



**HAL**  
open science

# Quelques éléments autour de la régulation du statut hydrique des plantes terrestres

Fabrice Besnard

► **To cite this version:**

Fabrice Besnard. Quelques éléments autour de la régulation du statut hydrique des plantes terrestres. Master. UE de Physiologie, ENS Lyon, France. 2024. hal-04721972

**HAL Id: hal-04721972**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04721972v1>**

Submitted on 4 Oct 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Master Biosciences – UE de base optionnelle S1  
**UE « Physiologie »**  
ENS Lyon - 3/10/2024



# Quelques éléments autour de la régulation du statut hydrique des plantes terrestres

# Quelques éléments autour de la régulation du statut hydrique des plantes

---

- 1) (Rappels ?) L'eau et les plantes terrestres : rôles, flux et notion d'équilibre hydrique
- 2) Étudier les flux d'eau dans la plante
- 3) Adaptations possibles au manque d'eau
- 4) Réflexions épistémologiques : c'est quoi la « physiologie » des plantes ?



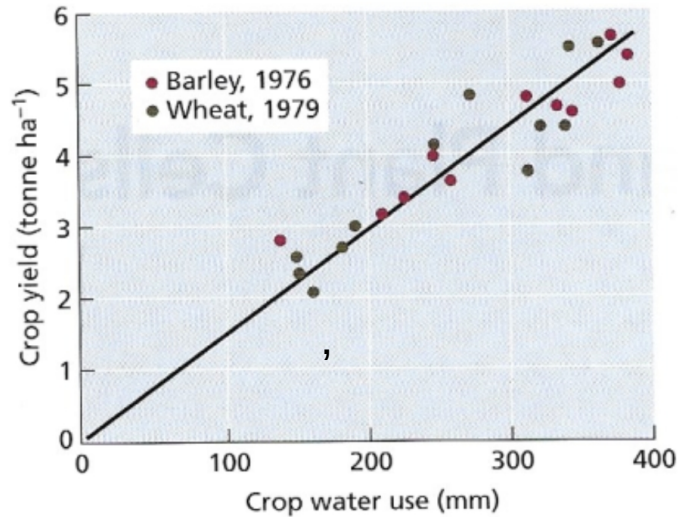
# Les besoins en eau de la plante : mise en évidence



# Les besoins en eau de la plante : mise en évidence

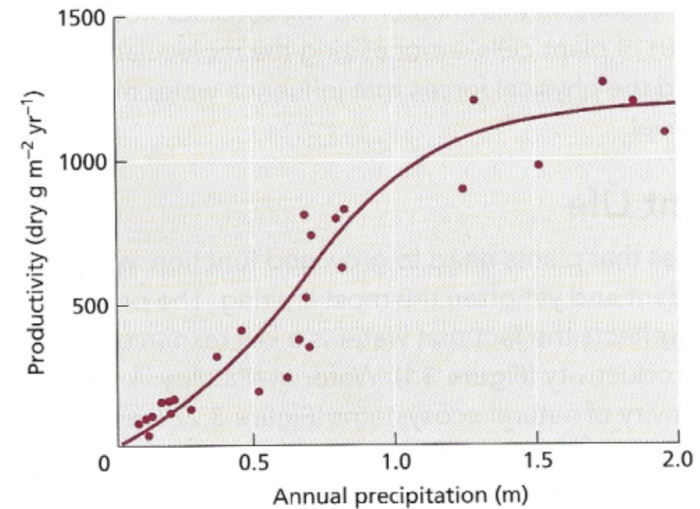
La disponibilité en eau soutient la **croissance** et **productivité végétale**, de la plante aux écosystèmes

Échelle « plante »



**Figure 3.1** Grain yield as a function of water used under a range of irrigation treatments for barley in 1976 and wheat in 1979 in southeastern England. (After Jones 1992; data from Day et al. 1978 and Innes and Blackwell 1981.)

Échelle « écosystème »



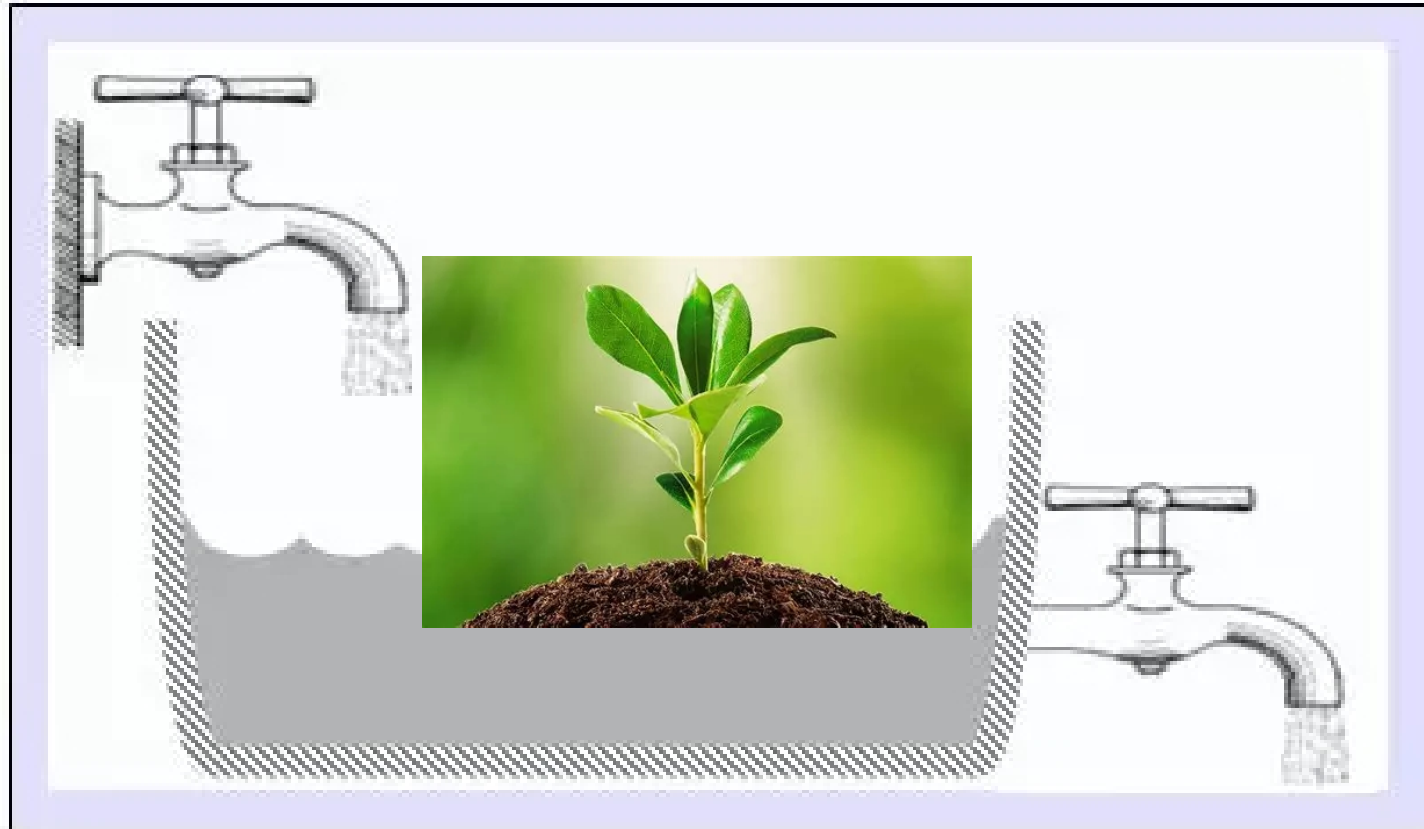
**Figure 3.2** Productivity of various ecosystems as a function of annual precipitation. Productivity was estimated as net aboveground accumulation of organic matter through growth and reproduction. (After Whittaker 1970.)

Les rôles de l'eau dans les plantes terrestres ?

# Les rôles de l'eau dans les plantes terrestres ?

- Solvant biologique (toutes les réactions chimiques, milieu intracellulaire)
- Liquide circulant dans la plante (sèves): transport des nutriments et molécules de signalisation
- Thermorégulation (transpiration)
- Hydrosquelette
- Solvant clé pour la nutrition minérale (apport de minéraux par les racines)
- Solvant clé pour les flux d'eau intra-plante (rend possible la mise en mouvement = **flux**, effet sur la croissance)

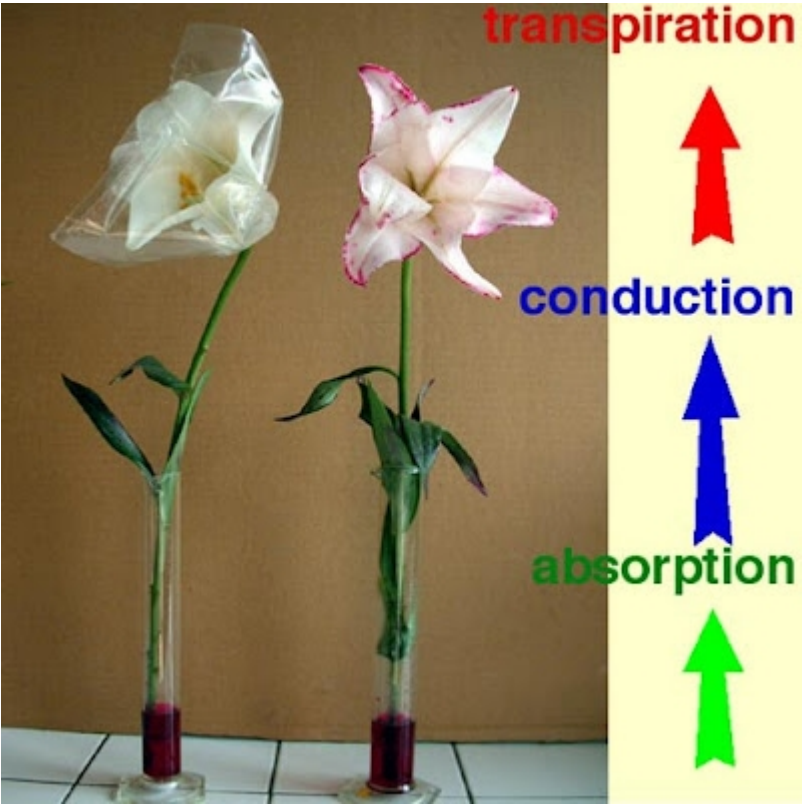
# Les plantes terrestres et l'eau : maintenir le stock tout en favorisant le flux





# Les flux d'eau dans la plante : mise en évidence

Exemple d'expérience classique à base de colorant vitaux :



# Les flux d'eau dans la plante : principe du potentiel hydrique

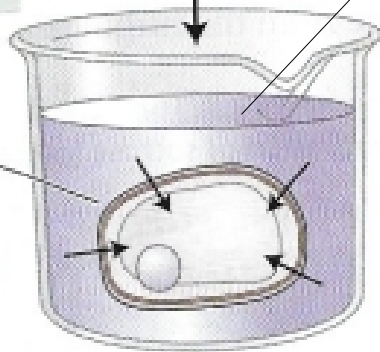
$$\psi = \psi_p + \psi_s (+ \psi_g)$$

À l'équilibre :

Flaccid cell

$\psi_p = 0 \text{ MPa}$   
 $\psi_s = -0.732 \text{ MPa}$   
 $\psi = -0.732 \text{ MPa}$

0.1M sucrose sol.  
 $\psi_s = -0.244 \text{ MPa}$



Cell after equilibrium

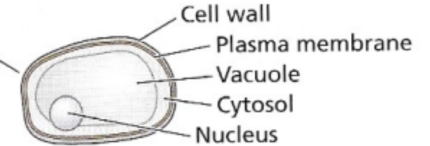
$\psi = -0.244 \text{ MPa}$   
 $\psi_s = -0.636 \text{ MPa}$   
 $\psi_p = \psi - \psi_s = 0.392 \text{ MPa}$

(pression de turgescence équilibre la pression osmotique)

Choc osmotique :

Turgid cell

$\psi_p = -0.244 \text{ MPa}$   
 $\psi_s = -0.636 \text{ MPa}$   
 $\psi = 0.392 \text{ MPa}$



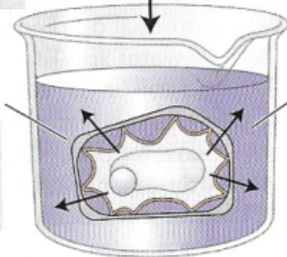
Cell after equilibrium

$\psi = -0.732 \text{ MPa}$   
 $\psi_s = -0.732 \text{ MPa}$   
 $\psi_p = \psi - \psi_s = 0 \text{ MPa}$

(la cellule se vide :  
 pression nulle)

0.3 M Sucrose solution

$\psi_p = 0 \text{ MPa}$   
 $\psi_s = -0.732 \text{ MPa}$   
 $\psi = -0.732 \text{ MPa}$

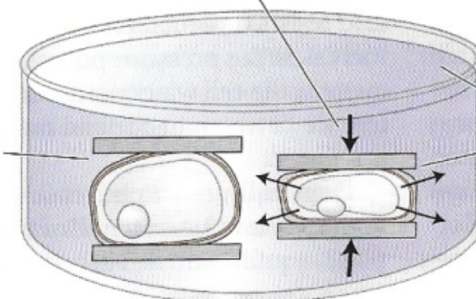


Choc pression :

(B) Pressure applied to cell

Applied pressure squeezes out half the water, thus doubling  $\psi_s$  from  $-0.732$  to  $-1.464 \text{ MPa}$

(l'eau sort, la pression osmotique augmente !)

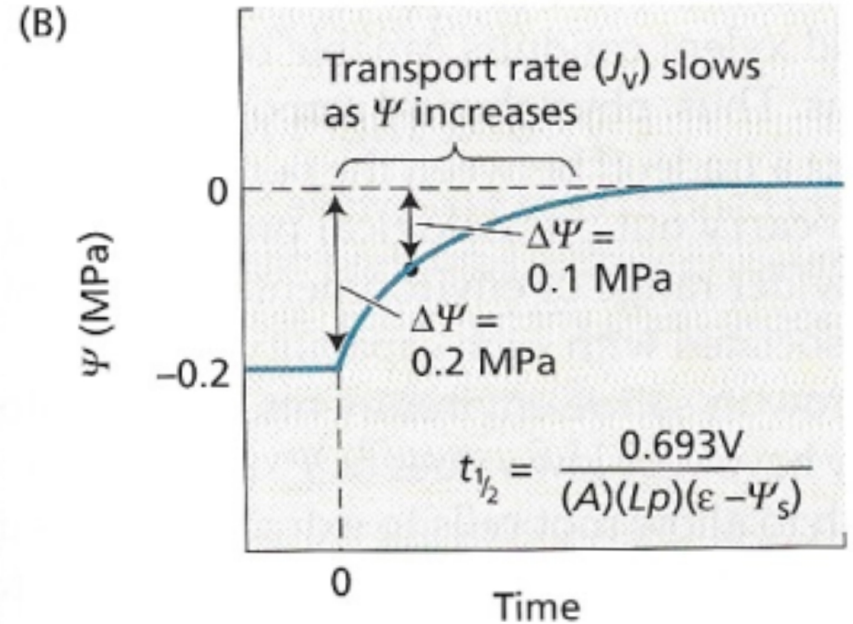
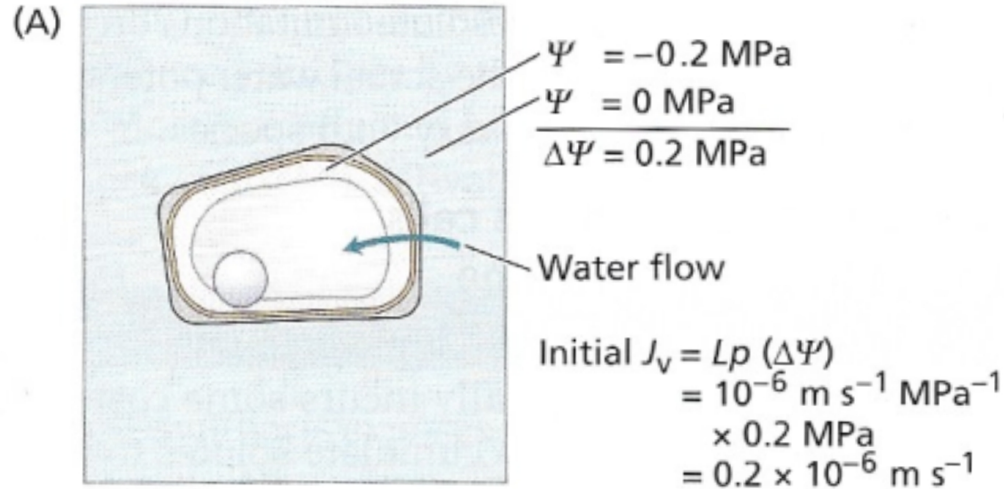


Cell in initial state  
 $\psi = -0.244 \text{ MPa}$   
 $\psi_s = -0.636 \text{ MPa}$   
 $\psi_p = \psi - \psi_s = 0.392 \text{ MPa}$

Cell in final state  
 $\psi = -0.244 \text{ MPa}$   
 $\psi_s = -1.272 \text{ MPa}$   
 $\psi_p = \psi - \psi_s = 1.028 \text{ MPa}$

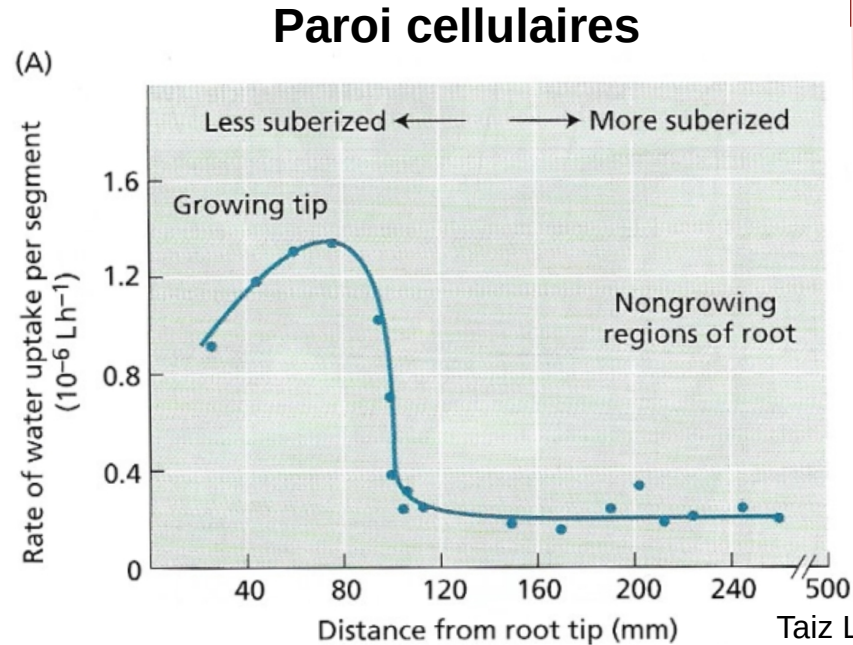
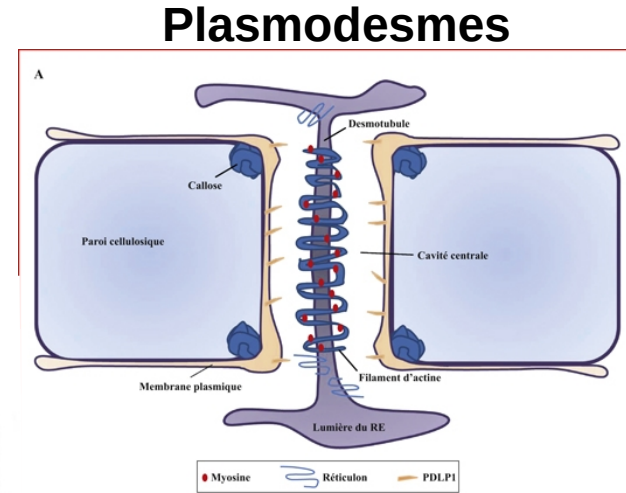
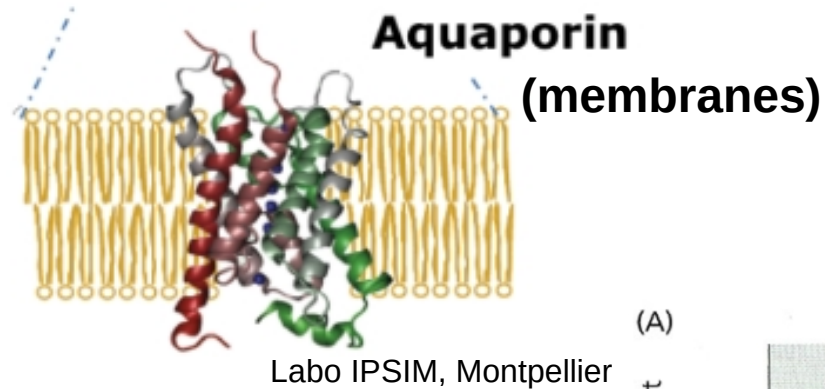
# Les flux d'eau dans la plante : principe du potentiel hydrique

## Notion de Flux ( $J_v$ ) et conductance hydraulique ( $L_p$ )

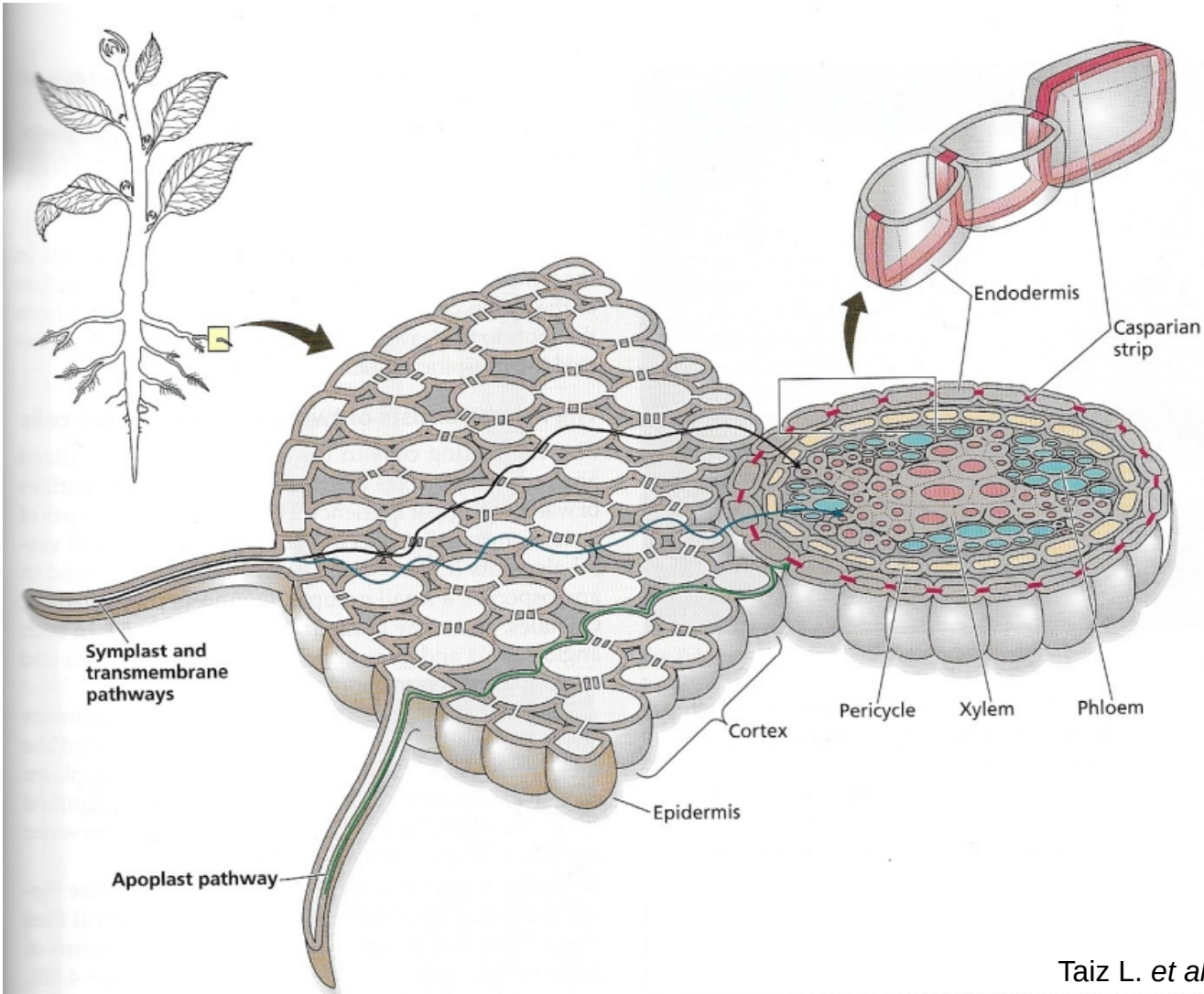


# Les flux d'eau dans la plante : transport cellule à cellule

Bases moléculaires, cellulaires et tissulaires de la conductivité hydraulique :



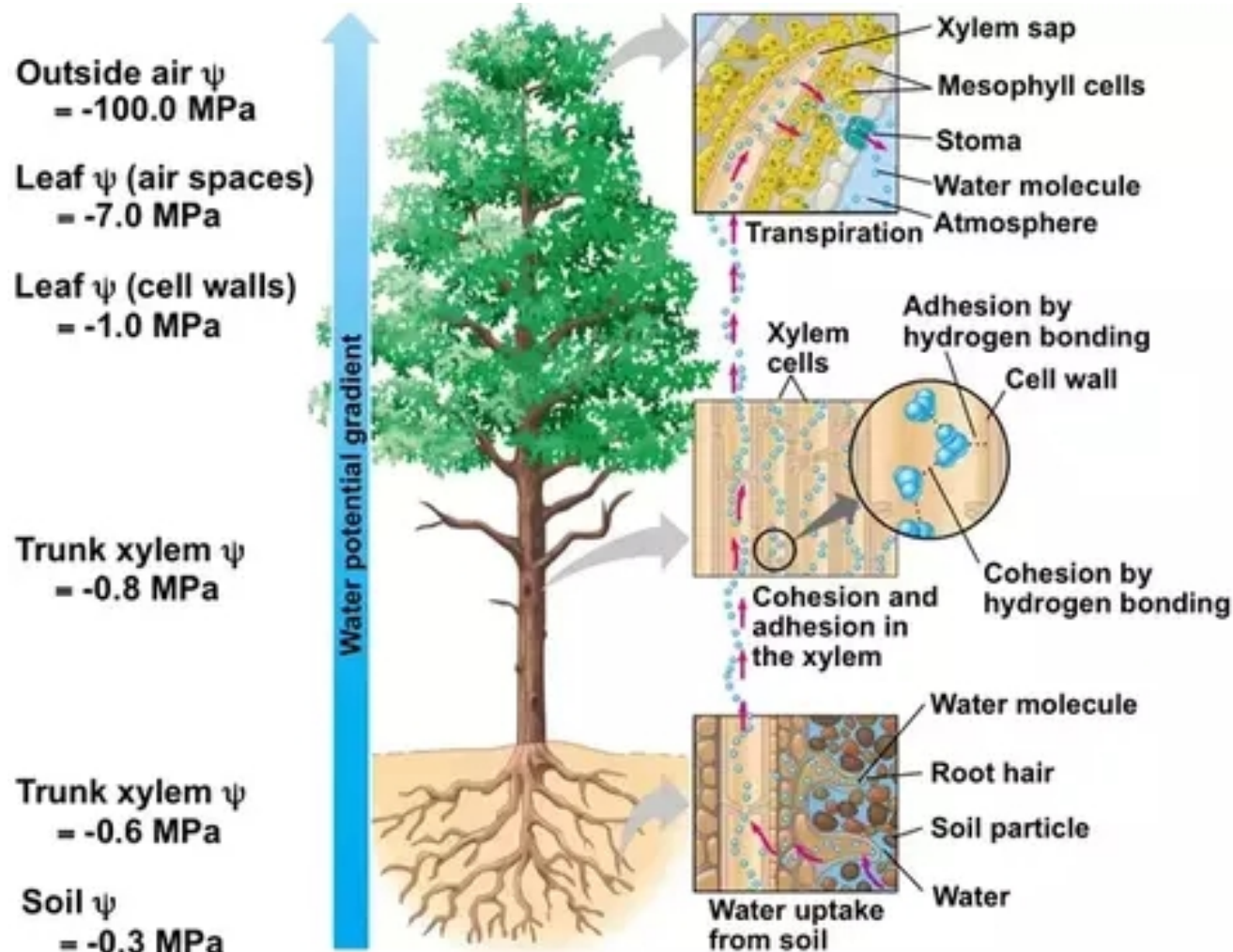
# Les flux d'eau dans la plante : L'absorption racinaire



## Notions clés :

- Poils racinaires
- Voie symplasmique
- Voie apoplasmique
- Endoderme et bande de Caspari (**subérine**, hydrophobe)

# Les flux d'eau dans la plante : le continuum sol-plante-atmosphère



Note:

1 bar = 0.098 MPa (~0.1 MPa)  
→ 100 MPa = 1000 fois la pression atmosphérique !

