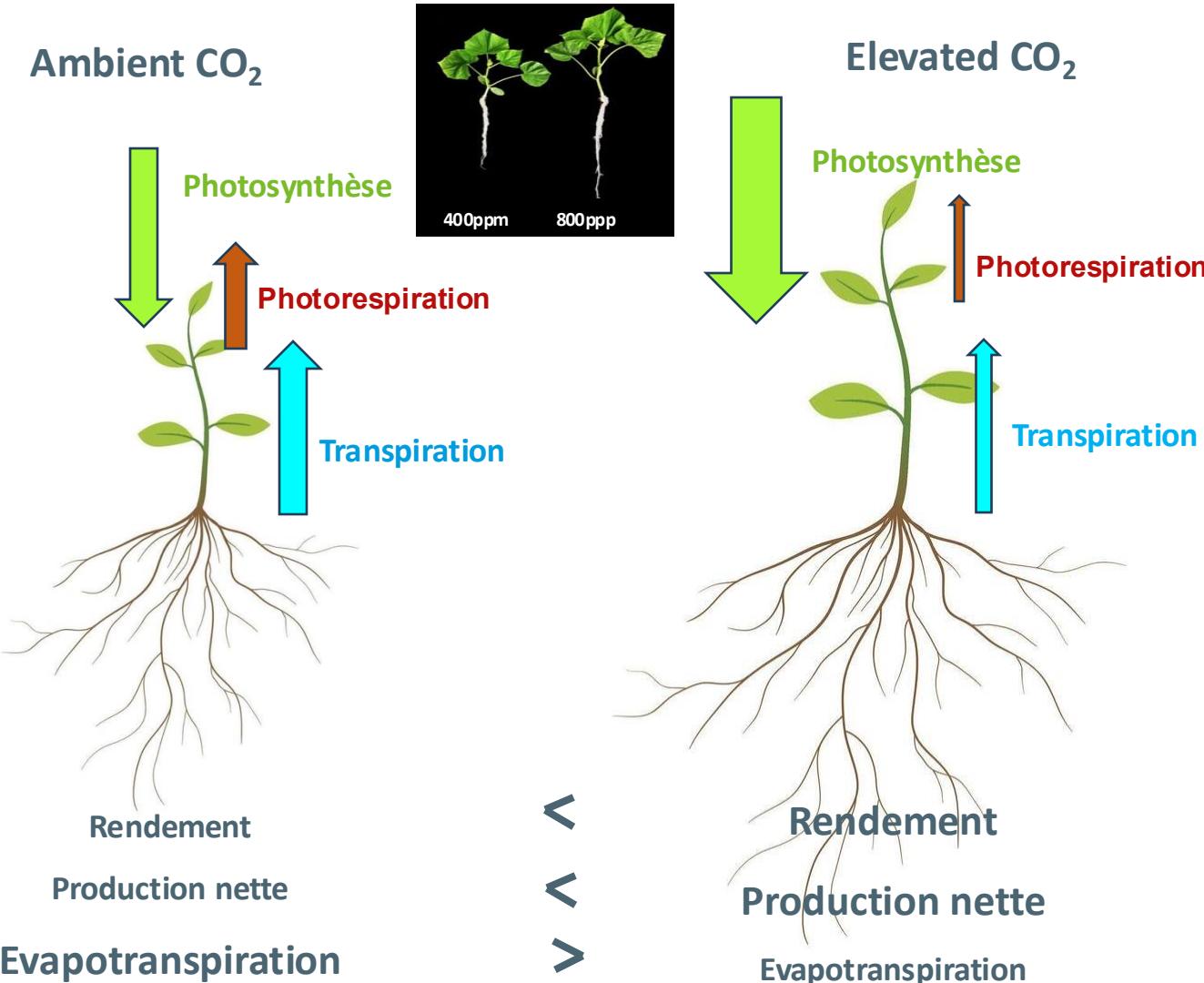
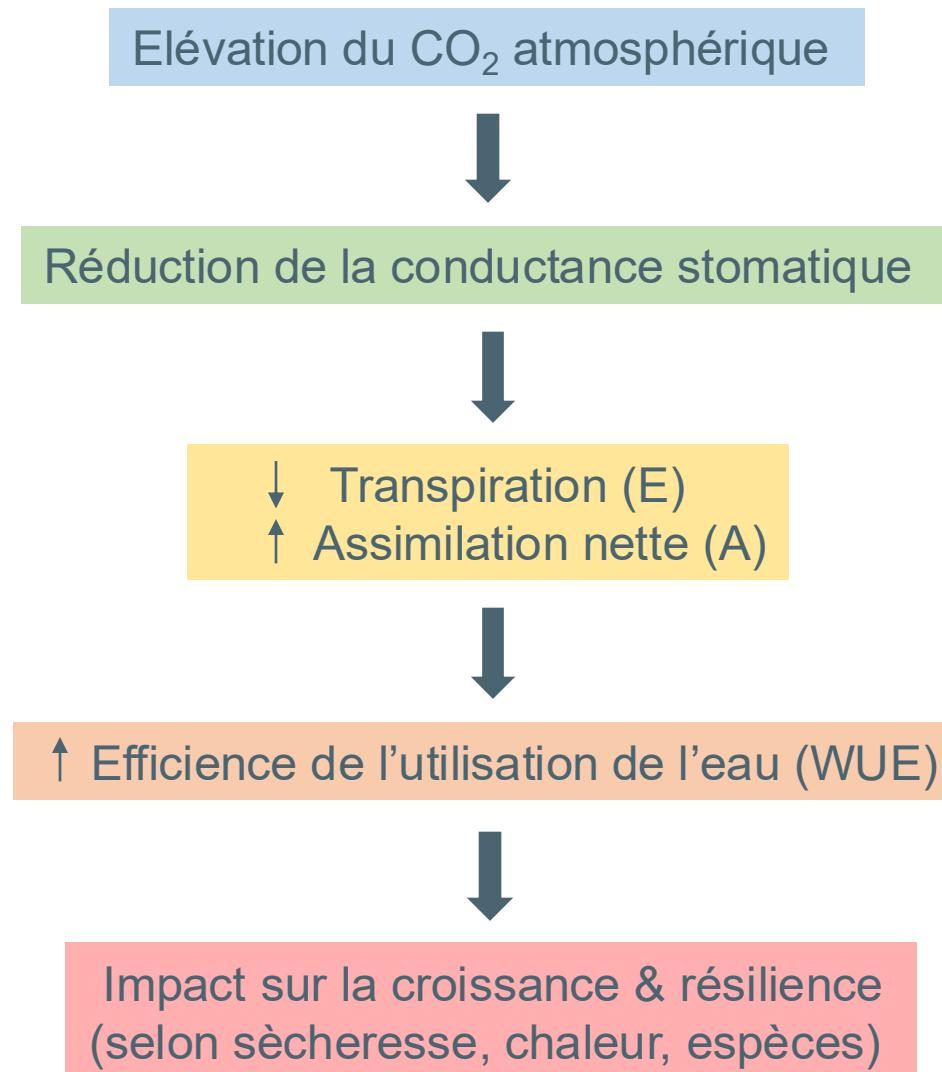
➡ Interaction avec les autres voies de signalisation:  
ABA, lumière ... ?