# Les flux d'eau dans la plante

Les énormes pressions liées à l'eau développées par les végétaux



SAPFLOW  
November through February  
up to **1069** liters H<sub>2</sub>O  
transpired per day

## Tallest Tree Species

- **112.87 m**, *Sequoia sempervirens* = coast redwood
- 99.4 m, *Pseudotsuga menziesii* = Douglas-fir
- 97.0 m, *Eucalyptus regnans* = mountain ash
- 96.6 m, *Picea sitchensis* = Sitka spruce
- 94.9 m, *Sequoiadendron giganteum* = giant sequoia

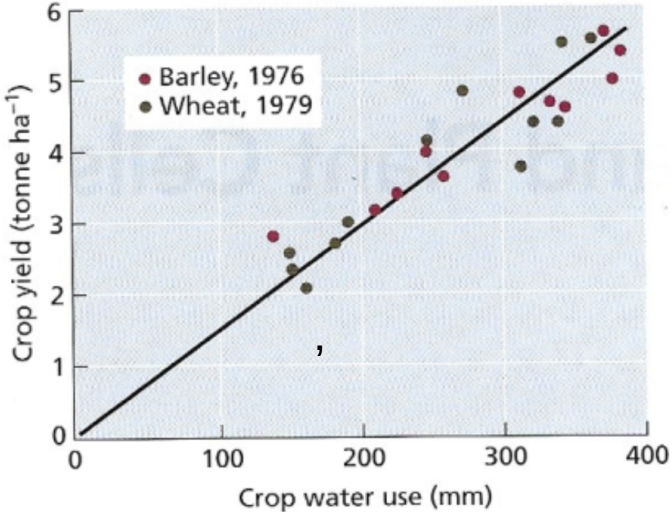
*Sequoia sempervirens*

100m → 9.81 bar = 0.98 MPa ~ 1MPa

$\psi = -100 \text{ MPa} \rightarrow 10\,000 \text{ m H}_2\text{O} !!$

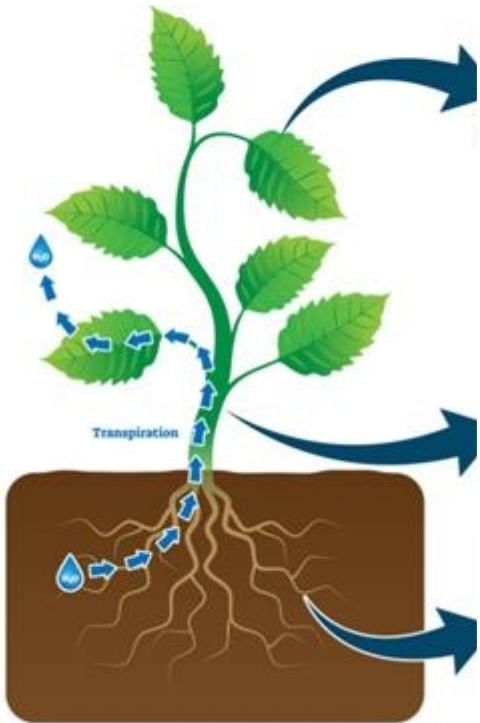
# Les flux d'eau et croissance : retour sur les bases physiologiques de cet effet

effet de l'eau sur la croissance



**Figure 3.1** Grain yield as a function of water used under a range of irrigation treatments for barley in 1976 and wheat in 1979 in southeastern England. (After Jones 1992; data from Day et al. 1978 and Innes and Blackwell 1981.)

## PLANT COHESION





# Le compromis transpiration foliaire et photosynthèse

Adaptations de la photosynthèse au milieu aride : moins de molécule d' $\text{H}_2\text{O}$  perdue par molécule de  $\text{CO}_2$  fixée (mais coût énergétique)

## PLANTES EN C4

séparation spatiale



Ex : Maïs, sorgho, mil, canne à sucre  
(beaucoup de graminées, pas exclusivement)

La fixation finale du  $\text{CO}_2$  dans des cellules spécialisées **loin des stomates**

(non traité dans ce cours)

## PLANTES de type CAM « crassulacean acid metabolism »

séparation temporelle



Ex : Crassulacées, Cactées, Euphorbes,

La fixation initiale du  $\text{CO}_2$  se fait **la nuit** (stomates ouverts) mais sa fixation finale se fait le jour (stomates fermés)

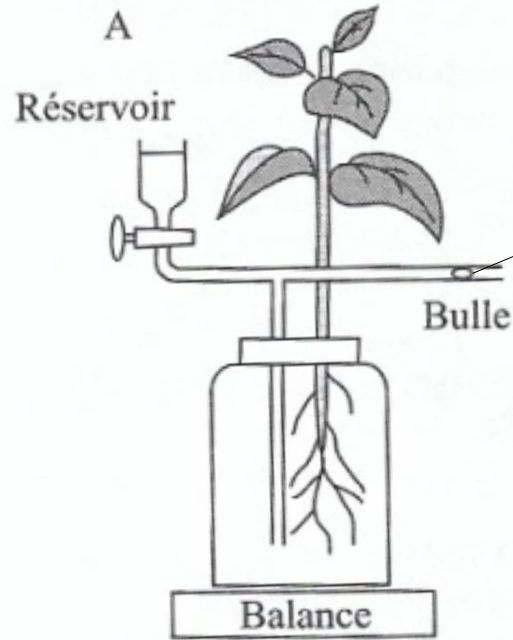
# Quelques éléments autour de la régulation du statut hydrique des plantes

---

- 1) (Rappels ?) L'eau et les plantes terrestres : rôles, flux et notion d'équilibre hydrique
- 2) Étudier les flux d'eau dans la plante
- 3) Adaptations possibles au manque d'eau
- 4) Réflexions épistémologiques : c'est quoi la « physiologie » des plantes ?



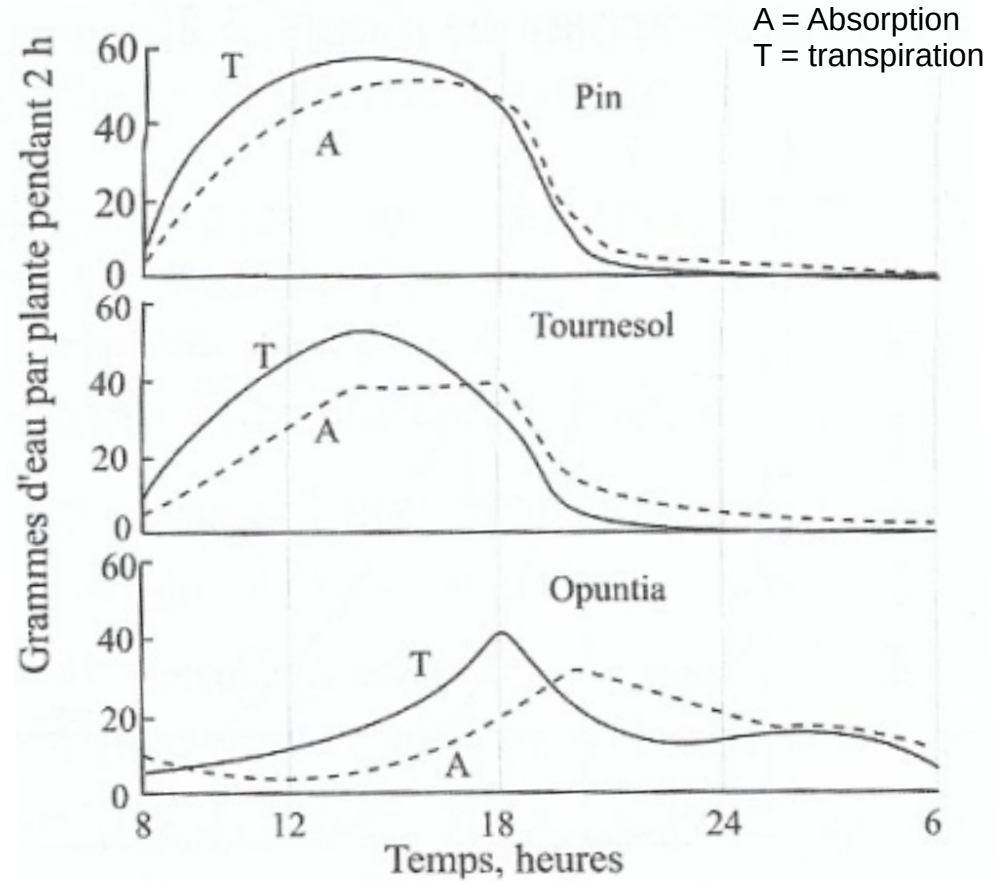
# Mesurer l'absorption racinaire et la transpiration



ménisque du capillaire : mesure de l'Absorption

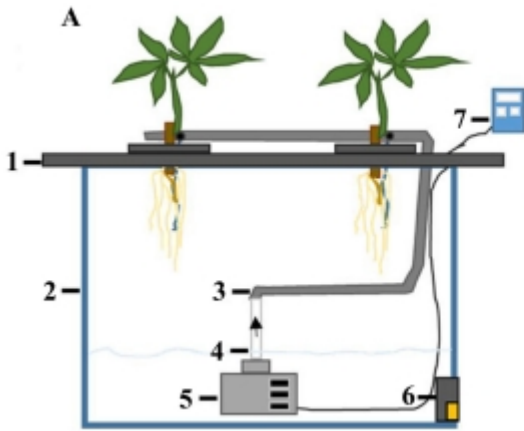
Le potomètre

pesée = → Transpiration



# Observer les racines

En 2D



Aeroponics

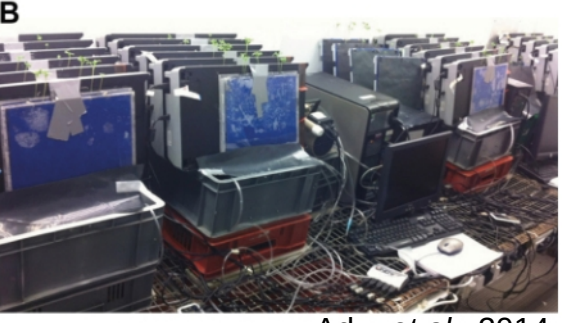
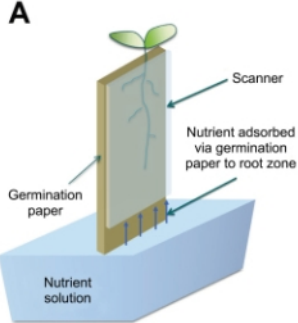
hydroponics



« pouch-and-wick »/ germination paper & agar systems



Rhizotron (sol)

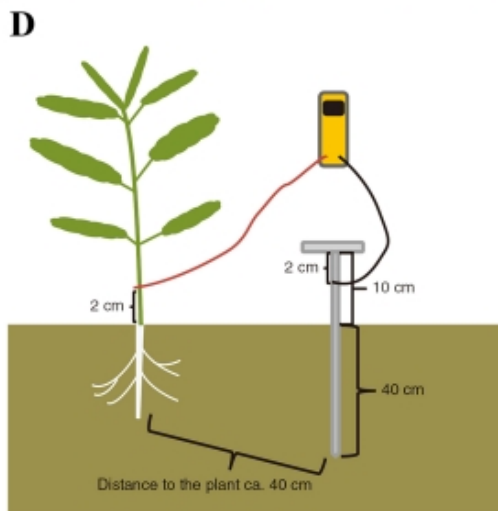
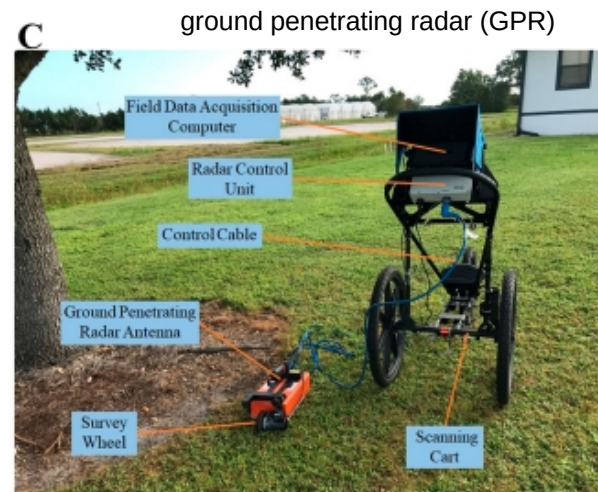
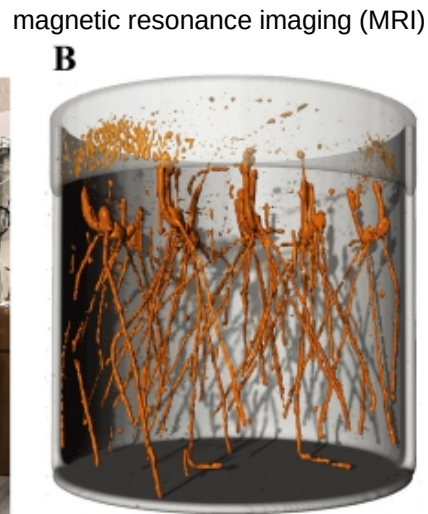
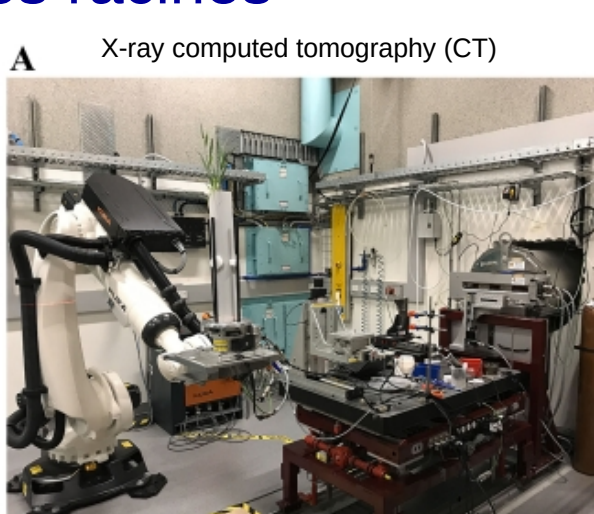


Adu. et al., 2014

Li A. et al., 2022

# Observer les racines

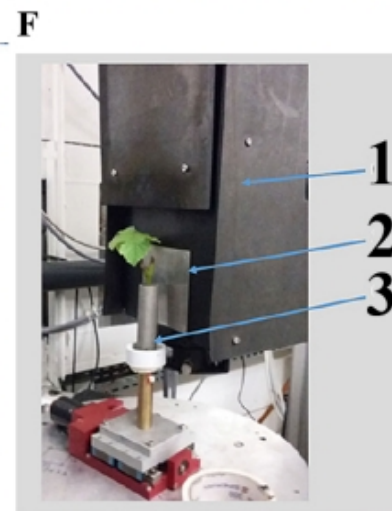
En 3D



electrical capacitance



electrical impedance tomography (EIT)



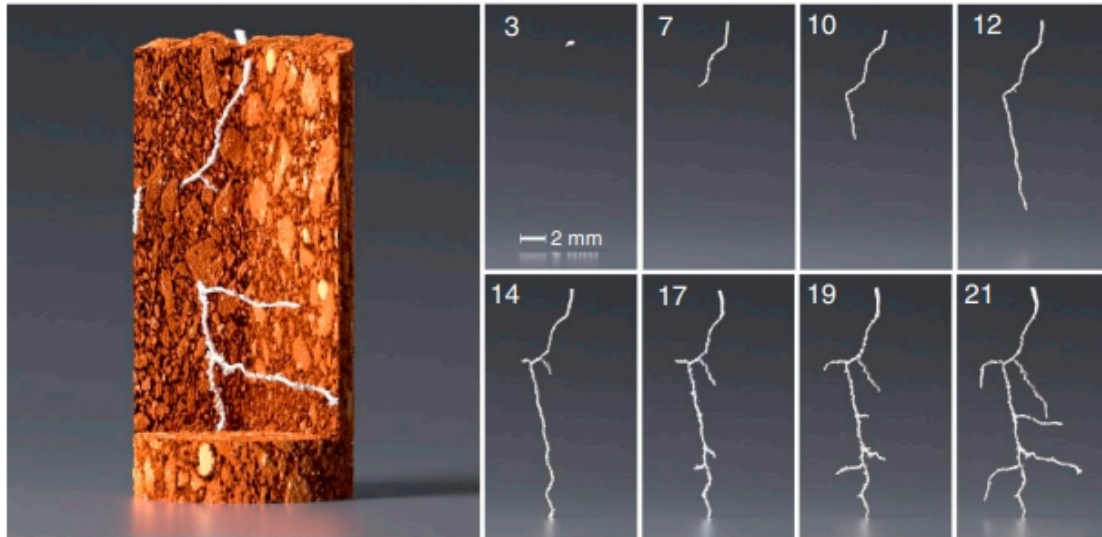
neutron tomography

# Observer les racines

## En 3D

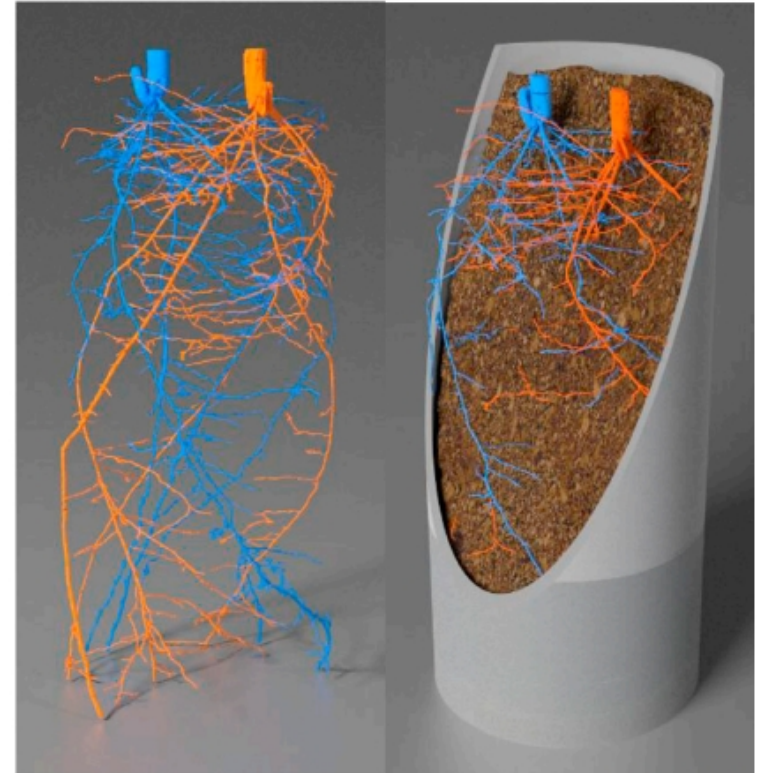
Zoom sur la **micro-tomographie aux rayons X** (« tomodensitométrie » ou « scanographie »)  
(X-ray Computed Tomography)

**B** X-ray CT time series of an *Arabidopsis thaliana* seedling growing in soil



Current Biology

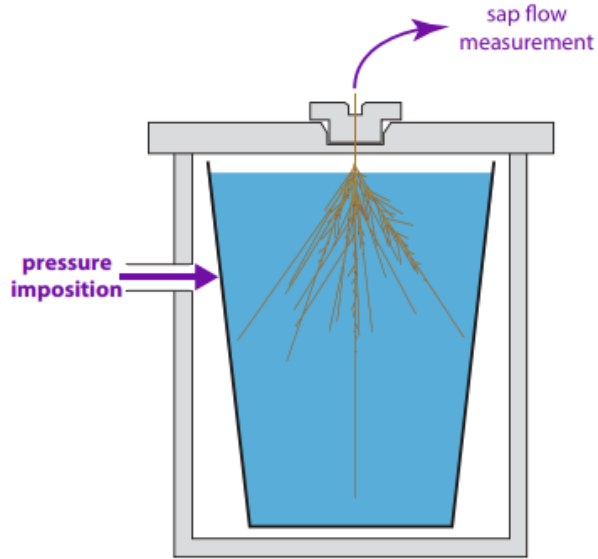
**D** X-ray computed tomography  
*Triticum aestivum*



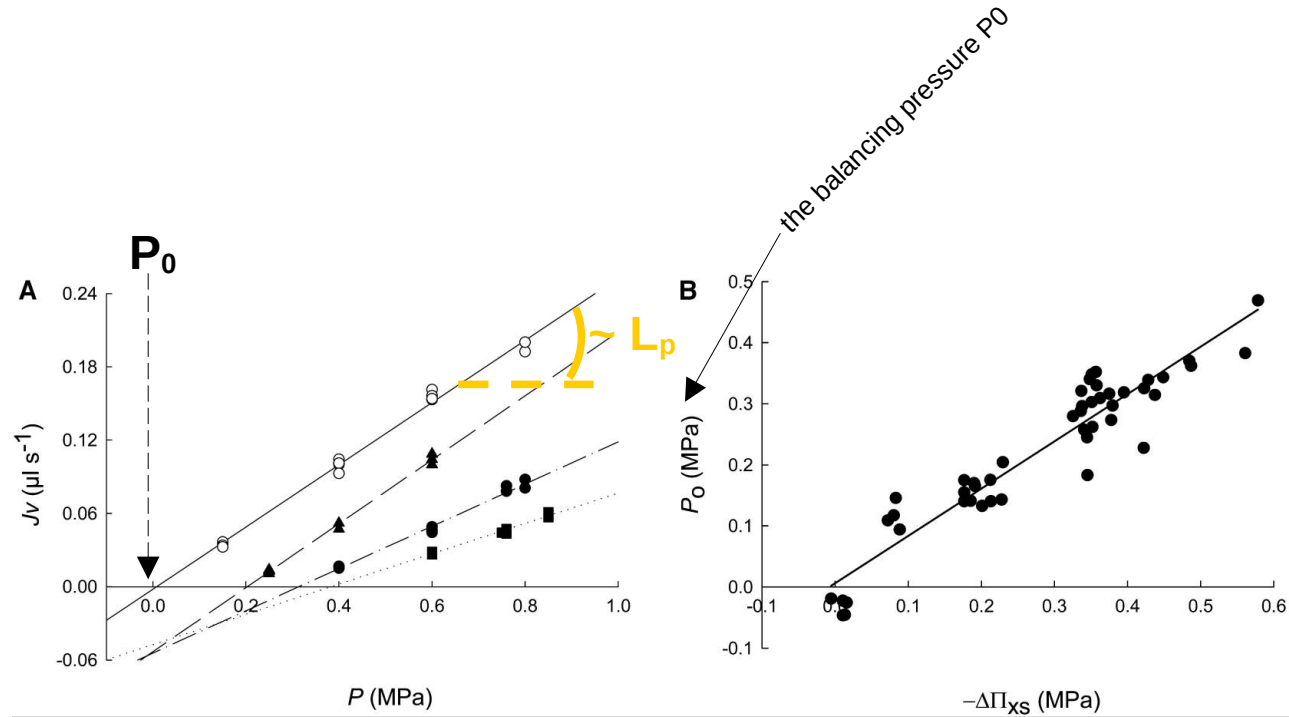
Current Biology

Morris E. et al., 2017

# Mesurer la conductivité racinaire



- Chambre à pression

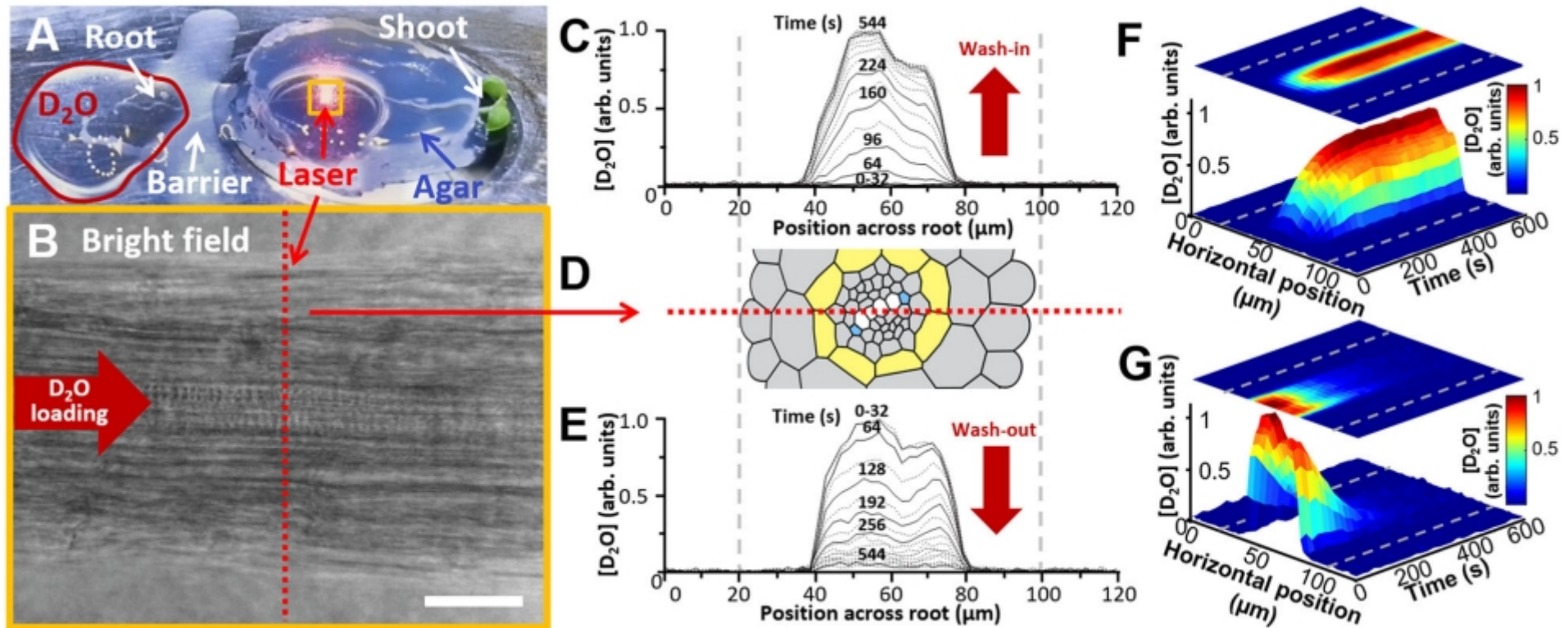


osmotic gradient present between xylem vessels and the root bathing solution ( $\Delta\Pi_{x-s}$ )

$$J_v = L_p(\Delta p - \sigma RT \Delta c_s)$$

# Observer et quantifier les flux d'eau dans la plante

## Micro-Spectroscopie de Raman (RMS)





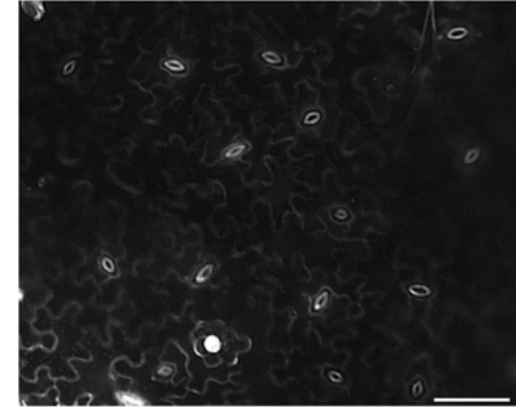
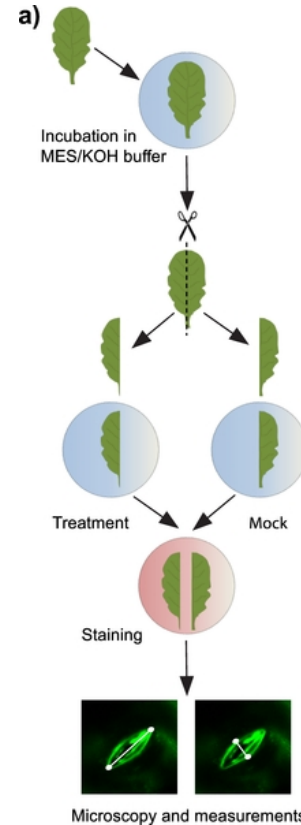
# Mesurer l'ouverture des stomates

## CULTURES DE FEUILLES *IN VITRO*

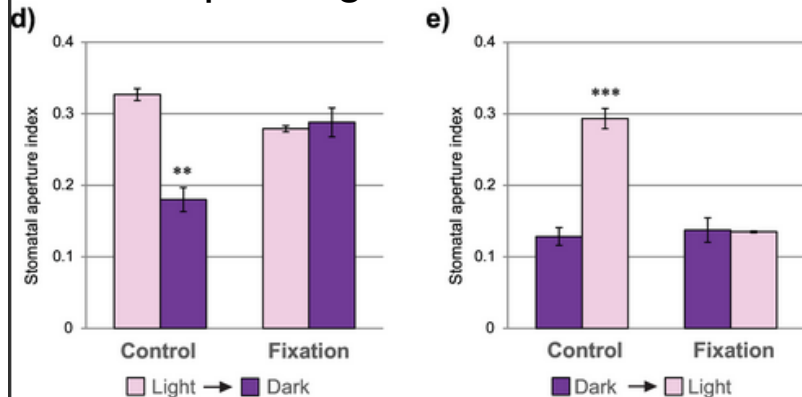
«epidermis peels»



Feuilles détachées « intactes »

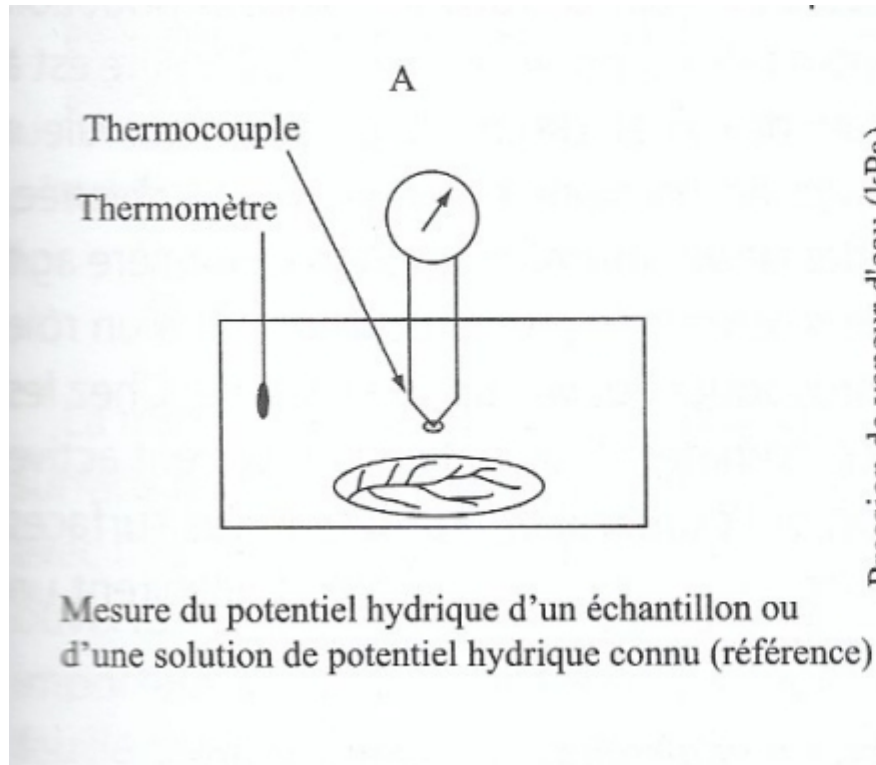


Fixation pour figer les stomates



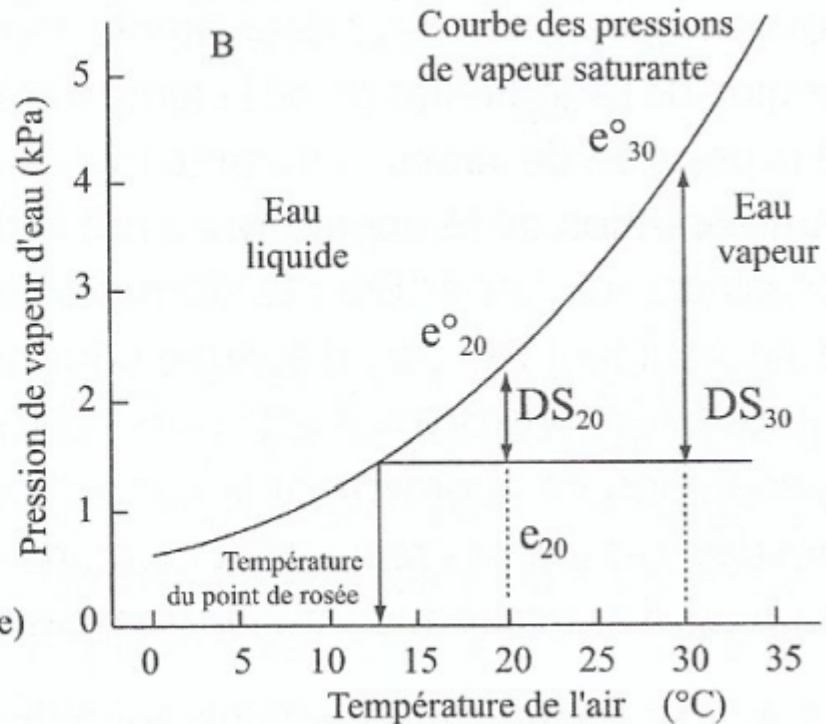
(1min 4 % formaldéhyde)

# Mesurer la transpiration foliaire de façon plus précise :



Le psychromètre (mesure l'humidité de l'air)

- le courant du thermocouple est fonction de l'humidité dans l'air

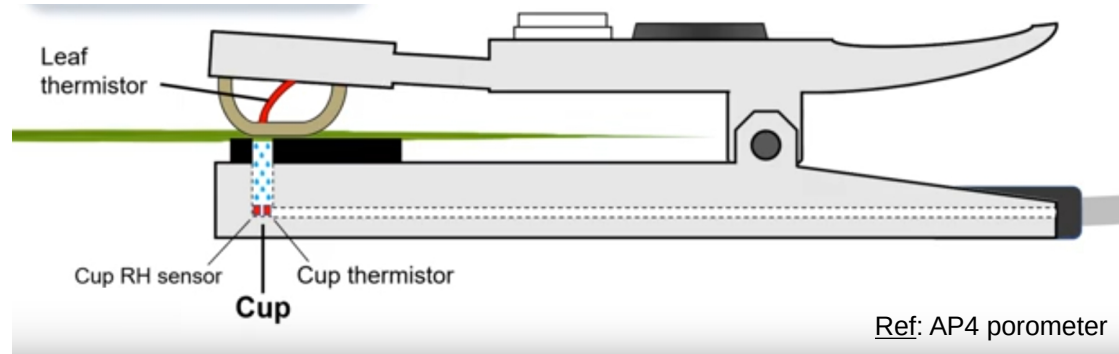


(DS= déficit de saturation)

# Mesurer la transpiration foliaire précisément sur le terrain

## Poromètres

Mesures non invasive, en plein champs



# La température... quels indications ?

- ✓ Équilibres énergétique et équilibre hydrique sont liés
- ✓ Le bilan radiatif  $R_n$  d'une feuille dépend de 3 composantes :

$$R_n = \Phi_s + \Phi_L + PS$$

**Flux de chaleur :**

-Sensible ( $\Phi_s$ )

-Latente ( $\Phi_L$ )

Photosynthèse... < 1 % !

Responses to Temperature

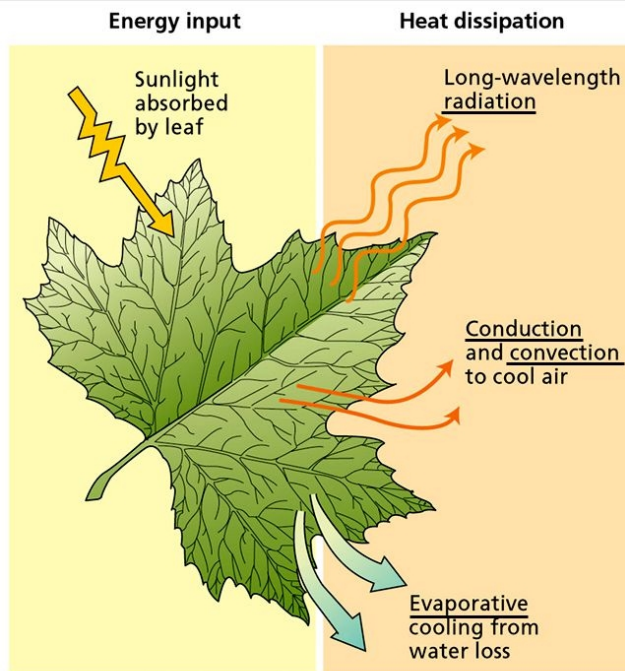
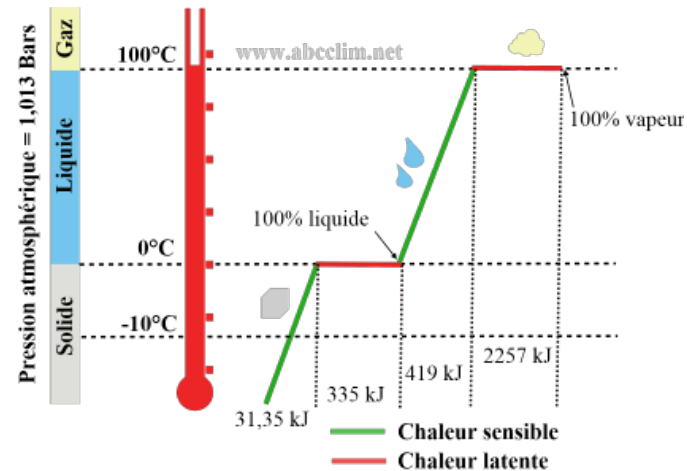


Fig 9.14 Heat budget of a leaf in sunlight



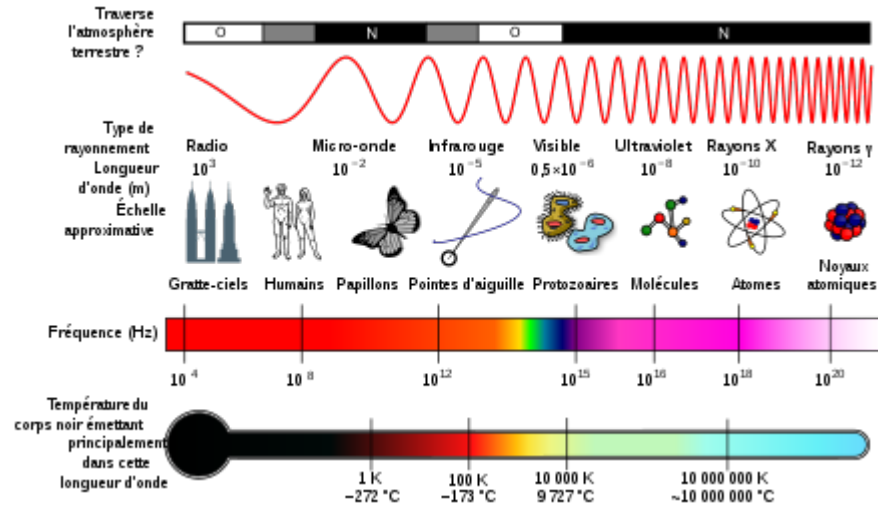
22 PRE

→ Une feuille qui « sue » à moins chaud : sa température ne monte pas (Flux *latent*) !!

# La température... quels indications ?

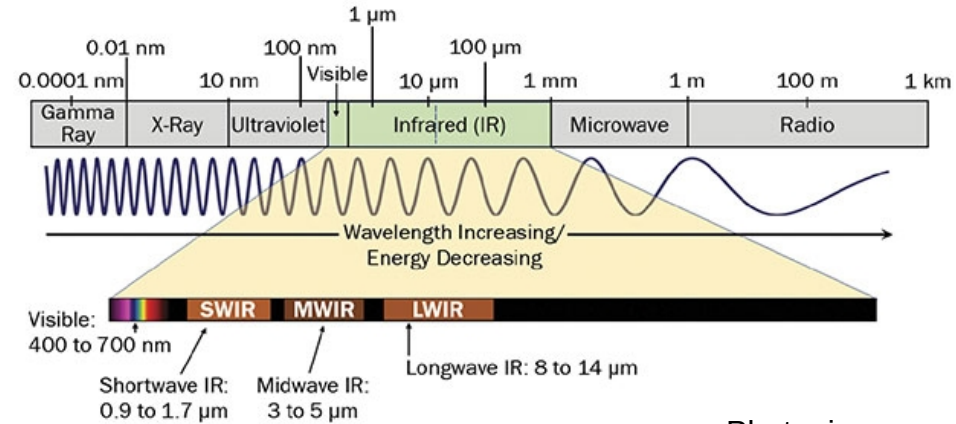
## Principe de l'Imagerie thermique :

Principe du rayonnement du corps noir  
(chaleur et rayonnement électromagnétique)



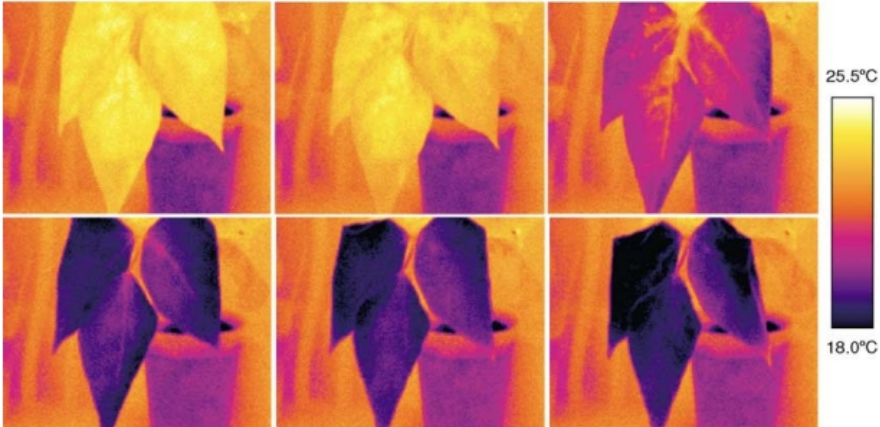
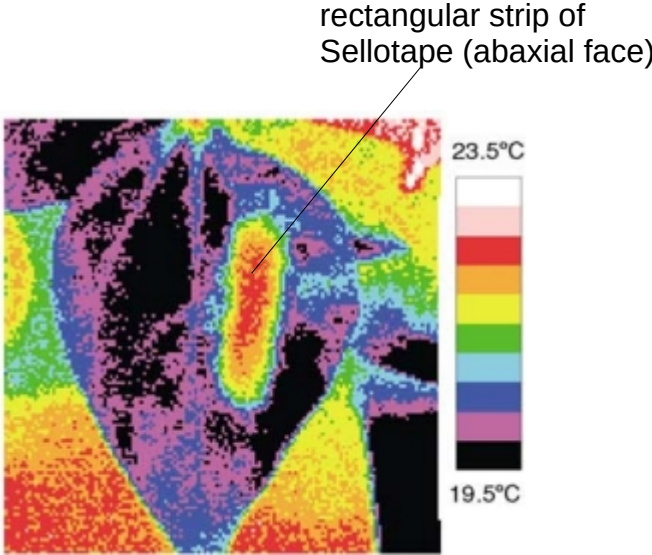
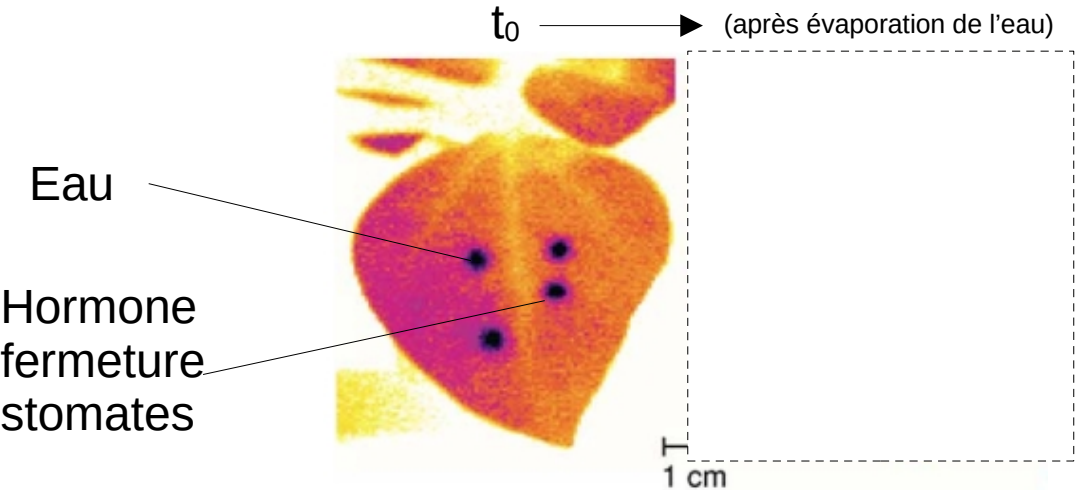
Source: Wikipedia

## Infrared : Long Wave



Photonics.com

# La température... quelles indications ?



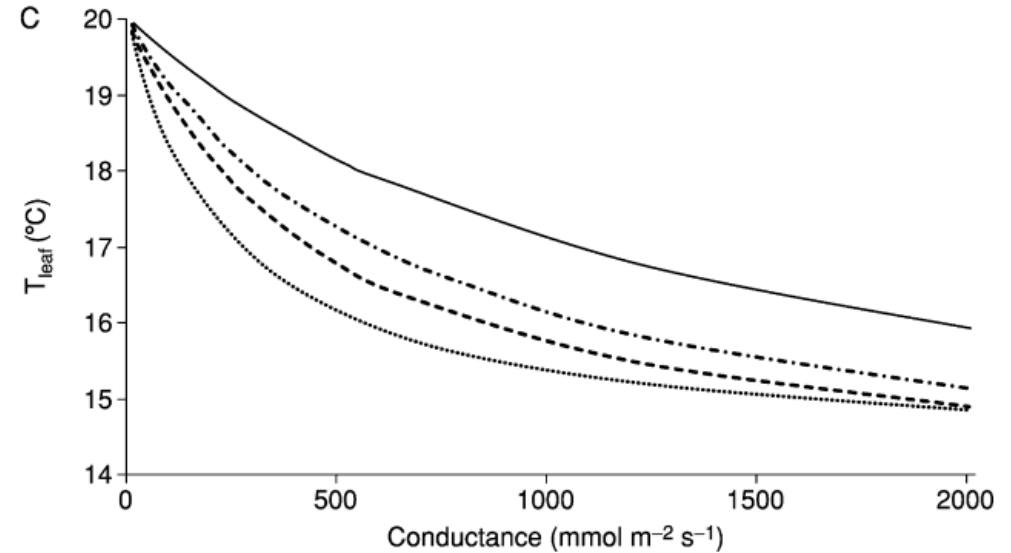
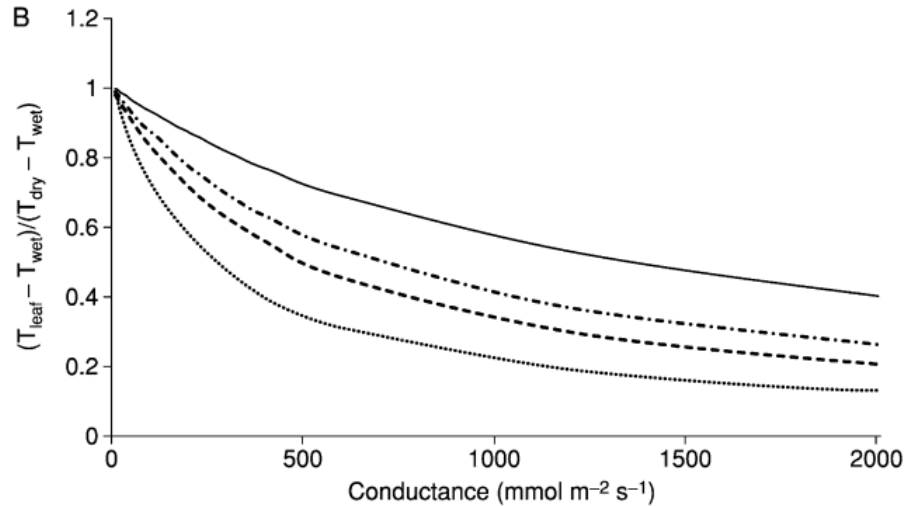
*Phaseolus vulgaris* (2-min interval frames)

« Iwanov effect » : la feuille refroidit après être détachée de la plante par ouverture des stomates pour compenser le déficit hydrique

# La température... quelles indications ?

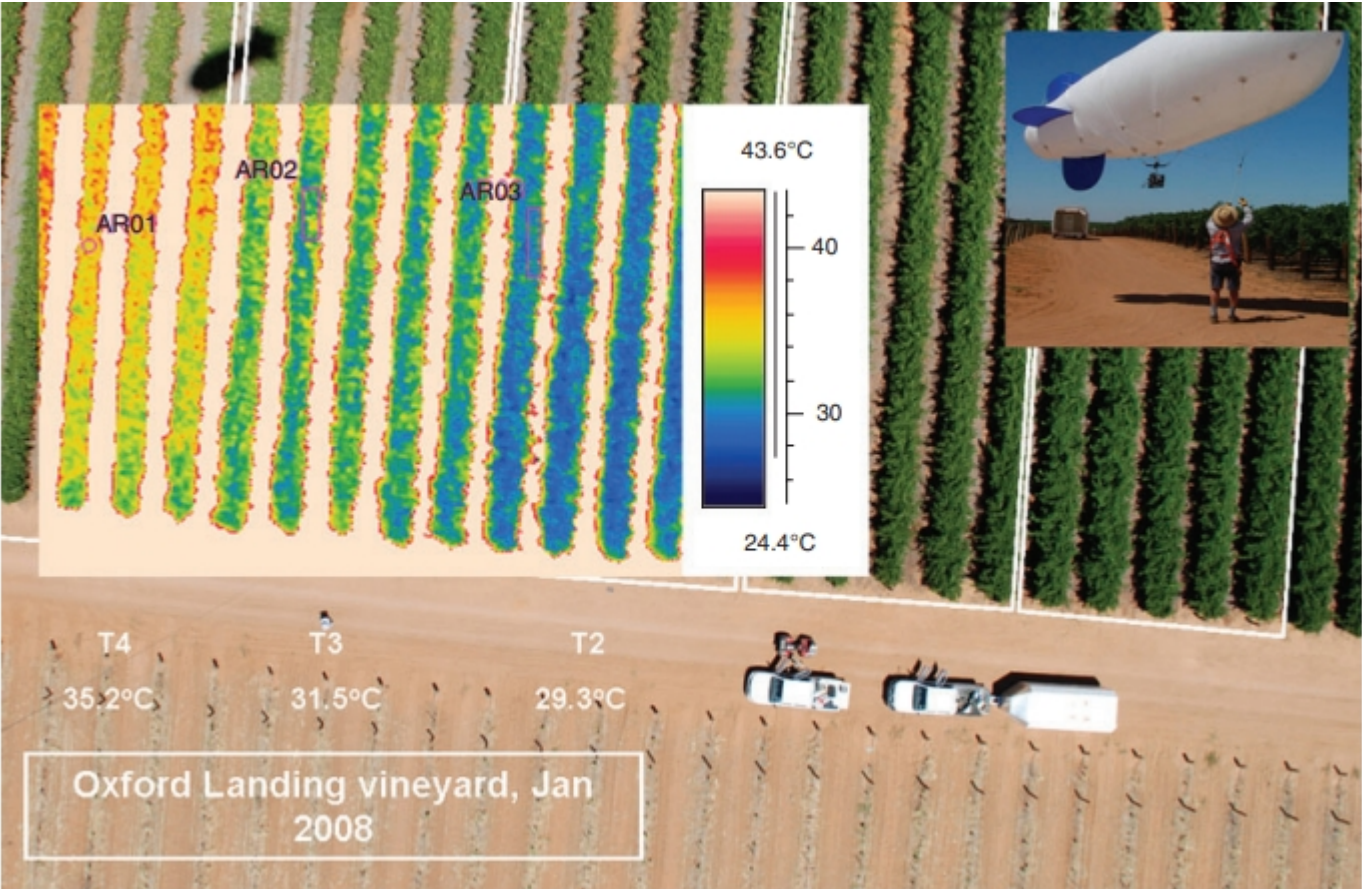
L'évolution des température est relié à la conductance foliaire et l'ouverture des stomates

for different values of the boundary layer conductance ( $g_{aH} = \dots\dots\dots 0.444 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ;  $\dots\dots\dots 0.888 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ;  $\dots\dots\dots 1.25 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ;  $\text{—} 2.51 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).