(d'après revue Gan & Albert. 2016)

➤ Interaction avec le métabolisme : le lien direct entre la perception du CO<sub>2</sub> dans les cellules de garde et les flux de sucres, d'ions et de métabolites est encore mal compris.

# De la signalisation au contrôle physiologique



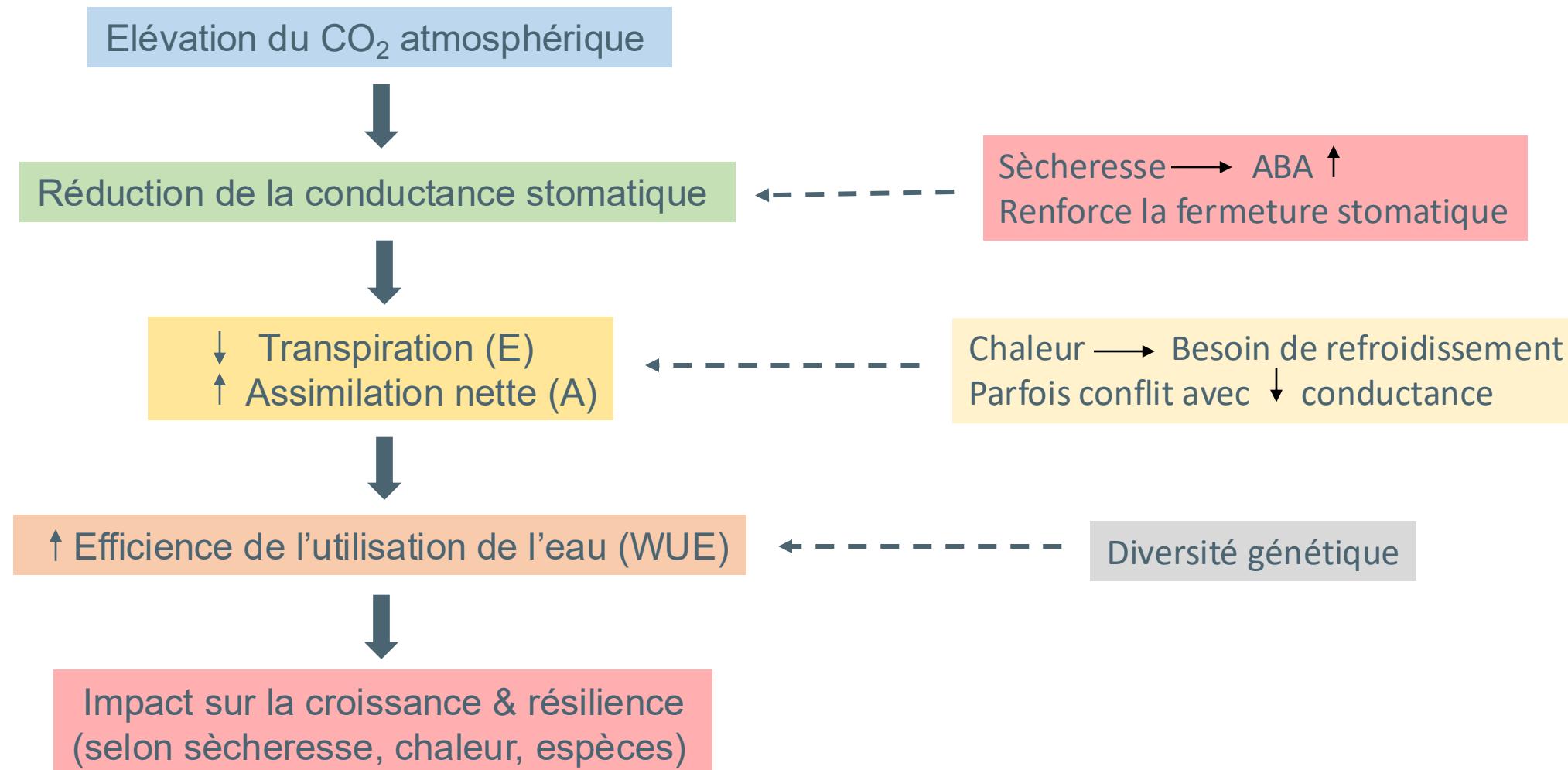
# Quelques exemples ...

Espèce / type	Conditions expérimentales	Effets sur gs	Effets sur A	Impact sur iWUE/WUE	Référence
<i>Arabidopsis thaliana</i> (C <sub>3</sub> )	700 ppm vs 400 ppm CO <sub>2</sub>	↓ 30–40 %	↓ ~10 %	+25–35 % iWUE	Engineer <i>et al.</i> , 2016
Blé tendre ( <i>Triticum aestivum</i> , C <sub>3</sub> )	700 ppm vs 400 ppm CO <sub>2</sub>	↓ 25–35 %	↑ 10–20 %	+30–40 % iWUE	Leakey <i>et al.</i> , 2009
Tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> , C <sub>3</sub> )	700 ppm vs 400 ppm CO <sub>2</sub>	↓ ~20–30 %	↑ ~10–15 %	+20–25 % WUE	Wang <i>et al.</i> , 2024
Orge ( <i>Hordeum vulgare</i> , C <sub>3</sub> )	700 ppm vs 400 ppm CO <sub>2</sub>	↓ 20–30 %	↑ ~10–15 %	+20–30 % iWUE	Merilo <i>et al.</i> , 2019
Plantes C <sub>4</sub> (Sorgho, Maïs)	700 ppm vs 400 ppm CO <sub>2</sub>	↓ 10–15 %	Photosynthèse saturée	Gain limité <10 % WUE	Leakey <i>et al.</i> , 2006