Calibration nécessaire : surface mouillée/sèche  
Incertitude de la couche limite

# La température... quelles indications ?





# Les mesures en haut débit

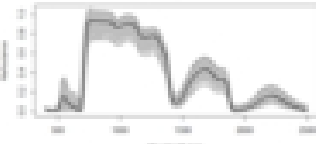
## PHENOPSIS platform



## Non-destructive measurements



Growth, gas exchanges  
(photosynthesis, transpiration)



NIR spectrometry



Fluorescence

IR imaging

Exemples de mesures, partiellement automatisables:

- Mesures gravimétriques
- Température par thermocouple
- Température par imagerie infrarouge
- VPD (Vapor pressure deficit)
- Analyses de croissance (imagerie RGB)
- Empreintes foliaires pour densité de stomates

**Exemple** : projet « STOCOdrought » au LEPSE (Montpellier, France)

<https://www.youtube.com/watch?v=92nzJ7-Or0Q>

# Quelques éléments autour de la régulation du statut hydrique des plantes

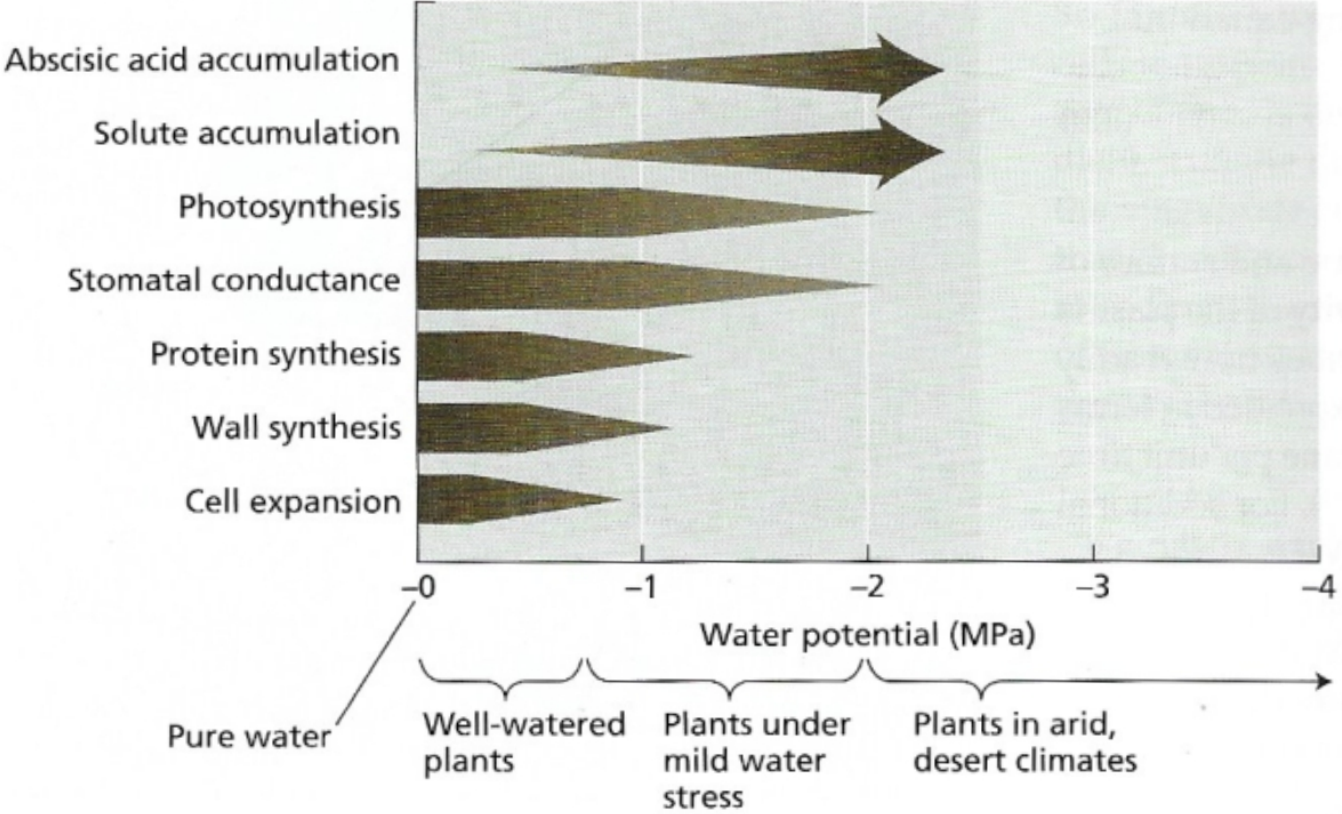
---

- 1) (Rappels ?) L'eau et les plantes terrestres : rôles, flux et notion d'équilibre hydrique
- 2) Étudier les flux d'eau dans la plante
- 3) Adaptations possibles au manque d'eau
- 4) Réflexions épistémologiques : c'est quoi la « physiologie » des plantes ?



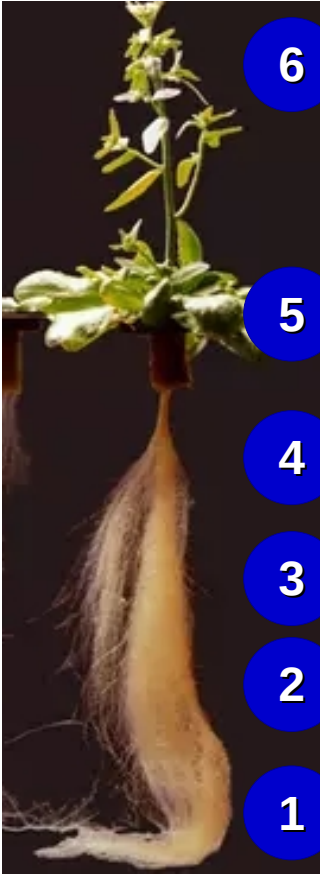
# Le manque d'eau : ordre de grandeur

Physiological changes due to dehydration:



Note:  
1 bar = 0.098 MPa (~0.1 MPa)  
→ 1 MPa = 10 fois la pression atmosphérique !

# Comment les plantes réagissent-elles à des stress hydriques (manque d'eau) ?



6

*Fermeture des stomates*

5

*Communication longue distance du stress hydrique*

4

*Aquaporines et conductance hydraulique*

3

*Exoderme et subérisation*

2

*Modification architecture racinaire*

1

*Hydrotropisme (++) biais de traitement dans ce cours)*

## Tropisme :

- action de se tourner vers ;
- réaction d'un organisme qui se caractérise par un mouvement d'orientation, une locomotion ou la croissance d'un en réponse à un stimulus environnemental

→ **biologie végétale** : croissance uniquement, vers un stimulus anisotrope. On la distingue des **nasties** (mouvement non orienté par rapport au stimulus, sans croissance) et des **tactismes** (déplacement orienté de tout l'organisme)

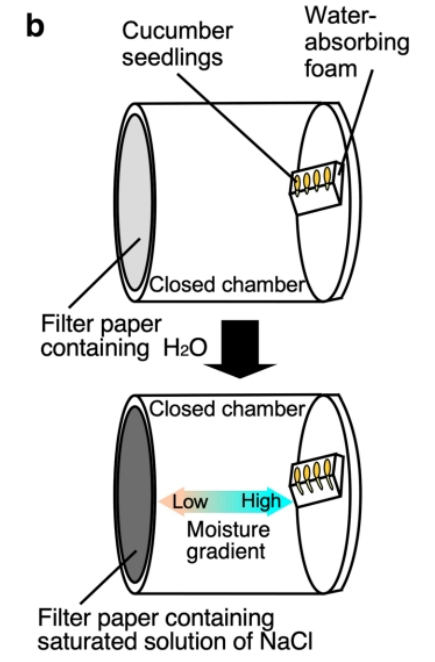
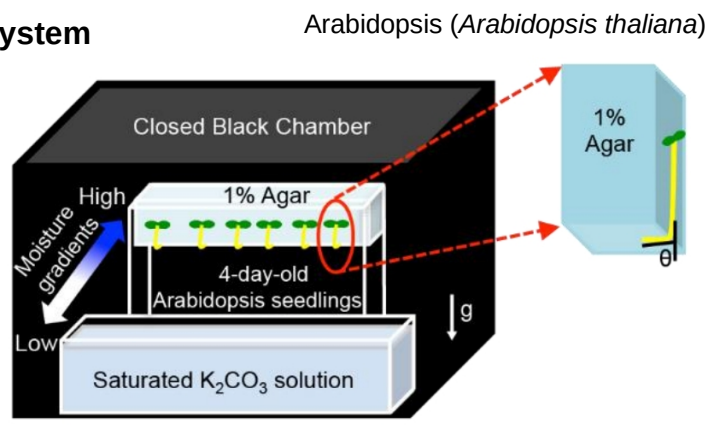
Notion « d'affinité »

- virologie : (pour un virus) ensemble des cellules sensibles à l'infection par un virus
- biochimie : (pour une molécule) organes dans lesquelles une molécule a tendance à se fixer et/ou s'accumuler
- métaphore en Sciences humaines et sociales: orientation d'idées

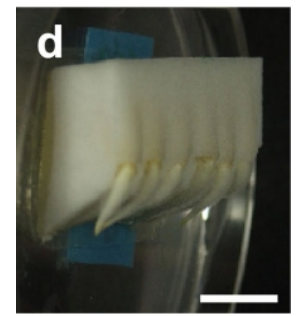
# 1 L'Hydrotropisme

- mise en évidence expérimentale

## Air system

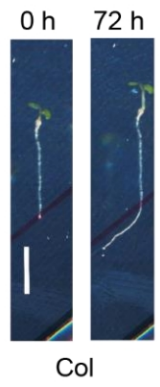
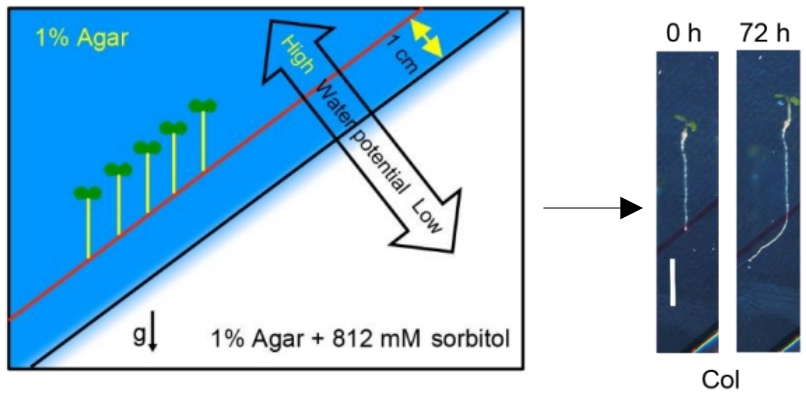


cucumber (*Cucumis sativus*)



Miyazawa Y. et al., 2020

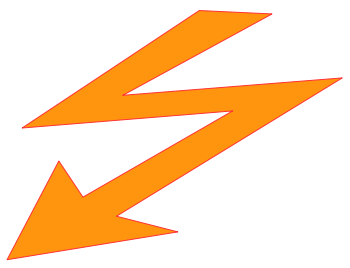
## Split-agar-based system



Dietrich D. et al., 2017

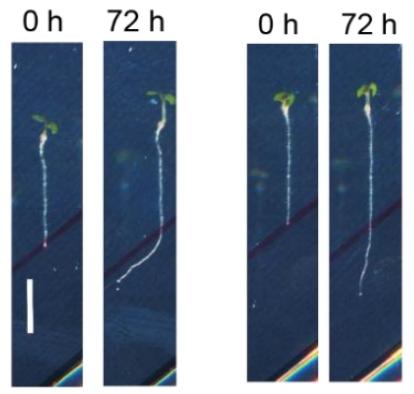
# 1 L'Hydrotropisme

- Étude par mutagénèse chez *A. thaliana*



## Perte totale de l'hydrotropisme

- miz1**: fonction inconnue, membrane réticulum
- miz2**: (vesicule trafficking)
- nhr1**: gene inconnu
- atgxx** genes: autophagy

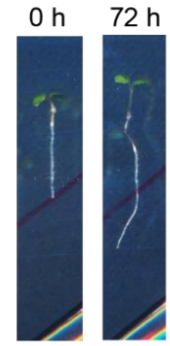


Col *miz1*  
Dietrich D. et al., 2017

Hydrotropisme accru

Hydrotropisme atténué

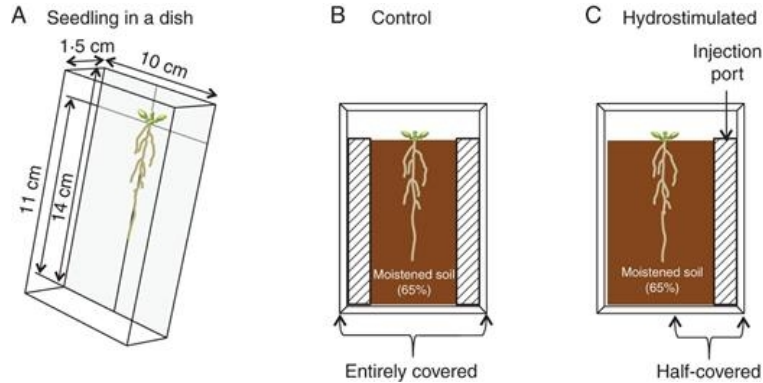
Implication de différents facteurs:  
Plutôt négatif → Auxine, ROS,  
Plutôt positif → ABA, Cytokinine,  
trafic vésiculaire



*snrk2.2 snrk2.3*  
(ABA signalling)

# 1 L'Hydrotropisme

- rôle dans le sol → l'exemple du gène *MIZ1*

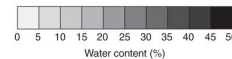
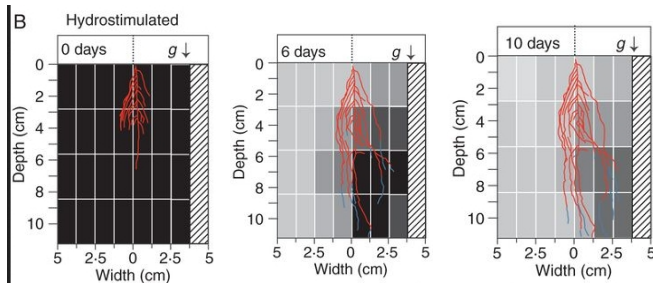
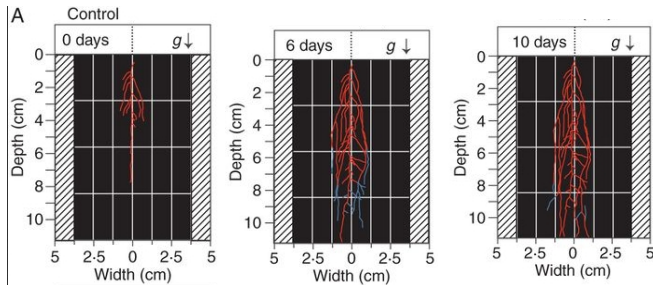
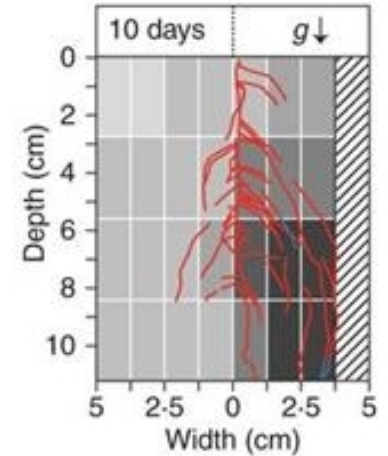
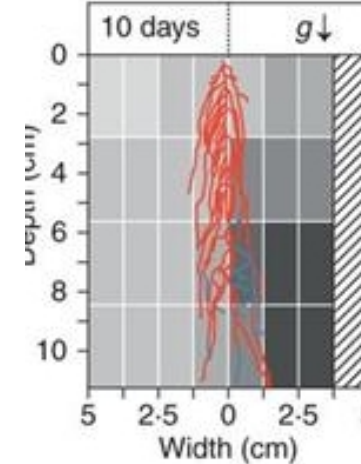
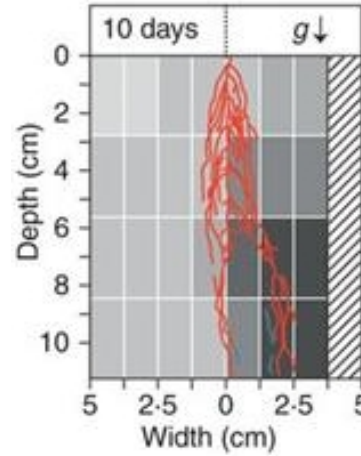


## Rôle du *MIZ1* en sol

**WT**

***miz1-1***

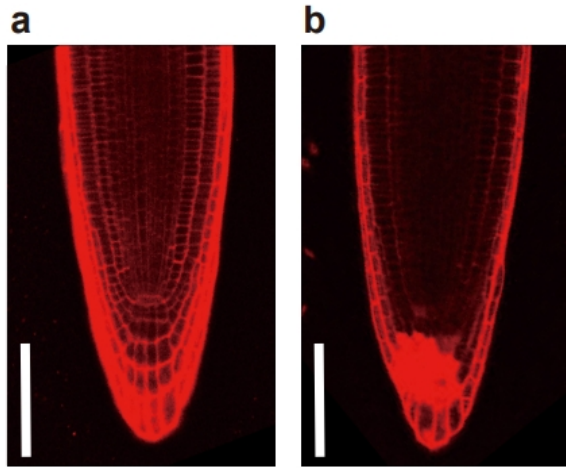
***OE-MIZ1***



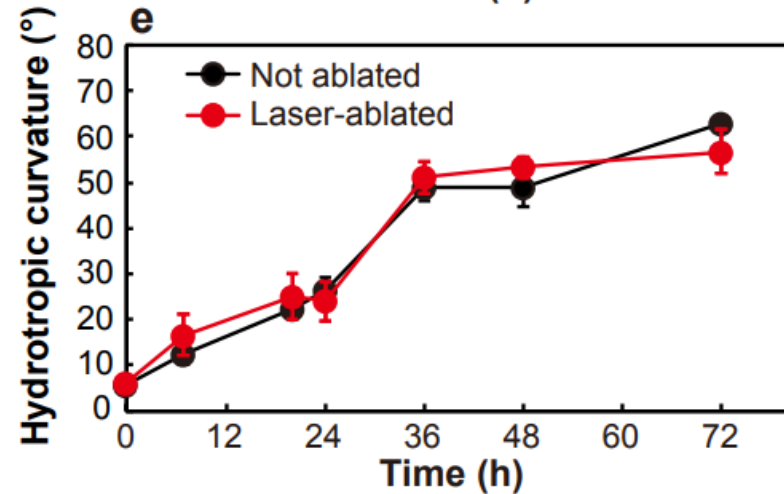
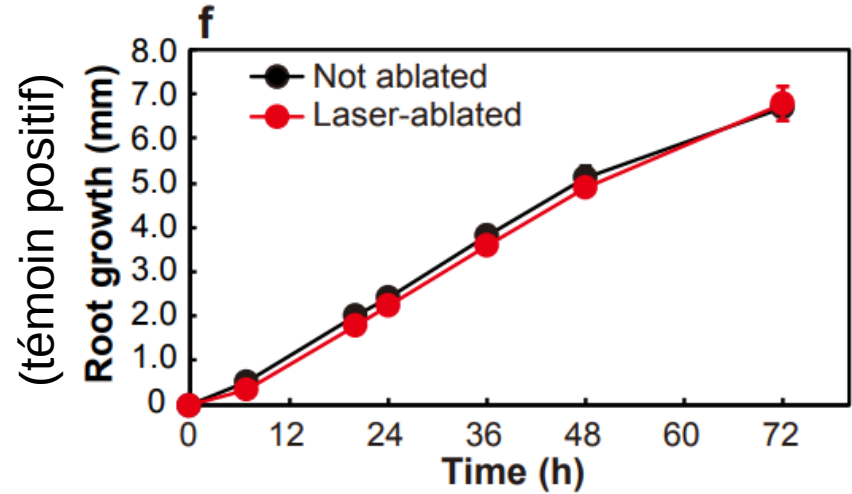
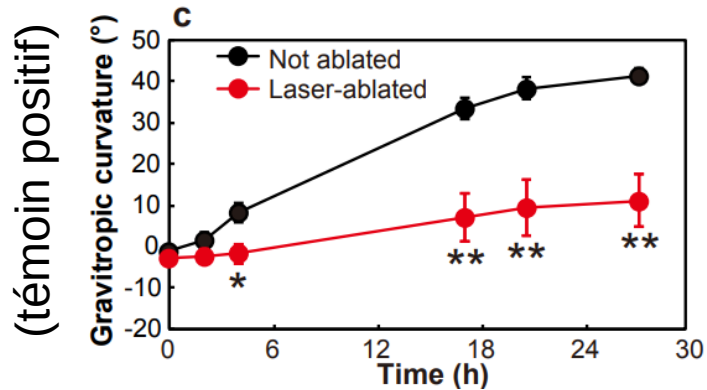


# 1 L'Hydrotropisme

- Étude du mécanisme de réponse



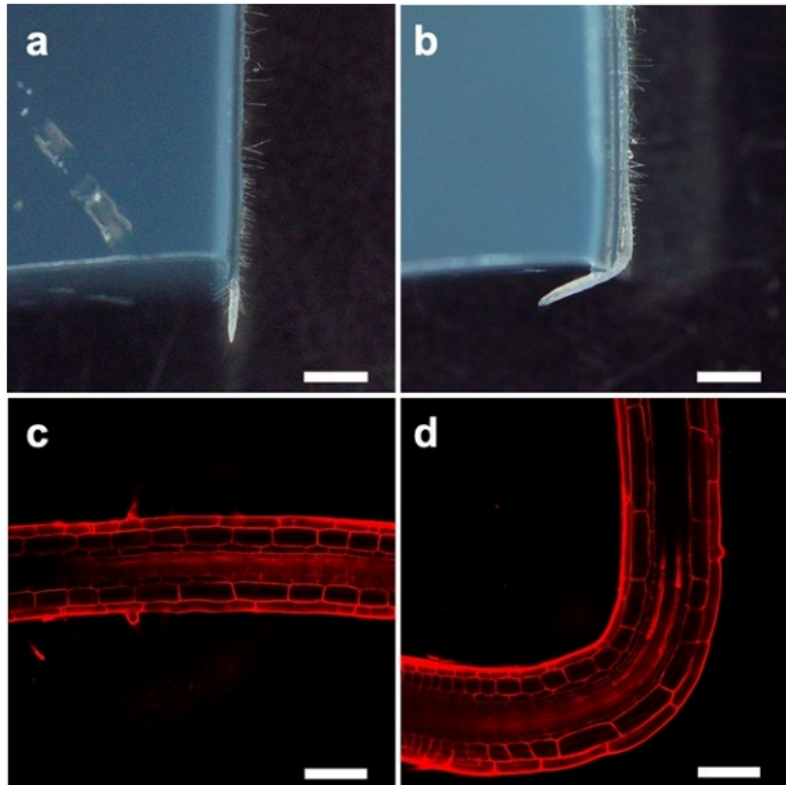
Ablation des cellules de la coiffe  
(centre connu de la graviperception)



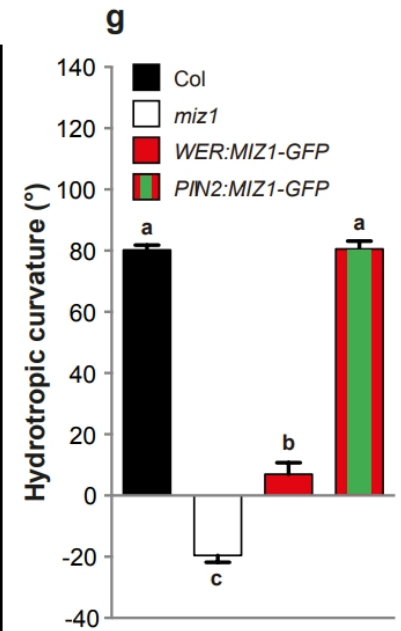
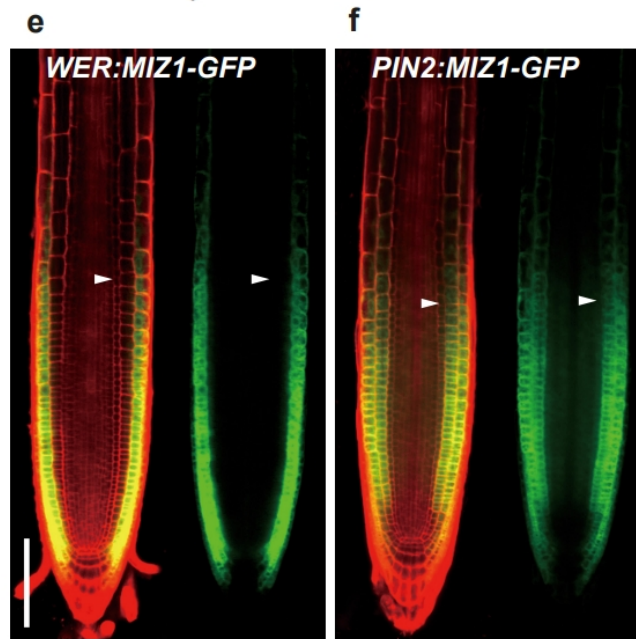
# 1 L'Hydrotropisme

- Étude du mécanisme de réponse

→ Réponse spécifique de croissance des cellules du cortex



Miyazawa Y. et al., 2020

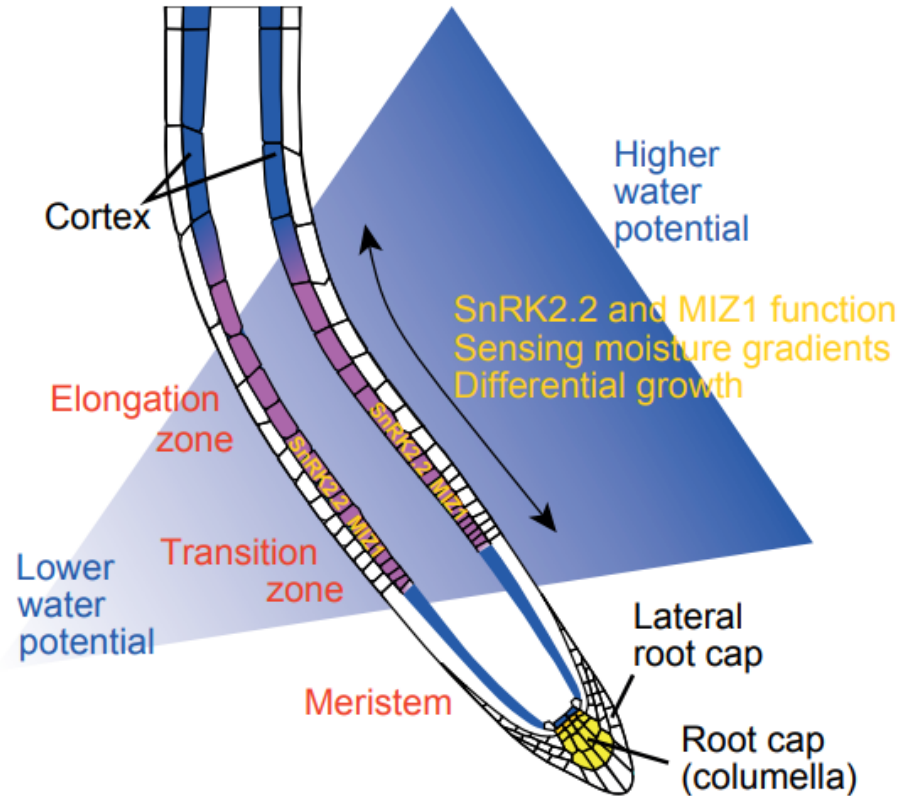


Dietrich D. et al., 2017

# 1 L'Hydrotropisme

- Étude du mécanisme de réponse

## Premier modèle explicatif

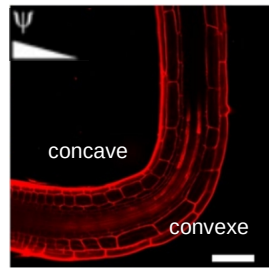
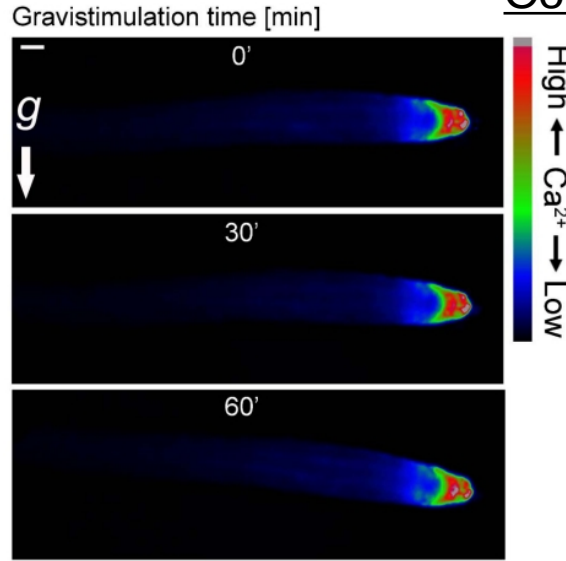
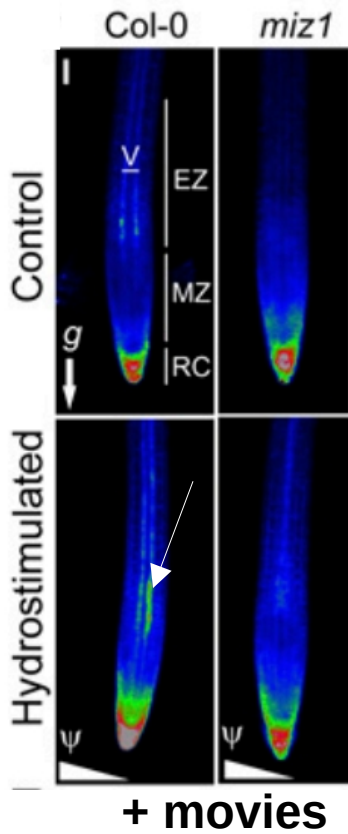


# 1 L'Hydrotropisme

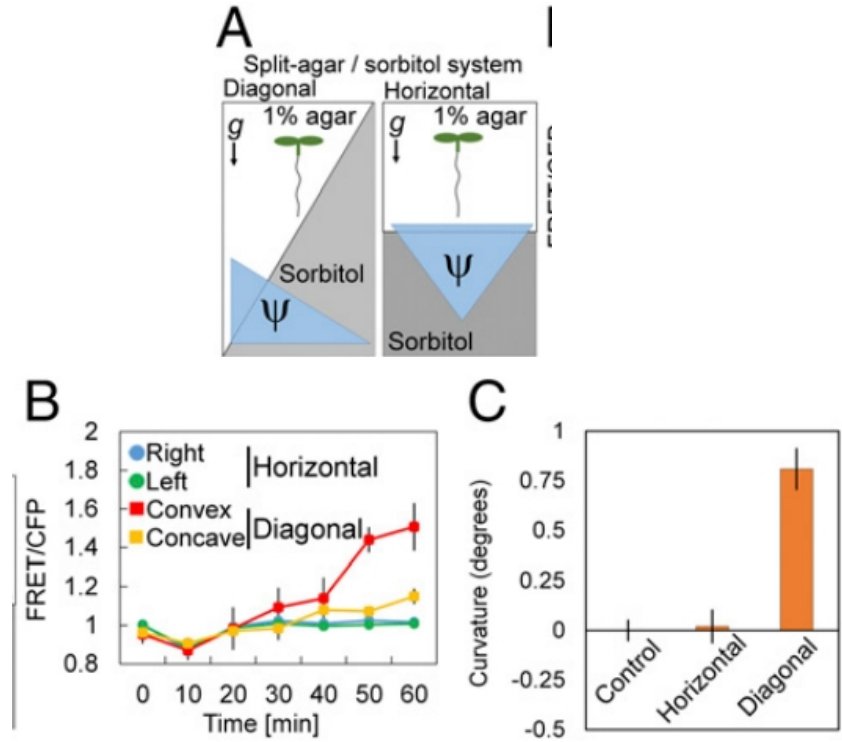
- Rôle d'un signal calcique asymétrique

\*\* Senseur fluorescent du  $Ca^{2+}$  : « **caméleon** »

## Hydrostimulation



## Contrôles expérimentaux :

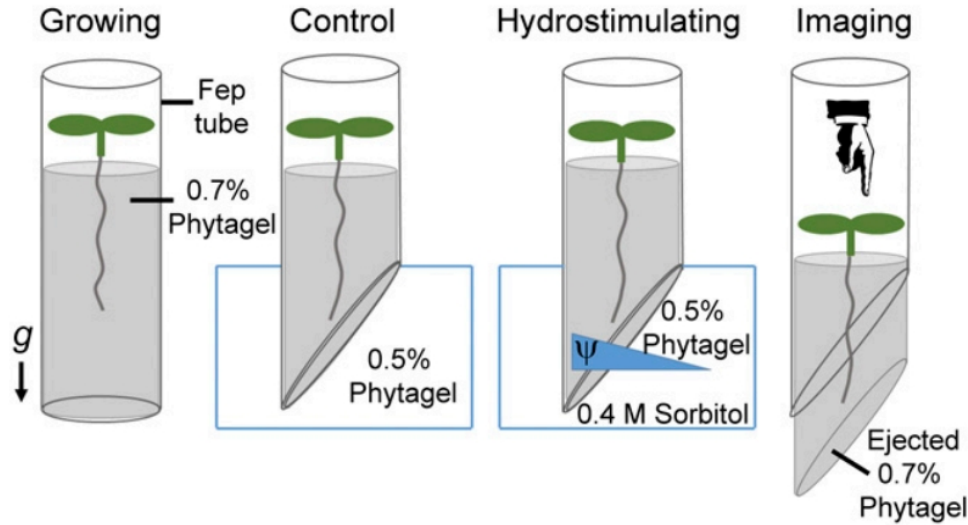


# 1 L'Hydrotropisme

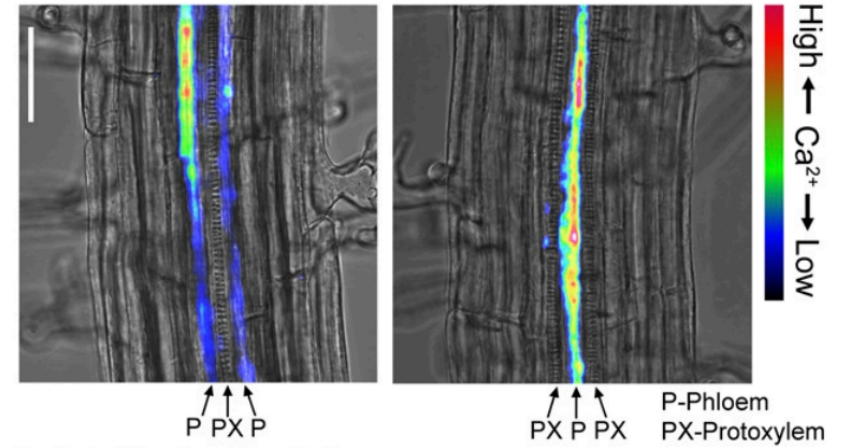
- Rôle d'un signal calcique asymétrique

## 1/ Transmission via le phloème

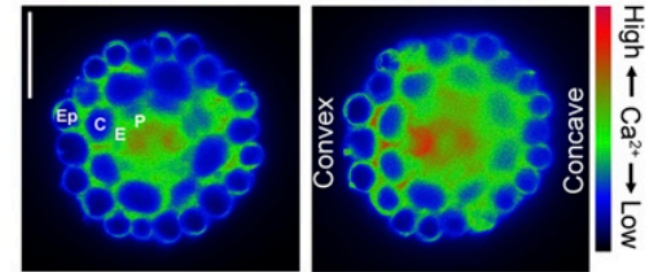
### B 'In tube' hydrostimulation assay



(microscopie à feuillet de lumière)



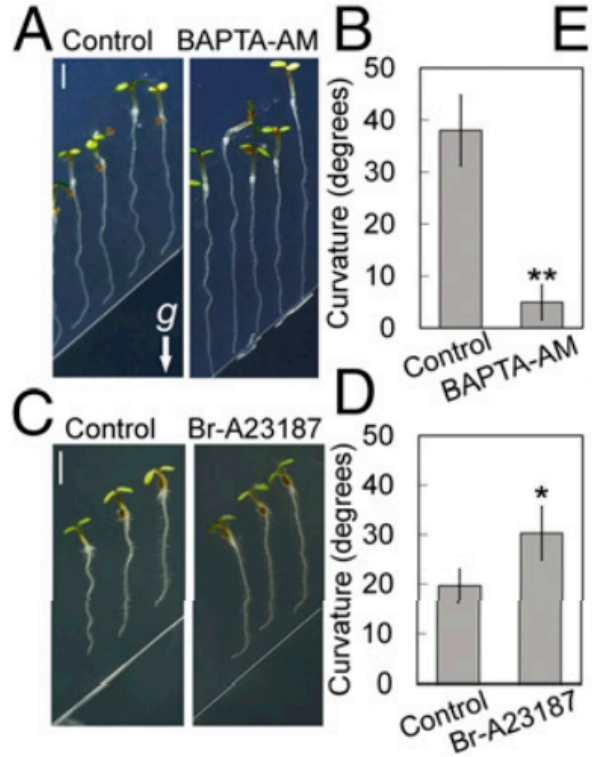
### C Control      Hydrostimulated, 1h



# 1 L'Hydrotropisme

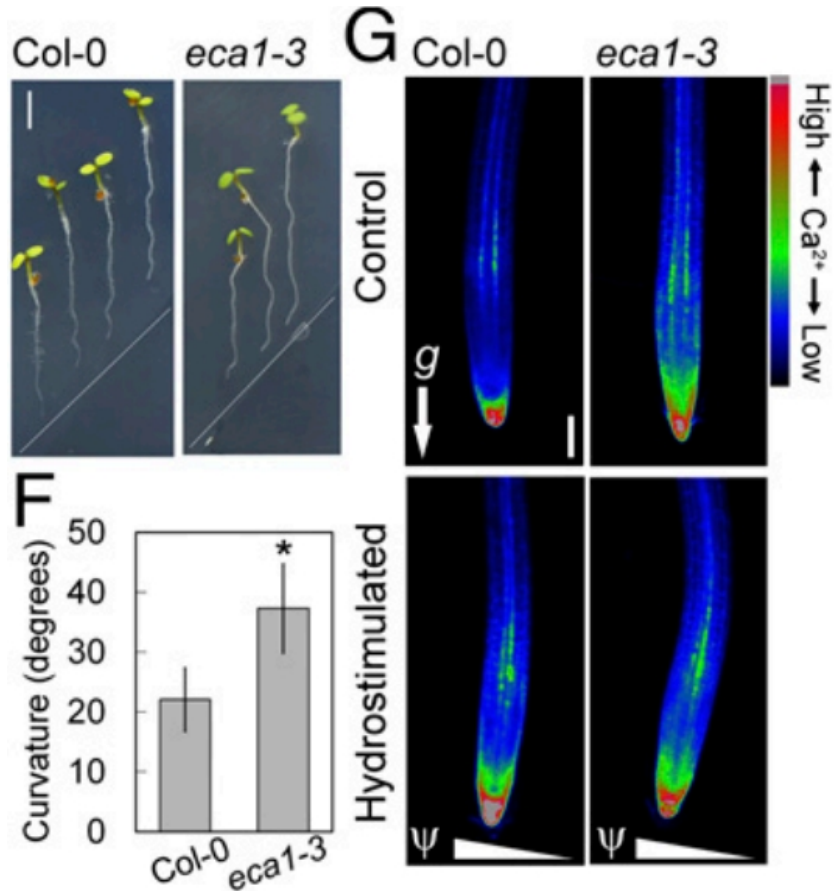
- Rôle d'un signal calcique asymétrique

## 2/ Rôle du Calcium



(Ionophore calcimycin)

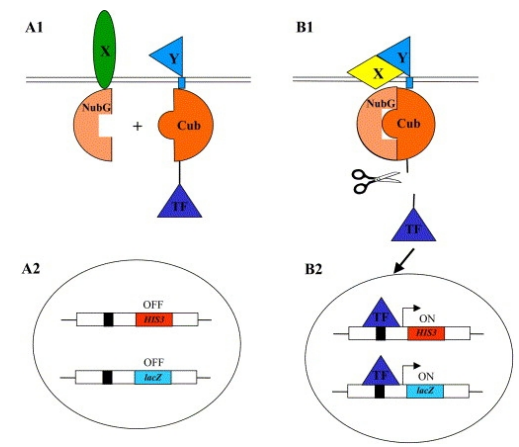
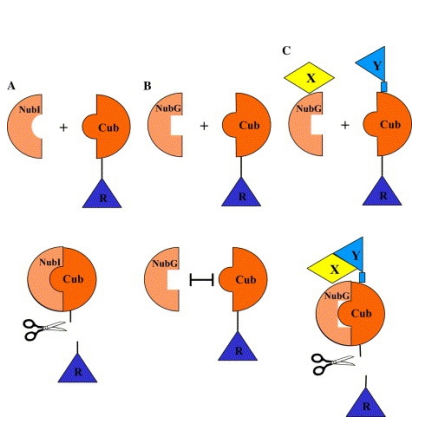
## 3/ Rôle du Calcium séquestré dans le RE



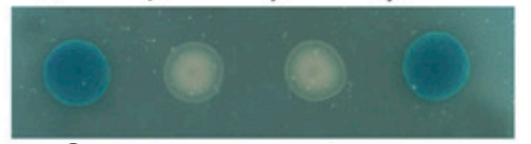
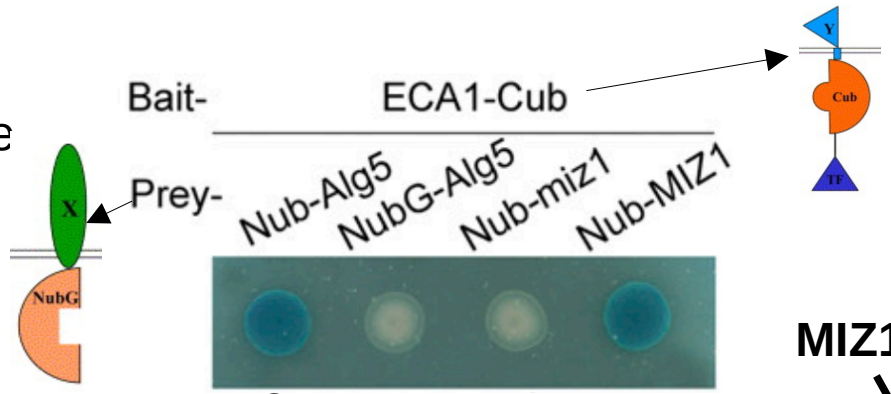
# 1 L'Hydrotropisme

- Rôle d'un signal calcique asymétrique

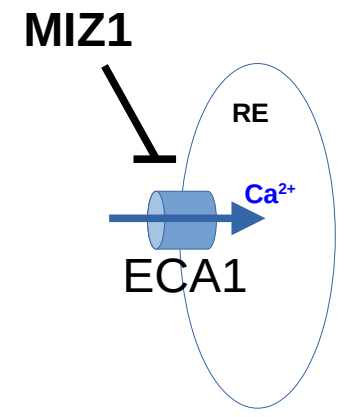
## 5/ Interaction MIZ1 & ECA1 ?



Principe du test  
« ubiquitine divisée » pour  
interaction membranaires



(témoin +) (témoin -)  
Test interaction  
directe ECA1 & MIZ1



Modèle

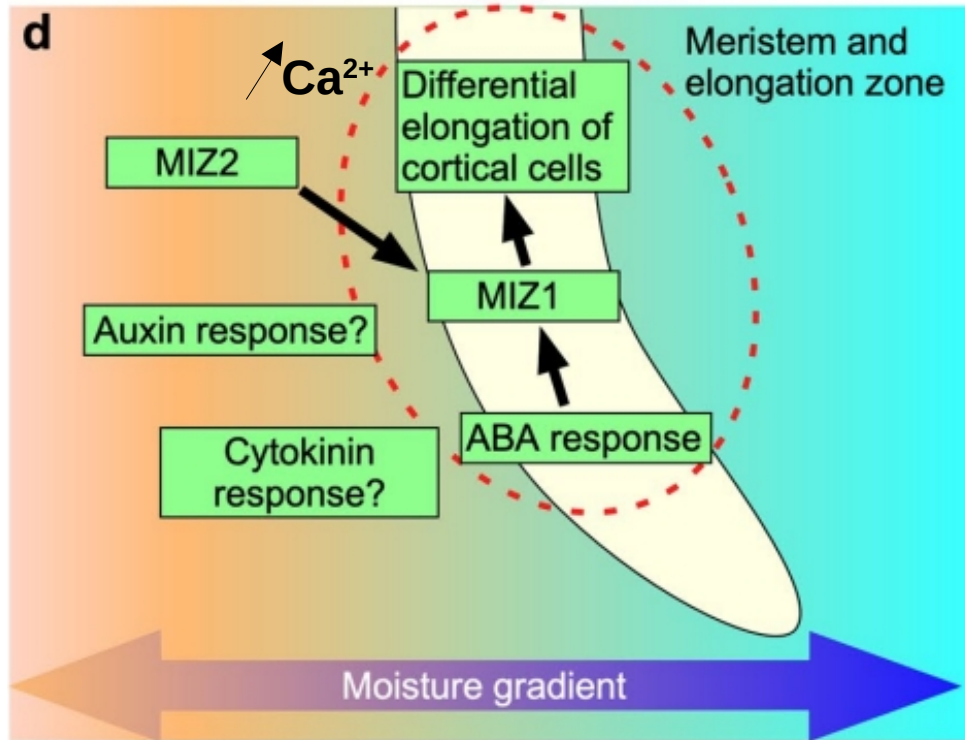
**E**

	Vector	ECA1	ECA1 +MIZ1	ECA1 +miz1
10 mM Ca <sup>2+</sup>				
100 μM Ca <sup>2+</sup>				
20 mM EGTA				

Test fonctionnel avec  
Calcium

# 1 L'Hydrotropisme

Mise à jour du modèle du mécanisme de l'hydrotropisme

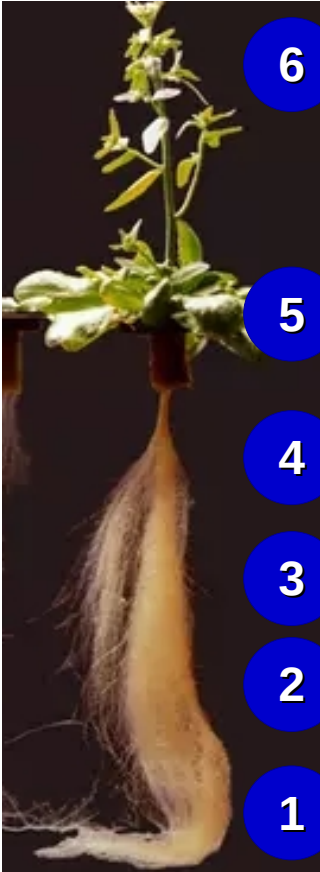


Miyazawa Y. *et al.*, 2020

- Les racines perçoivent les **gradients d'humidité** et **orientent leur croissance** vers les régions plus humides
- On ne connaît pas le **mécanisme de perception ?**
- Le mécanisme de réponse commence à être élucidé et des gènes ont été identifiés (ex. : MIZ1, MIZ2, ECA1)
- La réponse implique la **zone d'élongation** : un **signal calcique asymétrique** dans le phloème est perçu par le cortex adjacent. **MIZ1** pourrait bloquer la **séquestration de Ca<sup>2+</sup>** dans le RE en inhibant le **transporteur ECA1** du côté « sec », induisant la croissance des cellules du cortex de ce côté. Les cibles en aval du pic sont inconnues.