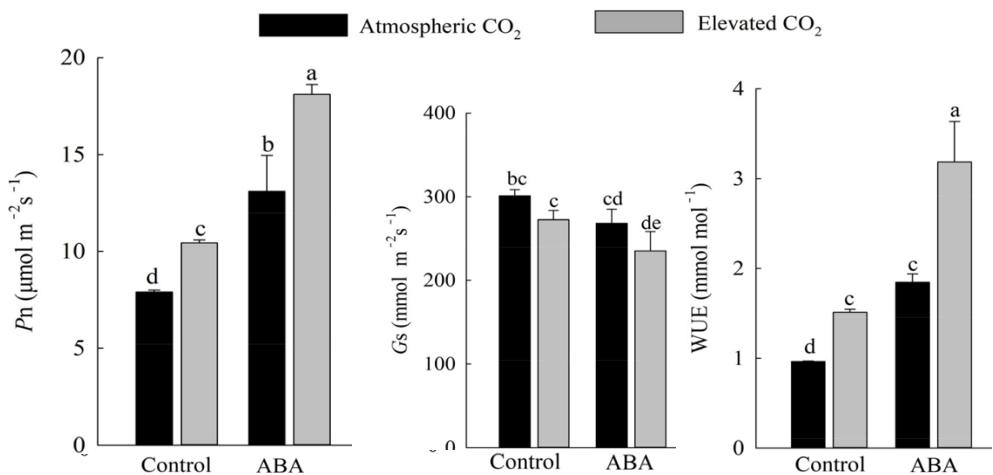
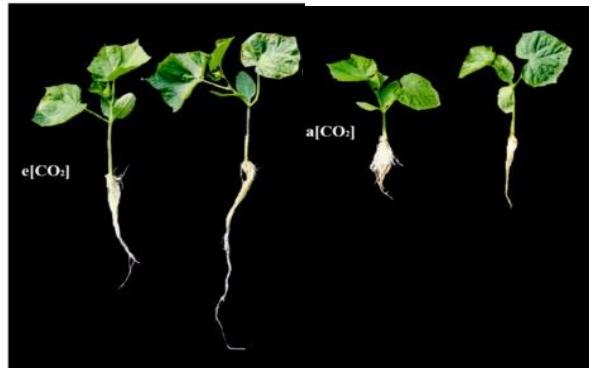
→ Chez les C<sub>3</sub>, e[CO<sub>2</sub>] : ↓ gs de 20–40 % , ↑ d'assimilation de 10–20 %  
 ↑ WUE de 20–40 %. assimilation

→ Chez les C<sub>4</sub>, l'effet est beaucoup plus limité, car la photosynthèse est déjà saturée en CO<sub>2</sub>.