# Comment les plantes réagissent-elles à des stress hydriques (manque d'eau) ?



6

*Fermeture des stomates (5 d.)*

5

*Communication longue distance du stress hydrique (8 d.)*

4

*Aquaporines et conductance hydraulique (4 d.)*

3

*Exoderme et subérisation (2 d.)*

2

*Modification architecture racinaire (1 d.)*

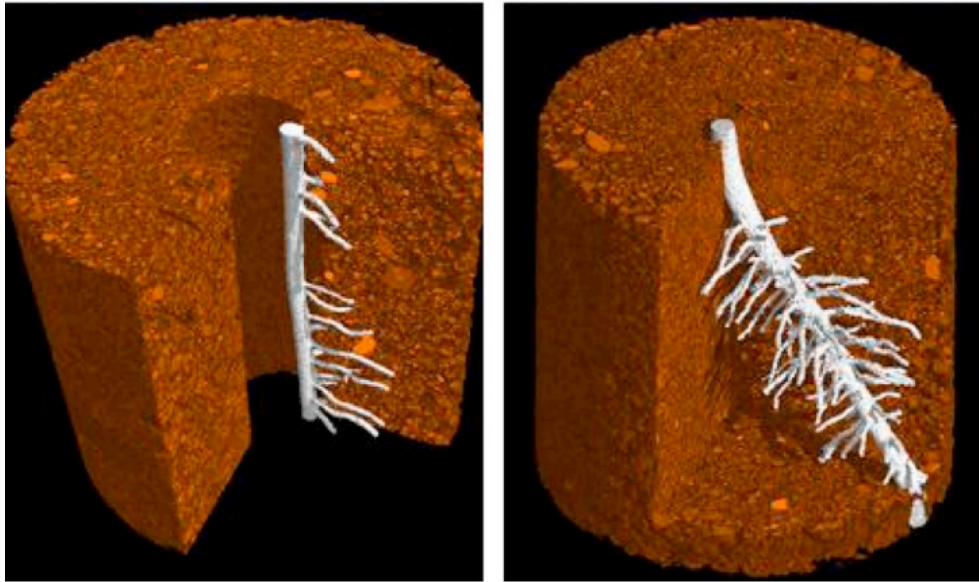
1

*Hydrotropisme (12 d., ++ biais de traitement dans ce cours)*

## 2 Modification de l'architecture du système racinaire

D

Hydropatterning  
*Zea mays*

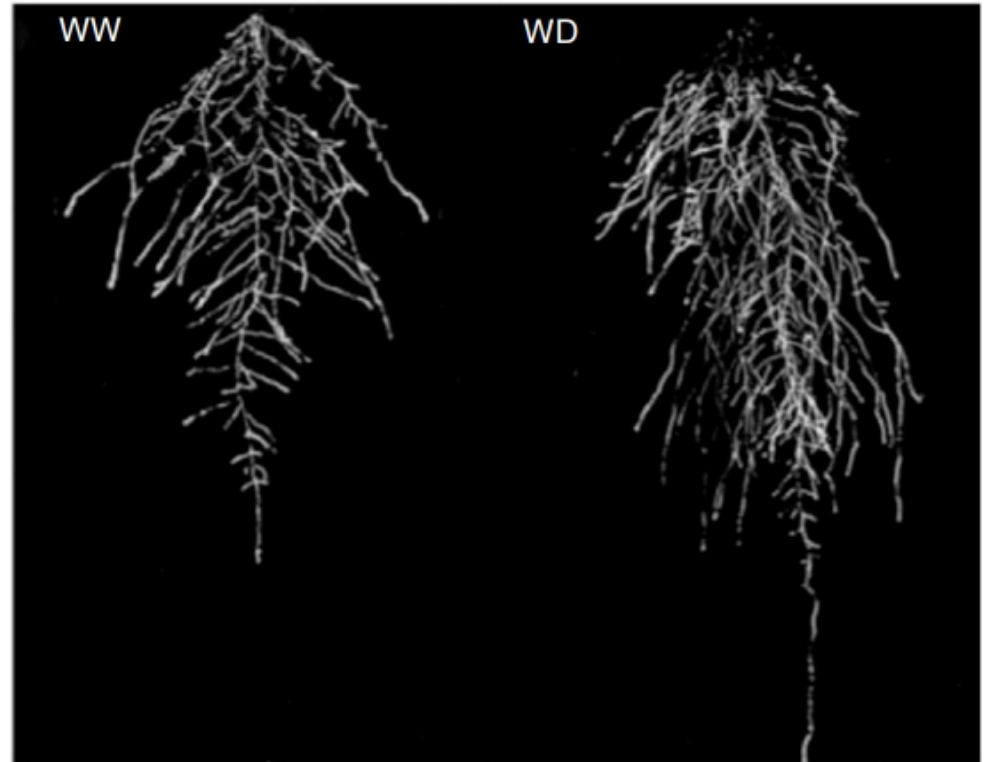


Current Biology

(reprinted from Bao Y. *et al.*, 2014)

C

Xerotropism  
*Arabidopsis thaliana*



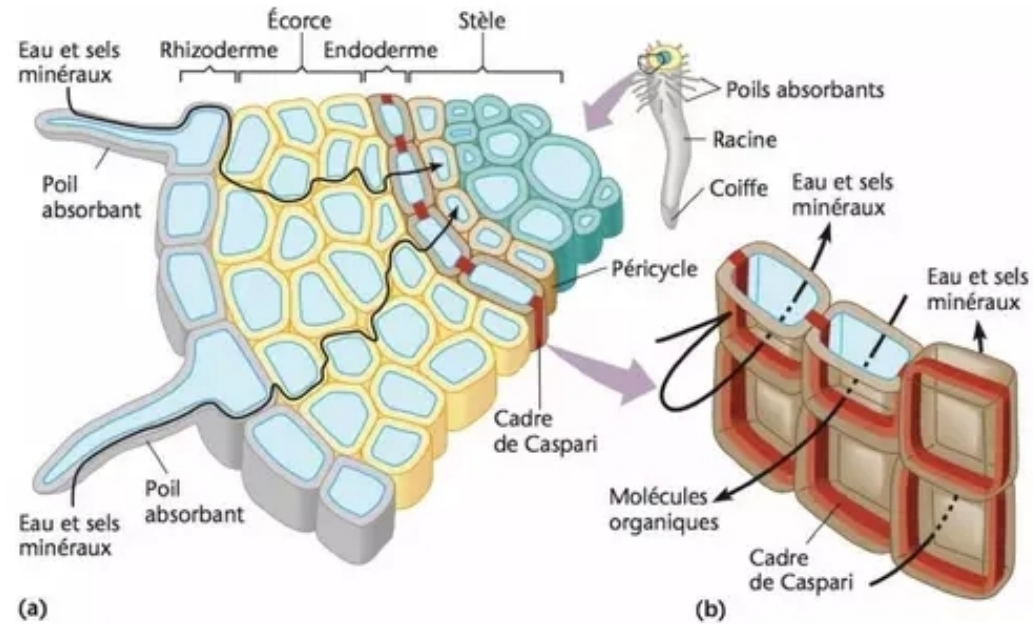
(reprinted from Rellan-Alvarez R. *et al.*, 2014)

### 3 Exoderme et subérisation

\*\* RAPPEL \*\*  
DEVELOPEMENT DE L'ENDODERME

3 phases, 3 fonctions :

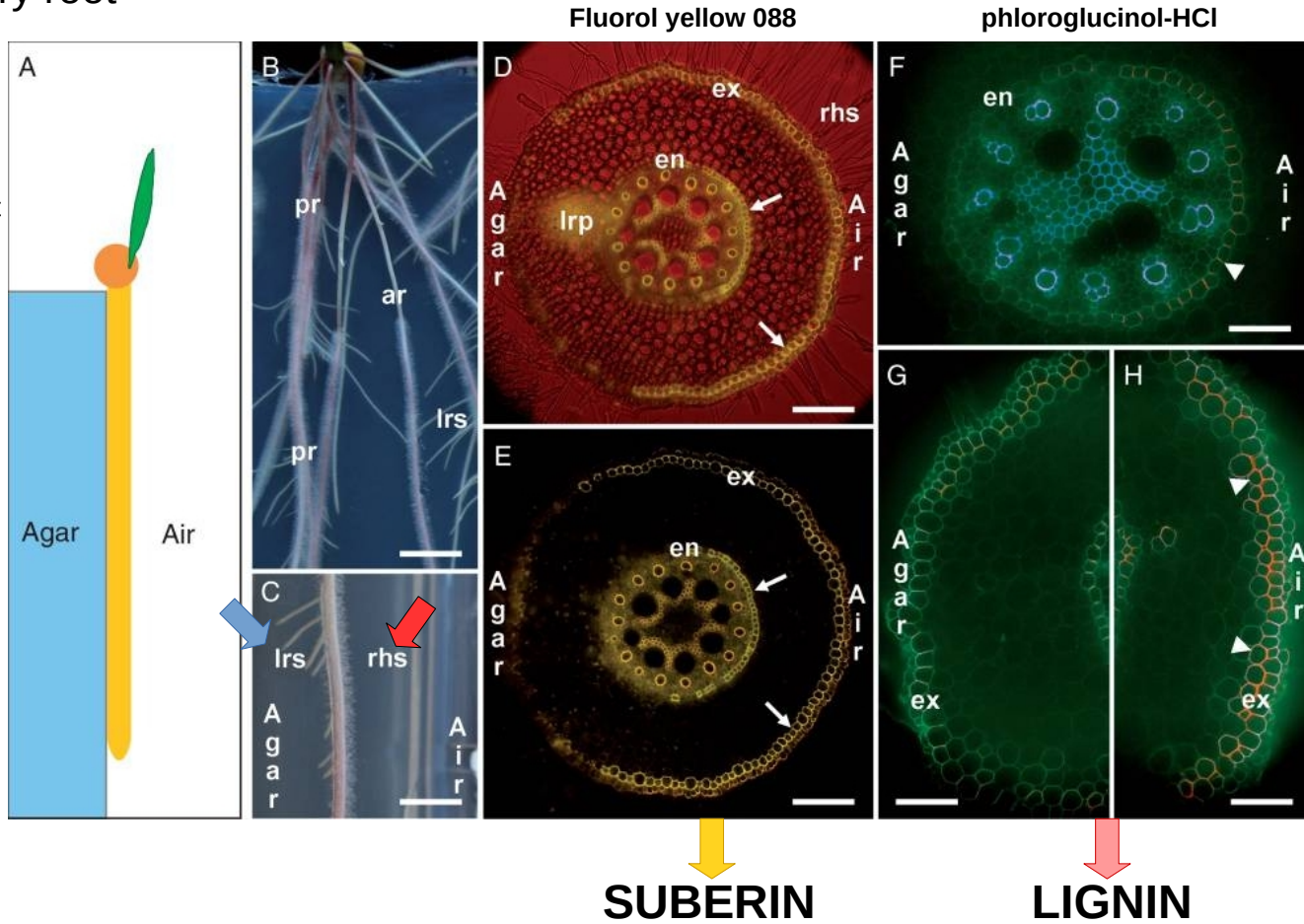
- 1) **Bande de Caspari** (apex) : n'instaure pas vraiment de barrière apoplasmique
- 2) **Subérisation** (un peu plus haut): limitation forte du flux apoplasmique
- 3) **Lignification** (encore plus loin de l'apex): paroi tertiaire, épaisse, empêchant toute fuite radiale (+ protection contre les infections parasitaires)



### 3 Exoderme et subérisation

Maize primary root

- **pr**: primary root
- **ar**: adventitious root
- **lrs**: lateral roots
- **rhs**: root hairs



- **en**: endodermis;
- **ex**: exodermis
- **lrp**: lateral root primordium

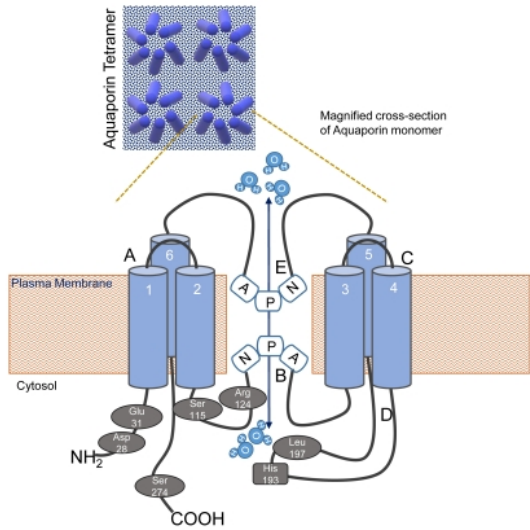
SUBERIN

LIGNIN

# 4 Aquaporines et contrôle de la conductance racinaire

## Aquaporines

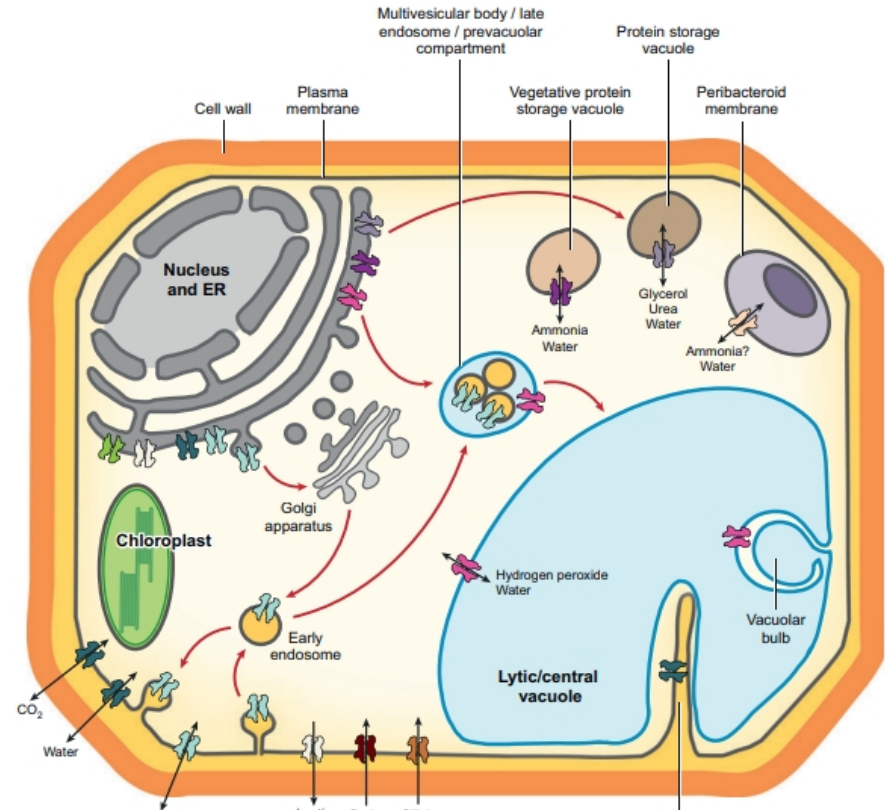
Très diversifiées et abondantes chez les plantes



Patel J. et al., 2021

*Arabidopsis* : 35 gènes

Riz : 33 gènes



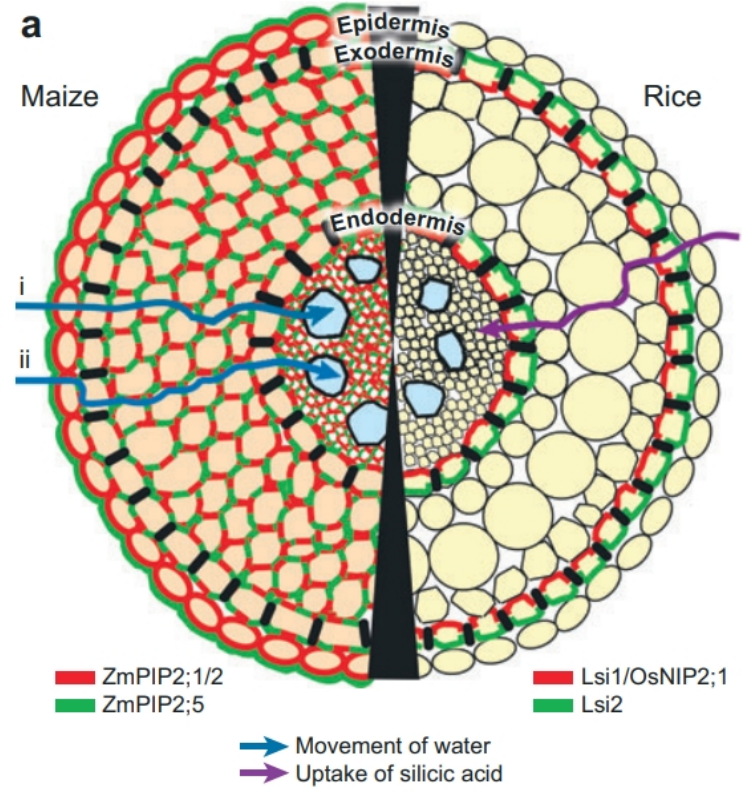
Memb. Plasm.	Tono.	« noduline »	Small basic
PIP1s	TIP1s	AtNIP2;1	SIPs
PIP2s	TIP2s	Lsi1/OsNIP2;1	(3)
	TIP3s	AtNIP5;1	
		NOD26	
		(9)	

(N in *Arabidopsis*) → (13)

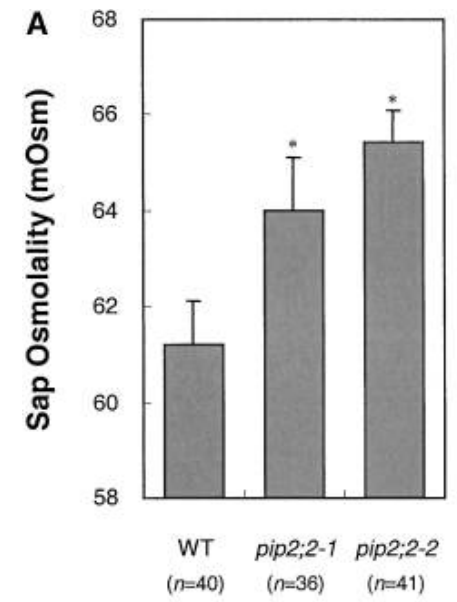
Maurel C. et al., 2008

# 4 Aquaporines et contrôle de la conductance racinaire

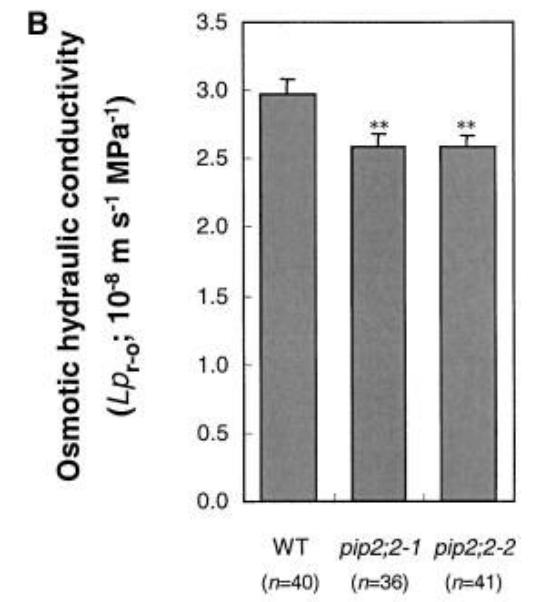
Les aquaporines : composant essentiel de la conductivité racinaire



Maurel C. *et al.*, 2008



Plant line  
↓  
Sève « plus concentrée »

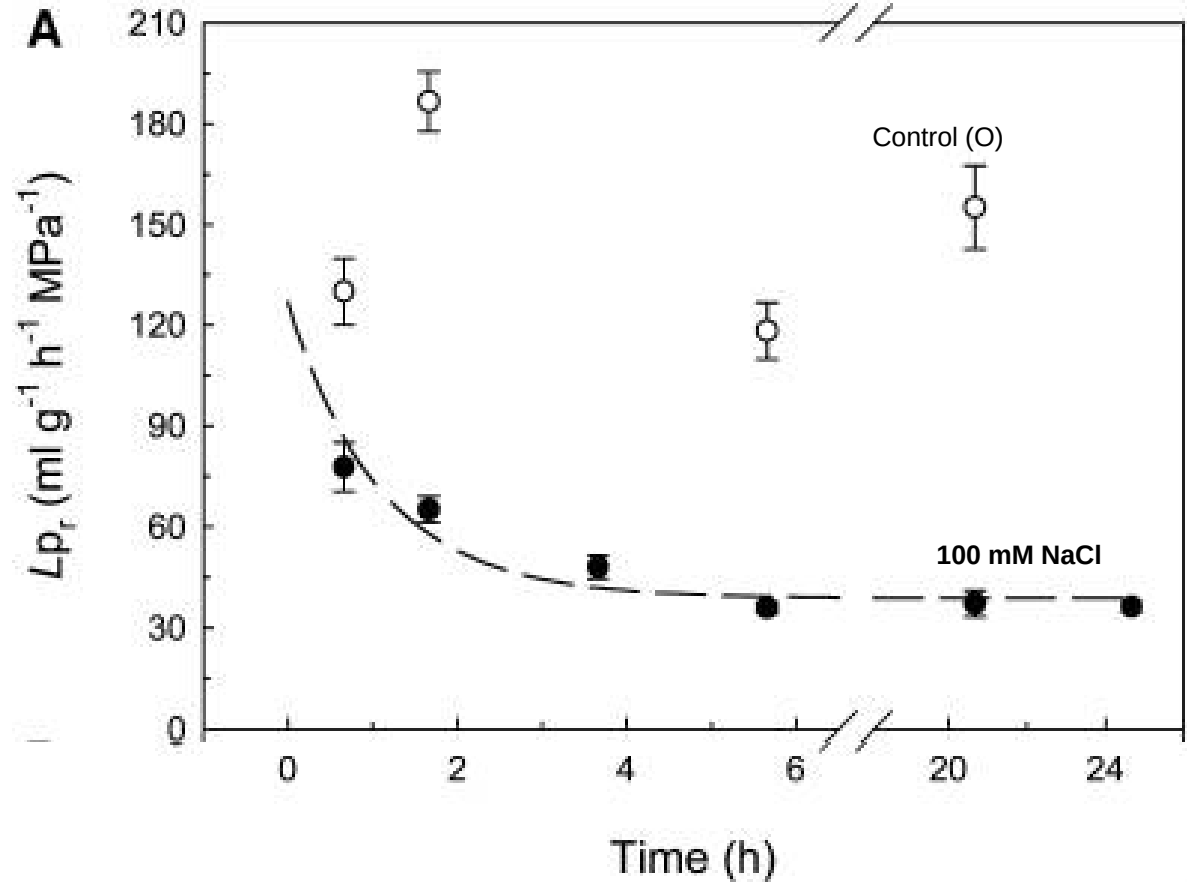


Plant line  
↓  
Racine « moins conductrice »

Javot H. *et al.*, 2003

## 4 Aquaporines et contrôle de la conductance racinaire

Les plantes adaptent la conductivité racinaire rapidement suite à un stress salin



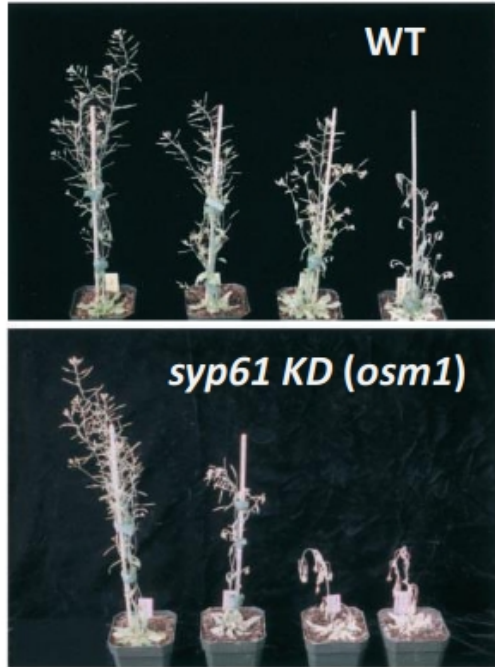
**Comment sont régulées les aquaporines ?**

- Pas d'effet frappant au niveau transcriptionnel
- Effets distribués sur la famille multi-génique ?
- Effets post-transcriptionnels ?

## 4 Aquaporines et contrôle de la conductance racinaire

- Les plantes adaptent la conductivité racinaire rapidement suite à un stress salin
- Rôle du trafic intra-cellulaire et l'apport aux membranes

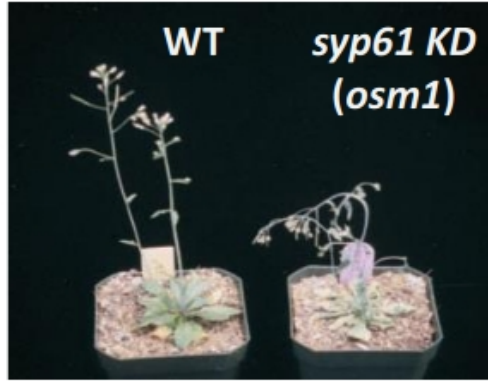
Salt



0 200 300 400

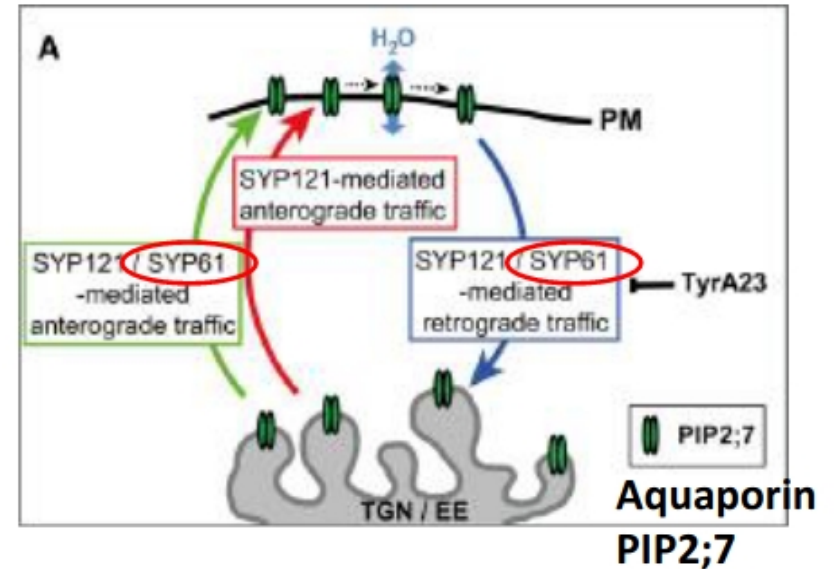
NaCl (mM)

Drought



Zhu et al., 2002, *Plant Cell*

**SYP61 regulates trafficking of PIP2;7 between TGN and PM.**



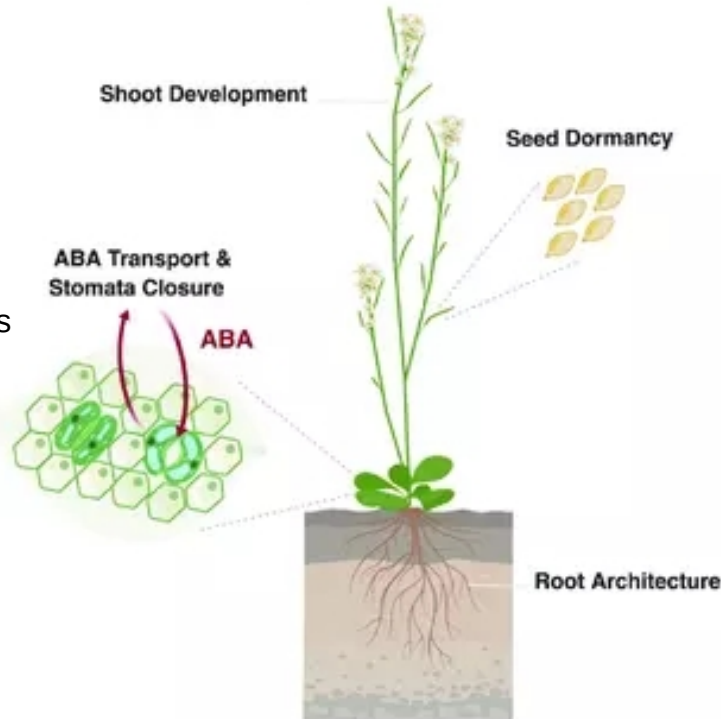
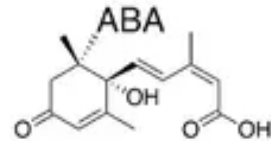
Hachez et al., 2014, *Plant Cell*



# 5 Communication longue distance du stress hydrique

## L'acide abscissique (ABA, « hormone » végétale): le second messenger

Voie moléculaire de signalisation ABA :



- ABA

PYR1  
PYL  
RCAR

PP2Cs

SnRK2s

AREB/ABF

+ ABA

PYR1  
PYL  
RCAR

PP2Cs

SnRK2s<sup>P</sup>

AREB/ABF<sup>P</sup>

ABA responsive genes

- ✓ Sesquiterpénoïde (assemblage de terpènes)
- ✓ Conservée (plantes vertes, algues, champignons, cyanobactéries)
- ✓ Synthèse complexe (plastides → cytosol → ER)
- ✓ Peu stable: rapidement métabolisée ou conjuguée au glucose (ABA glucosyl ester = ABA-GE)

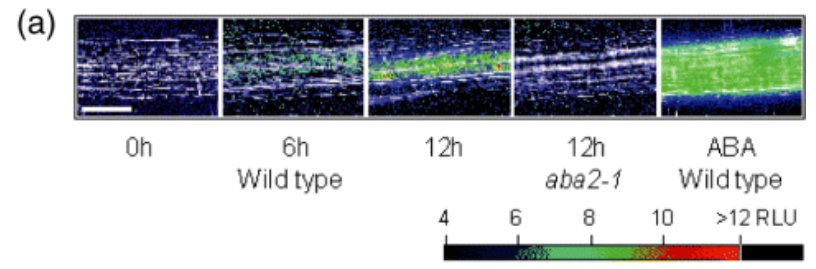
# 5 Communication longue distance du stress hydrique

## \*\* Visualiser la réponse à l'ABA

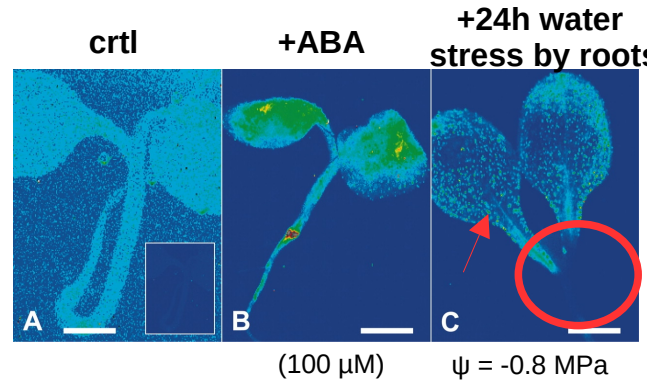
→ 1 senseur de réponse à la signalisation ABA



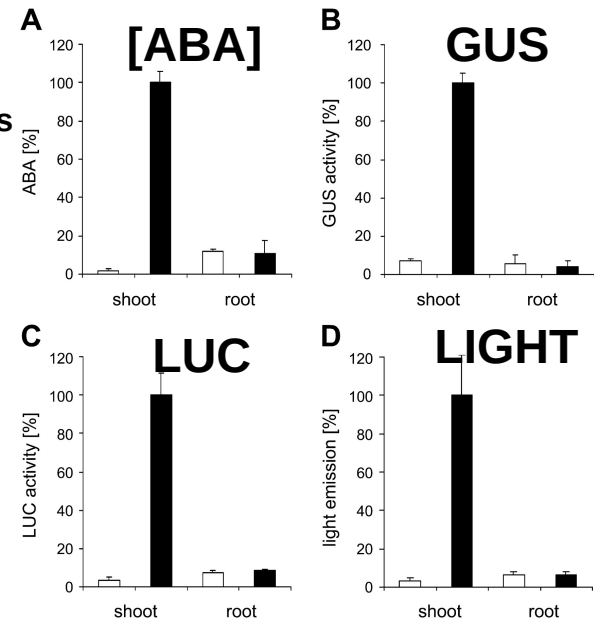
### 1/ Validation



### 2/ activation différentielle dans la plante



■ water stress by root  
□ control



*abi1-1*: mutant de perception d'ABA  
*aba2-1*: mutant synthèse d'ABA

**Ccl** : suite à un stress hydrique, l'ABA est actif dans les feuilles (stomates, vasculature) !!

# 5 Communication longue distance du stress hydrique

- Mise en évidence d'un signal hydraulique racine → tige

## 1/ Expériences de greffe

### CONCLUSION:

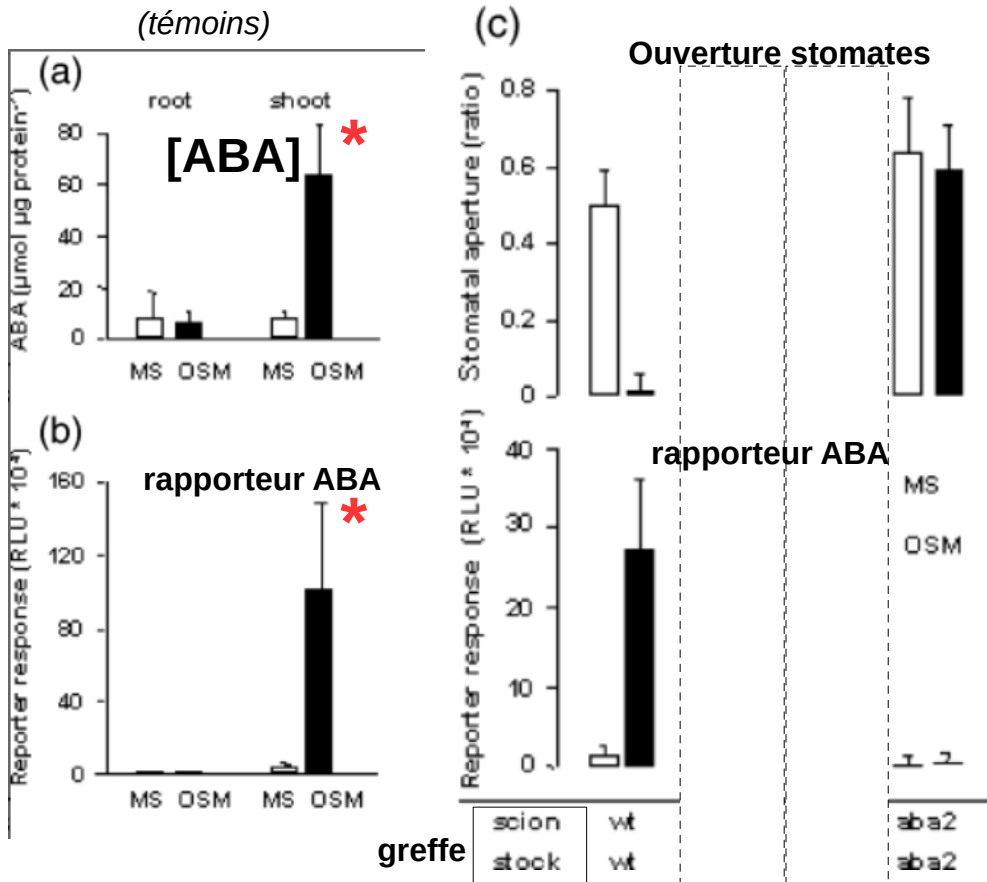
L'ABA nécessaire à la réponse aérienne (rapporteur + fermeture de stomates) ne vient que des parties aériennes, pas des racines (ABA aérien nécessaire et suffisant)

### Question :

Quel est le signal relai entre la racine et les feuilles ??

- longue distance
- chimique ? électrique ?

Hydraulique ?

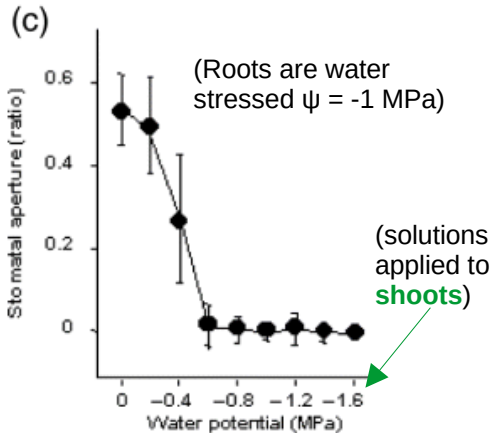
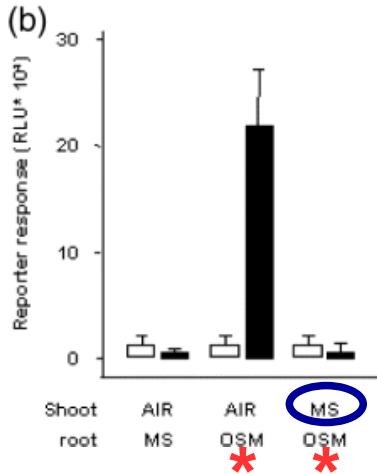
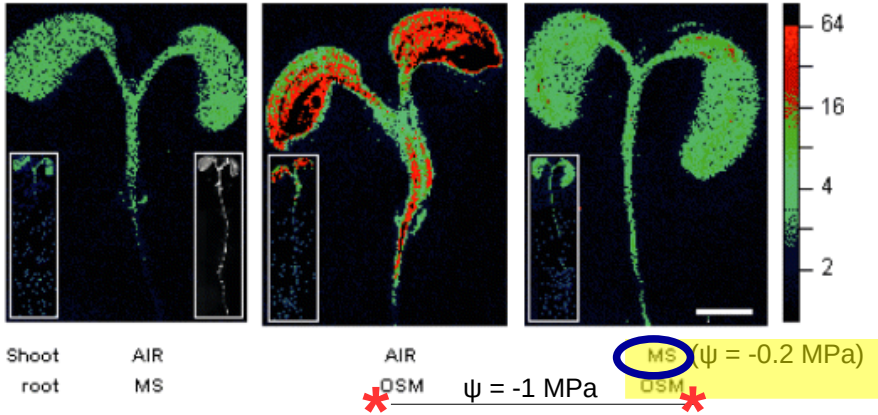


# 5 Communication longue distance du stress hydrique

- Mise en évidence d'un signal hydraulique racine → tige

## 2/ Atténuation du signal

( ← 8h post treatment → )



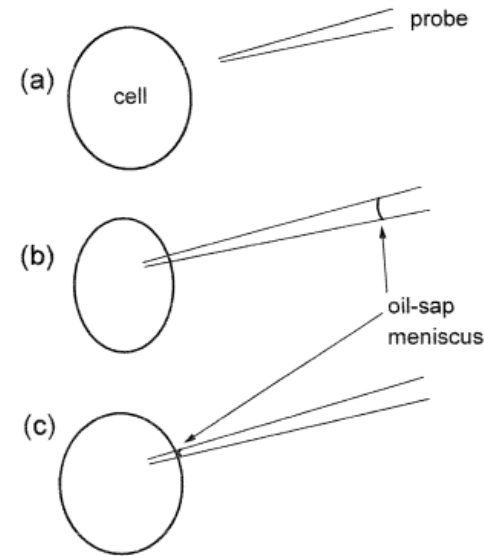
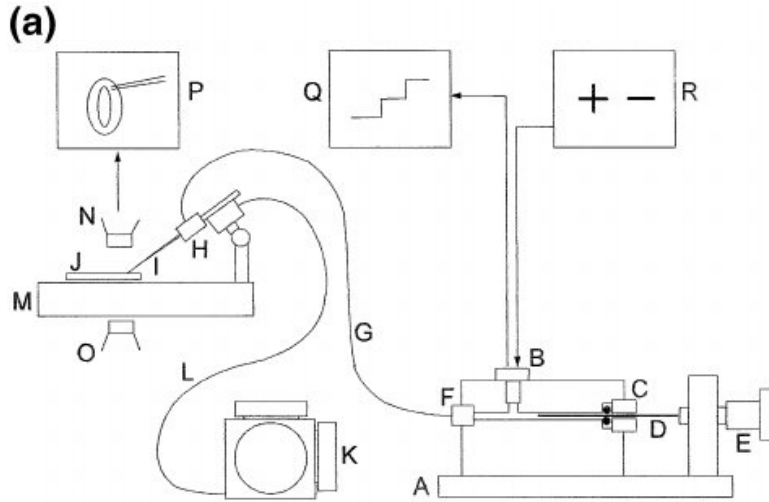
Christmann A. *et al.*, 2007

- Hypothèse testée : L'application directe d'eau osmosée sur les cotylédons (« water-feeding ») est sensée réduire un signal hydraulique local
- Résultat: on observe bien une baisse de la réponse ABA et fermeture des stomates, qui dépend du potentiel hydrique de la solution locale
- Autres explications possibles: l'eau interfère avec la signalisation ABA, un signal chimique ou la capacité des feuilles à répondre à ce signal

## 5 Communication longue distance du stress hydrique

- Mise en évidence d'un signal hydraulique racine → tige

### 1/ Principe des mesures de turgescence par des sondes cellulaire à pression



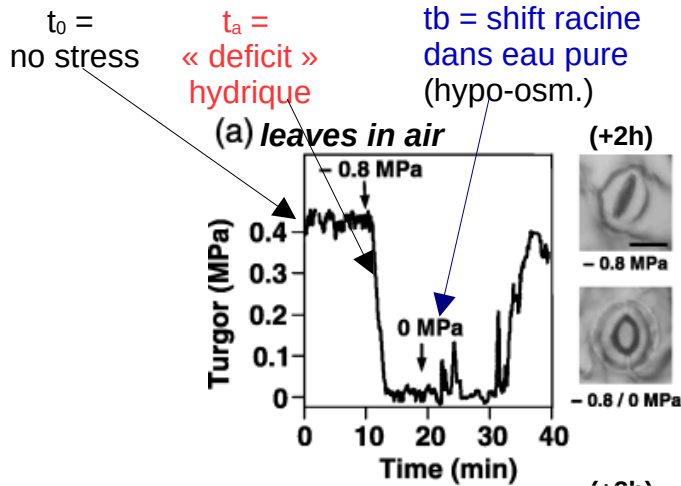
A, piston and transducer housing, incorporating pressure transducer (B), piston guide and o-ring seal (C), piston shaft (D), micrometer screw (E); F, HPLC tubing; G, HPLC tubing; H, glass capillary holder; I, borosilicate glass capillary pulled to a fine pointed tip; J, specimen (epidermal peel in well slide or intact leaf); K, hydraulic micromanipulator; L, hydraulic line; M, microscope stage; N, long working distance microscope objective lens necessary for intact leaves; O, microscope objective lens on inverted microscope (suitable for epidermal peels); P, image monitoring and capture; Q, transducer output; R, transducer power supply (high precision regulated voltage).

→ Dans notre étude (cf dia suivante), les mesures sont faites sur des cellules de mésophylles de la feuille

## 5 Communication longue distance du stress hydrique

- Mise en évidence d'un signal hydraulique racine → tige

### 2/ Cinétique des réponses de turgescence DANS LA FEUILLE et ouverture des stomates



Note: l'effet sur la turgescence des cellules du mésophylle est **indépendant de l'ABA** : il se produit dans les mutants *abi1* et *aba2*

## Conclusions

« Taken together, the data show that water stress applied to the root generates a **hydraulic signature** in the shoot. The response was **independent of ABA** and **preceded stomatal closure**. The data imply that a **hydraulic signal functions in the long-distance communication of water status** ».

Christmann A. et al., 2007

➡ L'eau (le potentiel hydrique): une molécule de signalisation dans la plante ?

## TRANSPORT DE L'ABA POUR LA FERMETURE DES STOMATES ?

Attention : différence entre espèces et conditions environnementales ?

Translocation possible d'ABA racine → tiges chez d'autres espèces

Comparaisons entre tests (in vitro / sol, temps de réponse)

apple (*Malus x domestica*), sunflower (*Helianthus annuus*) and sycamore (*Acer pseudoplatanus*),

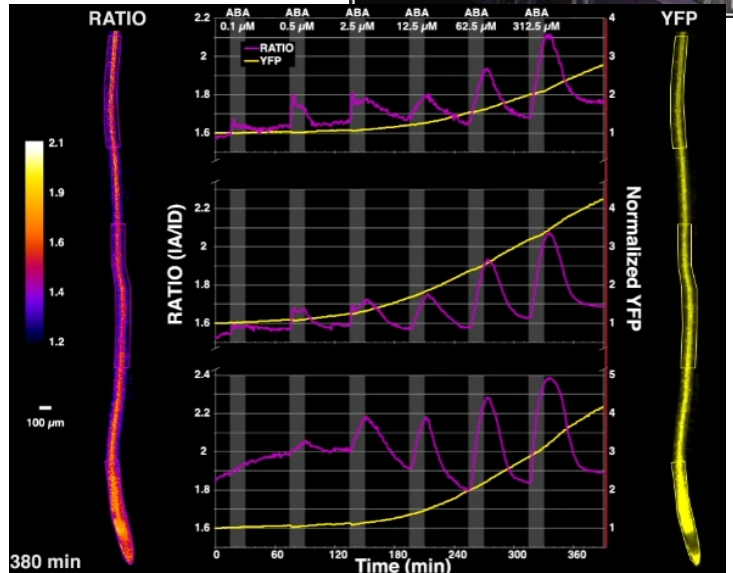
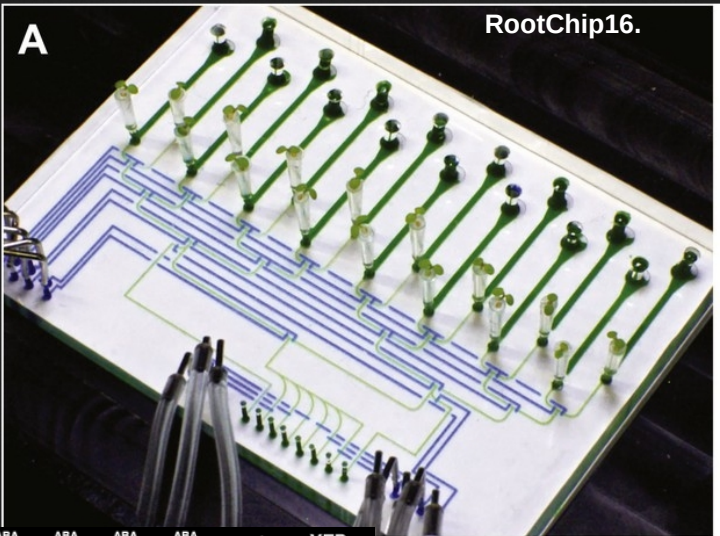
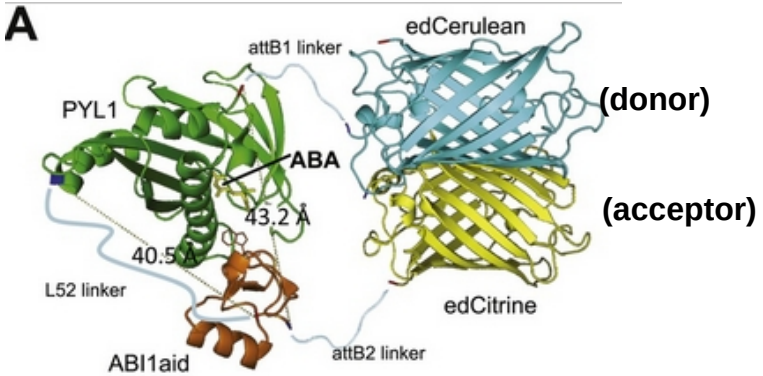
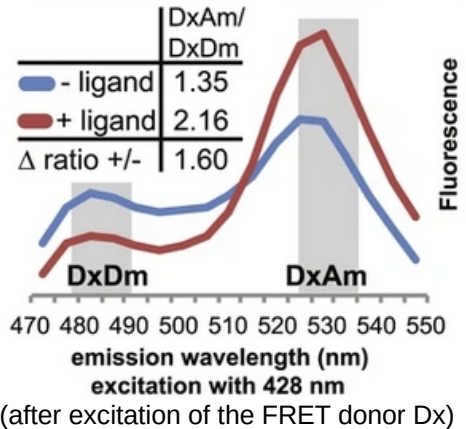
- **stomatal closure** occurred when a **part of the root system** was exposed to water deficit, even though the water status in the leaves remained unchanged (Wilkinson and Davies 2002).
- **ABA concentrations in the xylem sap** were **correlated** with **stomatal** conductance, while bulk **leaf ABA** concentrations **were not** (Wilkinson and Davies 2002).

Seo M. et al., 2011

# Dynamique de l'ABA, une histoire en construction !

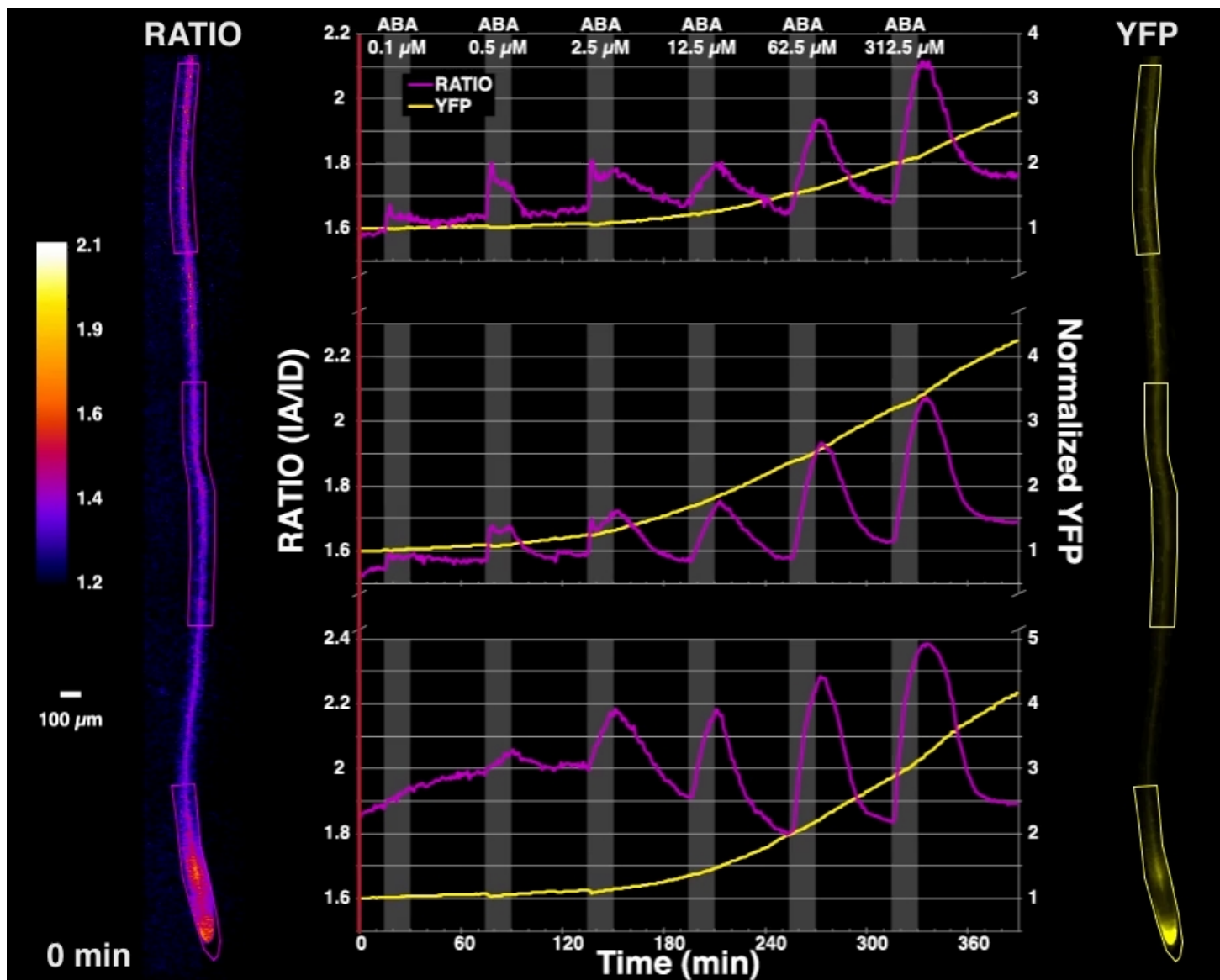
## ABACUS1 (an Abscisic Acid Concentration and Uptake Sensor version 1)

Biosensor example with positive  $\Delta$ ratio



(vidéo)