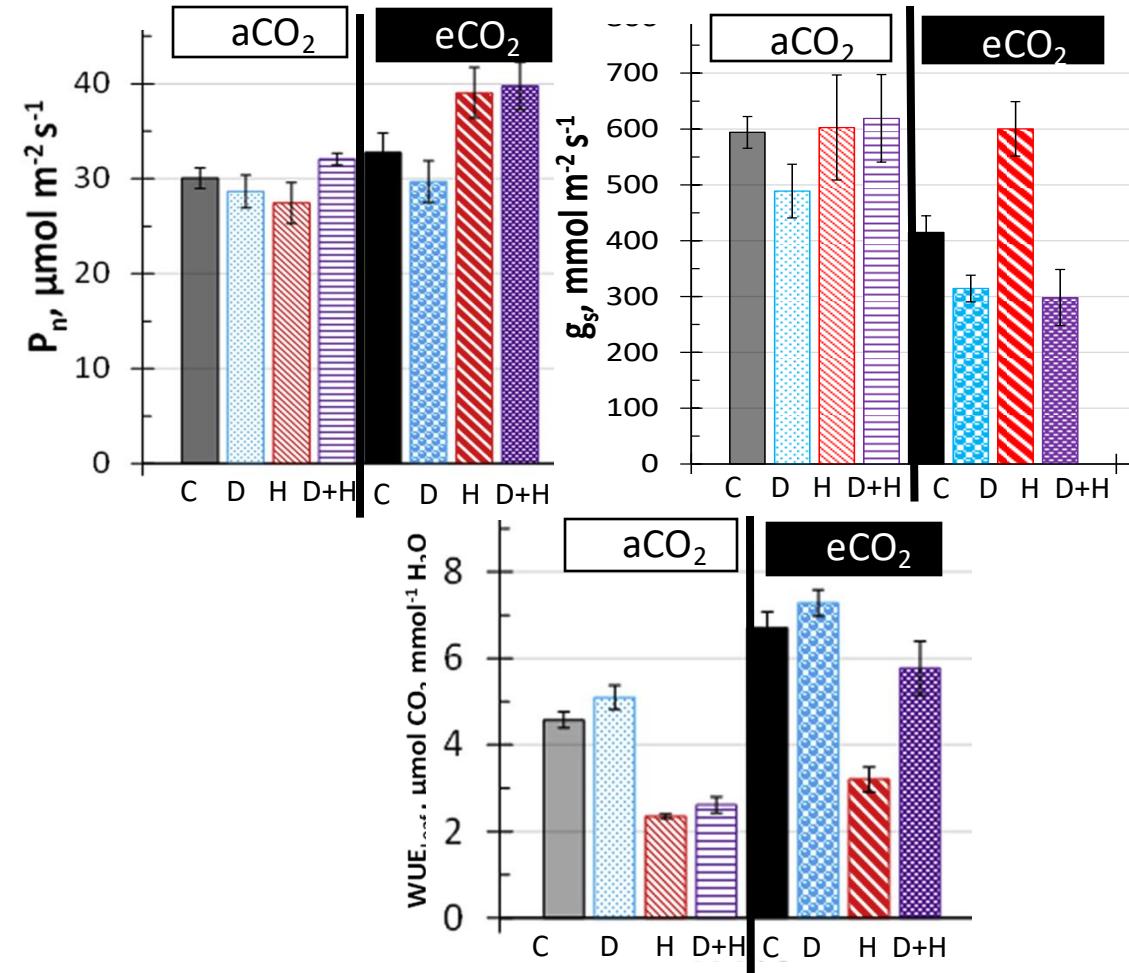
# Effets des multiples stress ....



# Effets des multiples stress ....



(Li et al., 2020)



(Abdelhakim et al., 2021)

→ En stress hydrique, le bénéfice d'e[CO<sub>2</sub>] est souvent amplifié

# Conclusion & Perspectives

- ✓ **Les stomates** assurent la coordination entre l'assimilation de carbone, la transpiration et le contrôle thermique foliaire.
- ✓ **L'élévation du CO<sub>2</sub> atmosphérique induit une réduction de la conductance stomatique (gs)**, avec pour conséquence une augmentation apparente de iWUE.
  - ➡ L'ampleur et la durabilité de ce bénéfice dépendent fortement de l'espèce (C3, C4), du génotype et des conditions environnementales.
- ✓ **En conditions de stress combinés (sécheresse, chaleur)**: interactions entre les voies de signalisation du CO<sub>2</sub>, de l'ABA et d'autres signaux hydriques et thermiques
- ✓ **À long terme, les plantes présentent une acclimatation photosynthétique au eCO<sub>2</sub>** : ajustement de la capacité photosynthétique & remodelage métabolique qui pourrait réduire les gains initiaux en assimilation et en WUE.
- ✓ Améliorer l'intégration des réponses stomatiques et photosynthétiques dans les **modèles globaux de cycle du carbone et l'eau**.

# Merci pour votre attention

Nathalie Leonhardt

[nathalie.leonhardt@cea.fr](mailto:nathalie.leonhardt@cea.fr)