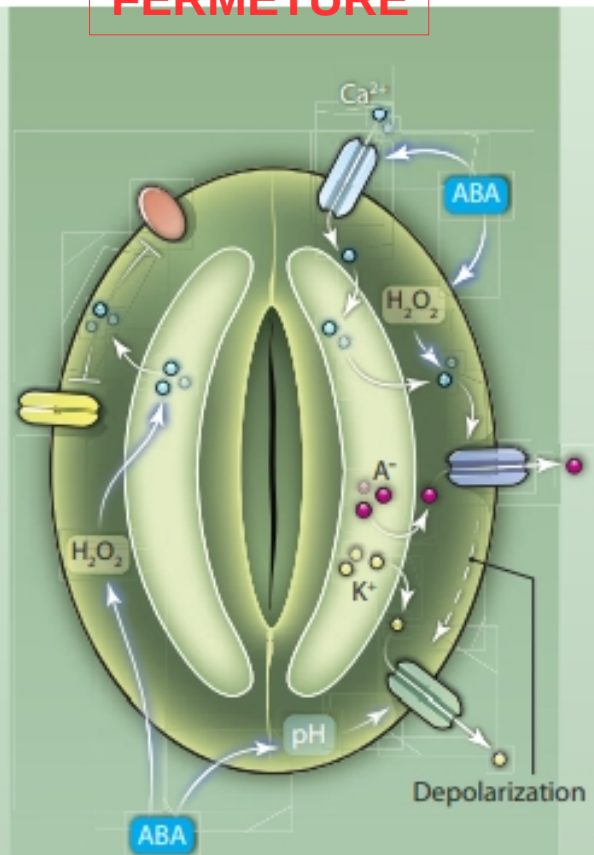
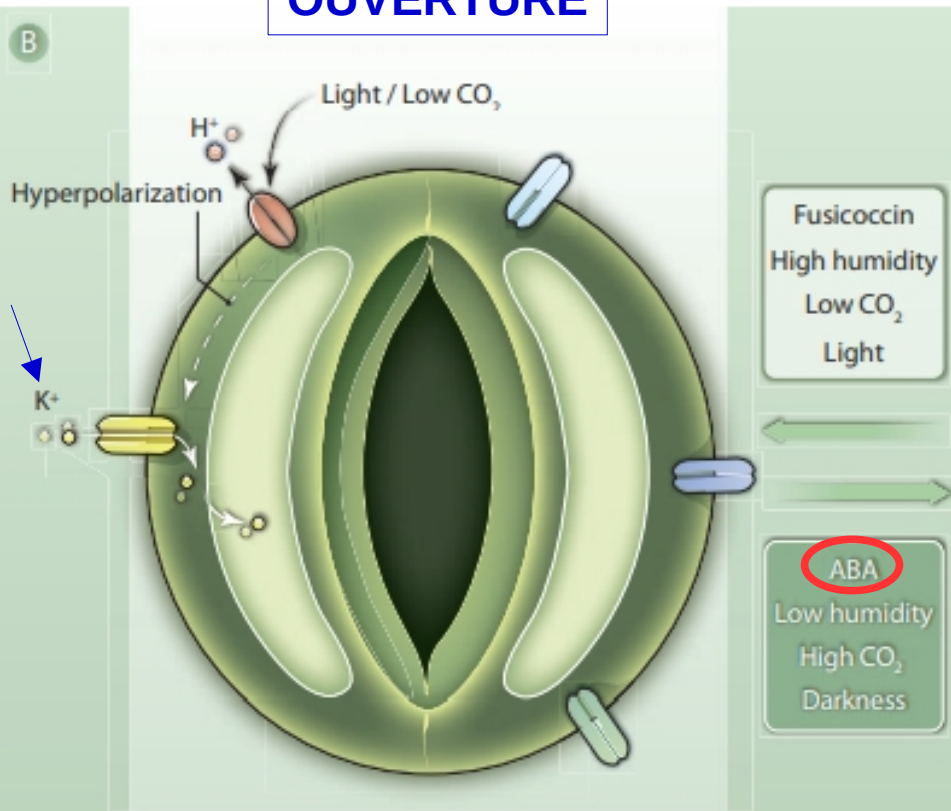
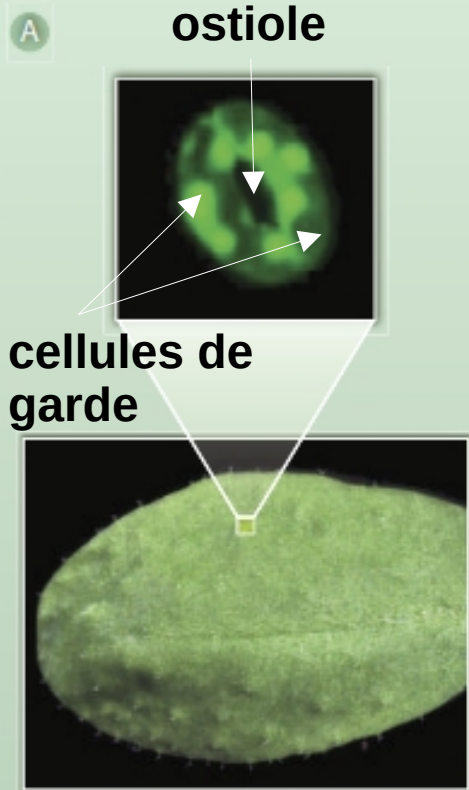


6

# Fermeture des stomates en réponse au stress hydrique

## OUVERTURE

## FERMETURE

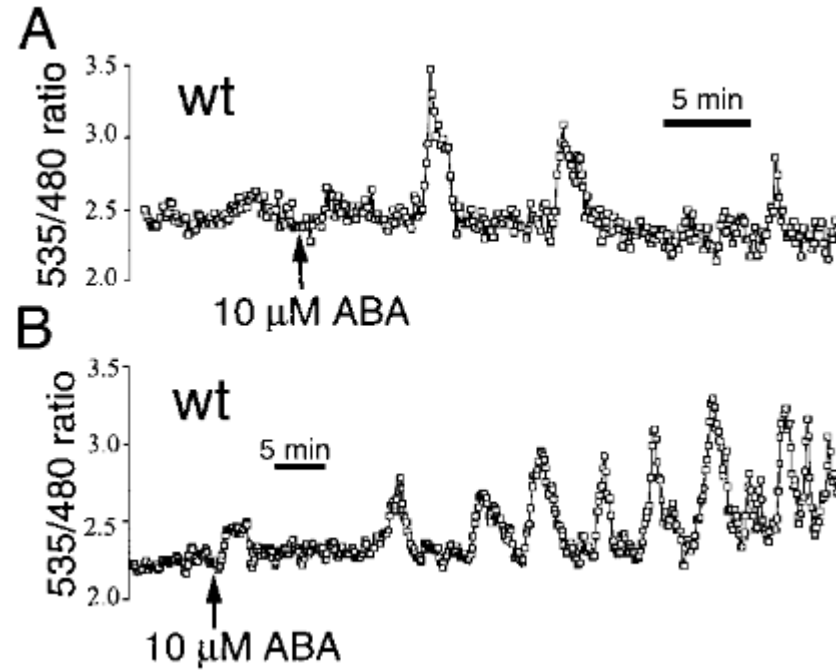


entrée d'eau et d'ions (K<sup>+</sup>) →  
+ pression de turgescence

Sortie d'eau et d'ions →  
**baisse de turgescence**

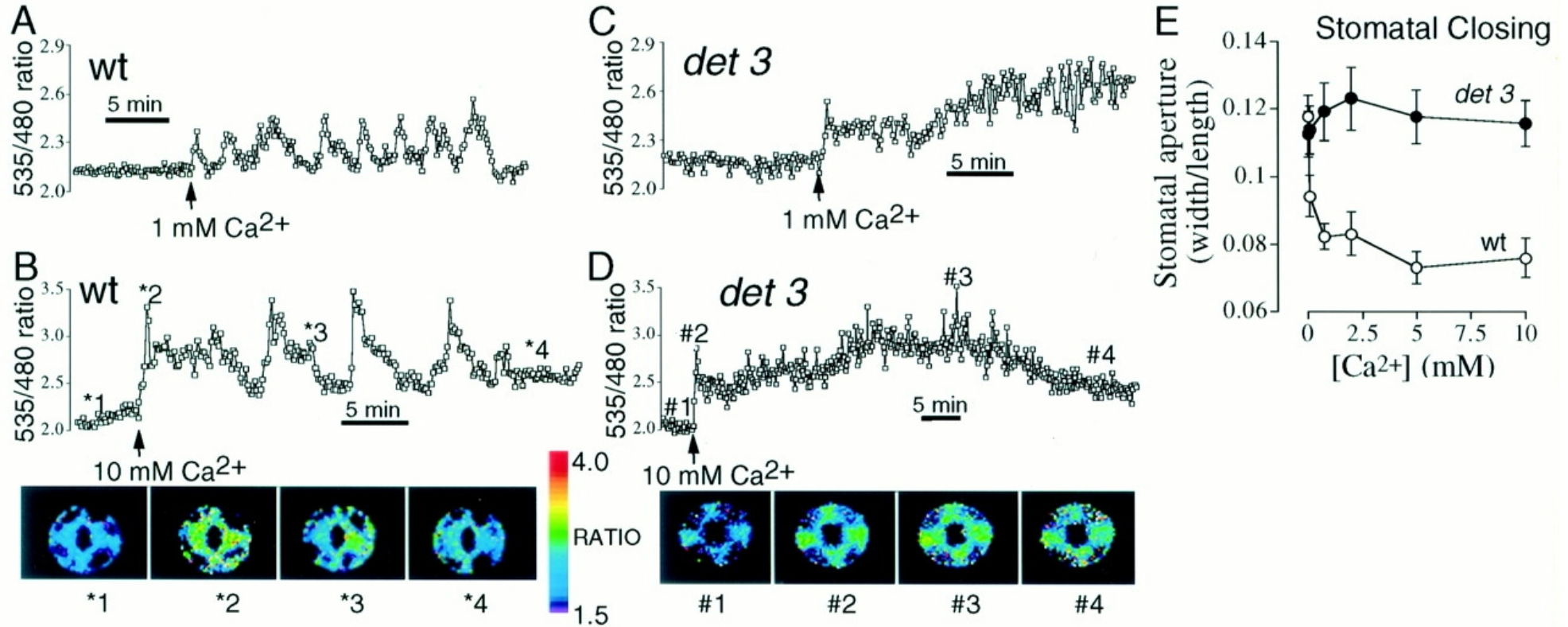
## 6 Fermeture des stomates en réponse au stress hydrique

### 1/ Oscillations calciques déclenchées par l'ABA



## 6 Fermeture des stomates en réponse au stress hydrique

2/ Les oscillations calciques sont importantes (plus que la concentration)



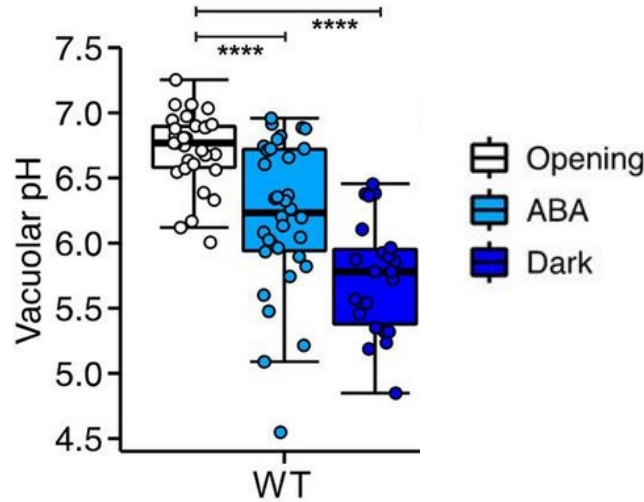
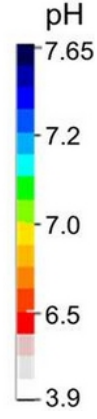
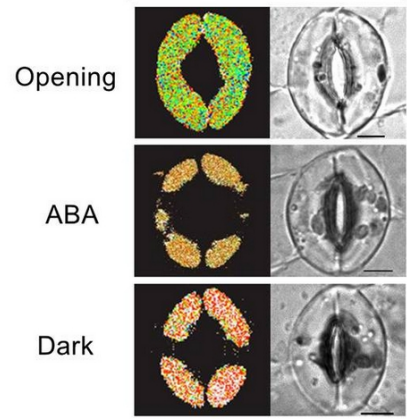
# 6 Fermeture des stomates en réponse au stress hydrique

## 3/ Rôles des pompes à protons et dynamique de la vacuole

### VACUOLES

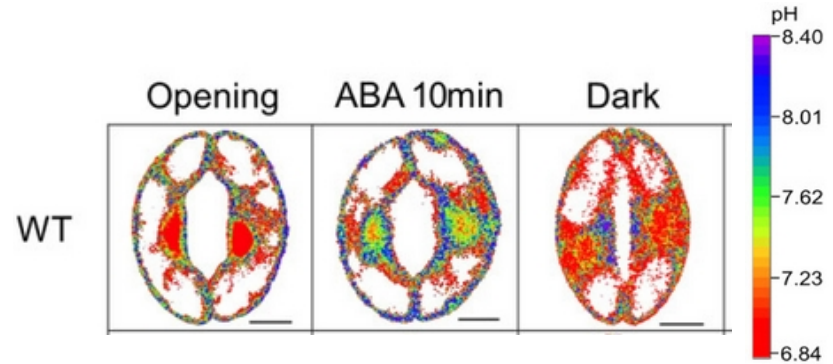
e

WT



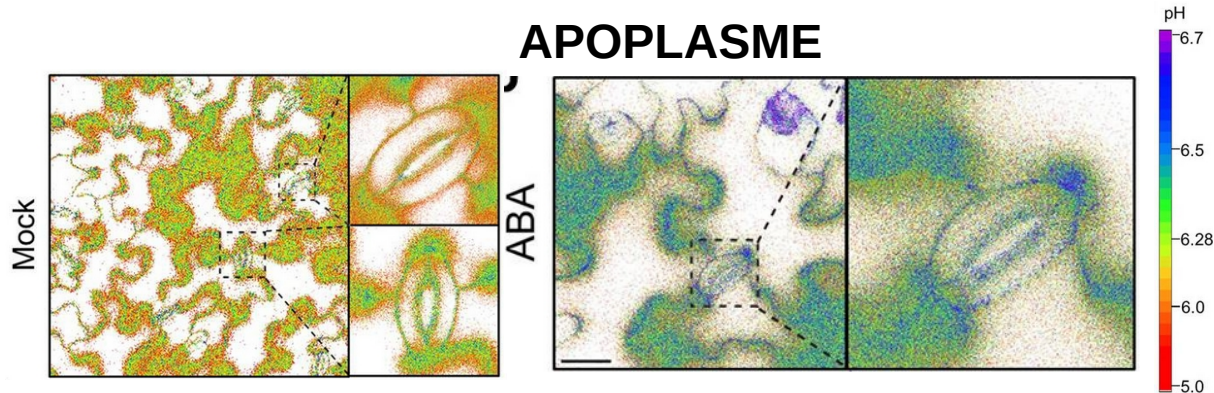
pH-sensitive vacuolar loading dye BCECF

### CYTOPLASME



Senseur pH cytosolique : ClopHensor

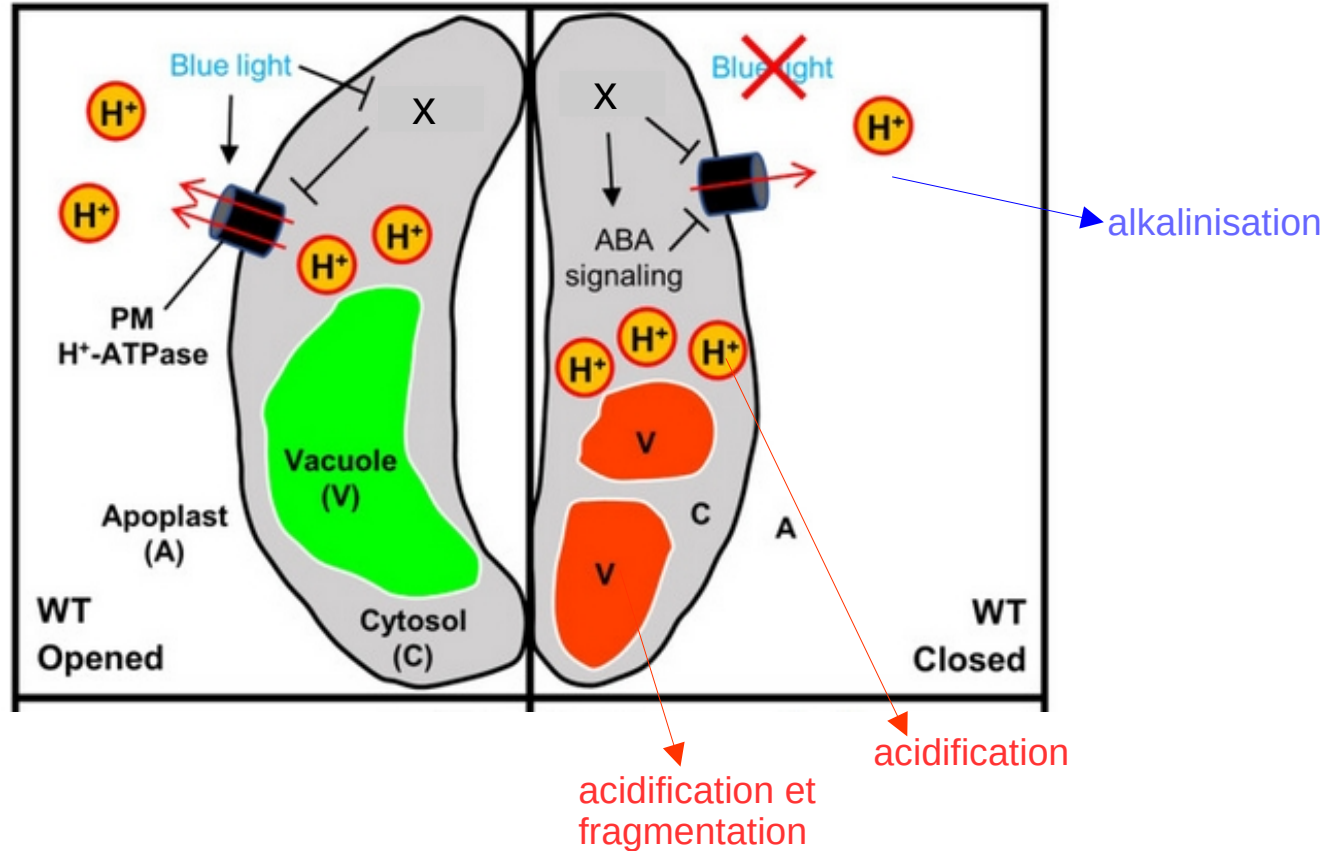
### APOPLASME



Senseur pH paroi : HPTS

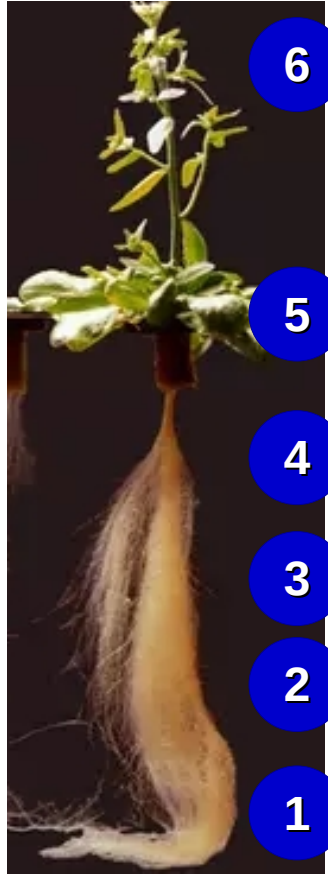
# 6 Fermeture des stomates en réponse au stress hydrique

## 3/ Rôles des pompes à protons et dynamique de la vacuole



# BILAN : Comment les plantes réagissent-elles à des stress hydriques (manque d'eau) ?

---



6

Racines

Shoot

5

Racines latérales

**ABA**

4

Hydrotropisme

Aquaporines

Stomatal closure

3

Suberisation

2

1

# Quelques éléments autour de la régulation du statut hydrique des plantes

---

- 1) (Rappels ?) L'eau et les plantes terrestres : rôles, flux et notion d'équilibre hydrique
- 2) Étudier les flux d'eau dans la plante
- 3) Adaptations possibles au manque d'eau
- 4) Réflexions épistémologiques : c'est quoi la « physiologie » des plantes ?





# Qu'est-ce que la physiologie ?

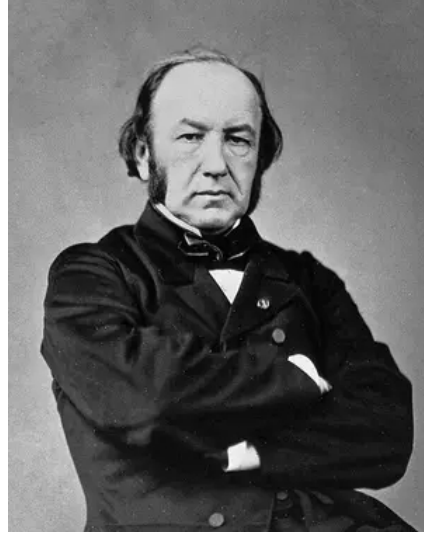
Physiologie : *phusis* = nature ; *logos* = étude/science  
« comment ça fonctionne ? »

Discipline centrée autour des **grandes fonctions** :

- Bilan énergétique (respiration, fermentation, photosynthèse, thermorégulation...)
- Nutrition
- Échanges / flux de matières et énergie avec le milieu extérieur
- Maintien du milieu intérieur
- Locomotion (/ comportement)
- Défense / immunité
- Reproduction

... et de **grands « systèmes »** qui participent à ces fonctions:

- nerveux,
- sensoriel,
- respiratoire,
- Reproducteur
- Digestif
- « racinaire », « foliaire »
- ...



Claude Bernard  
(1813-1878)

# Qu'est-ce que la physiologie ?

- Elle s'est développée en lien très fort avec la **médecine humaine**
- **comprendre le fonctionnement pour soigner**

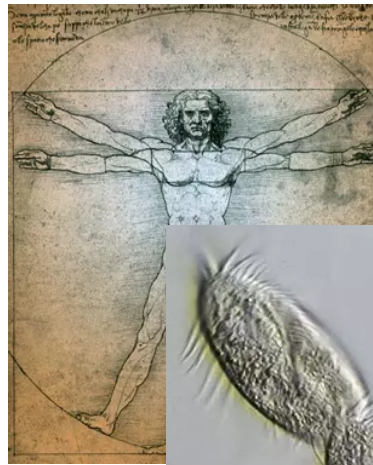
Peut-on généraliser la physiologie ?

? Peut-on généraliser la discipline à tous les êtres vivants :

- Un animal ?
- Une bactérie ?
- Un protozoaire ?
- Un champignon ?
- Une algue ?
- Une plante ?

? N'y a-t-il pas des fonctions spécifiques ?

? Des systèmes spécifiques n'ont-ils pas évolués ?



# Des exemples concrets : définir les contours de son sujet

## **Le développement**

- Chez les animaux (humain) : il est généralement exclu
- mais pour les plantes ??
  - le cas des tropismes (vu dans ce cours) : physio ou développement ?
  - le développement des systèmes racinaires et aériens en général ?

Autres exemples où les plantes brouillent les catégories « animaliste »

### **Les hormones :**

- Physiologie animale ?
- Développement végétal ?

### **La reproduction végétale...**

- et les interactions biotiques avec les insectes ?

# Quelques réflexions personnelles que je partage ici sur le sujet...

- Les champs disciplinaires / thématiques ne sont pas des réalités biologiques, mais des constructions scientifiques. Une plante « ne fait pas » de la physiologie : elle vit, c'est tout !
- Ces disciplines sont le fruit d'un processus de fabrication, complexe (beaucoup d'acteurs), sur un temps plus ou moins long. Cela comporte des avantages (pertinence éprouvée, auto-correction, évolution, ajustement), et des inconvénients (imperfections, effets de mode, contradictions non levées)
- Elles doivent nous aider à comprendre un phénomène, pas nous empêcher de le penser ou nous restreindre. On peut (on doit?) essayer d'adopter différents points de vue sur un même problème. Et si les bonnes « lunettes » n'existent pas, les inventer !
- La pertinence du découpage disciplinaire de la biologie renvoie à une des difficultés majeures de cette science : dégager des « lois » générales qui tiennent compte des spécificités du vivant !

# Je vous prête mes lunettes ?

**Physiologie** → tous les phénomènes et mécanismes qui permettent le maintien ou le retour à un « **état de référence** » pour l'organisme

- État de référence est lié à la santé de l'organisme, son intégrité et sa stabilité (toutes les fonctions, pas de signe de maladie ou de morbidité)
- Notion d'**homéostasie** est fondamentale
- Elle implique d'identifier les étapes suivantes : perception d'un changement, mécanisme de compensation/adaptation, retour à l'état de référence.
- Tous les **moyens** (et toutes les lunettes) sont bon pour l'expliquer !

« *La physiologie, c'est la biologie du maintien de la situation où tout va bien* »

« *Le développement, c'est la biologie de la construction des formes du vivant* »

*etc...*



Contact : [fabrice.besnard@ens-lyon](mailto:fabrice.besnard@ens-lyon)  
Laboratoire RDP (ENS Lyon)

Christine :

Plasma membrane aquaporins regulate root hydraulic conductivity in the model plant

*Setaria viridis*

[https://academic-oup-com.insb.bib.cnrs.fr/plphys/article/193/4/2640/7248474?utm\\_source=etoc&utm\\_campaign=plphys&utm\\_medium=email](https://academic-oup-com.insb.bib.cnrs.fr/plphys/article/193/4/2640/7248474?utm_source=etoc&utm_campaign=plphys&utm_medium=email)

Ok vu en 2024. pas mal mais pas mieux que le cours → pour sujet d'exam ?

+ site C. Maurel IPSiM

Stomates :

BIAM → cellules de garde (N. Leonhardt) :

<https://www.cite-des-energies.fr/biam/recherche/pepss/themes-de-recherche-pepss/>

+ <https://www.ncbi-nlm-nih-gov.insb.bib.cnrs.fr/pmc/articles/PMC10844630/>