

Déterminants physiques et régulation des flux d'eau dans le système sol- plante-atmosphère

Jean-Louis Durand
INRA Lusignan

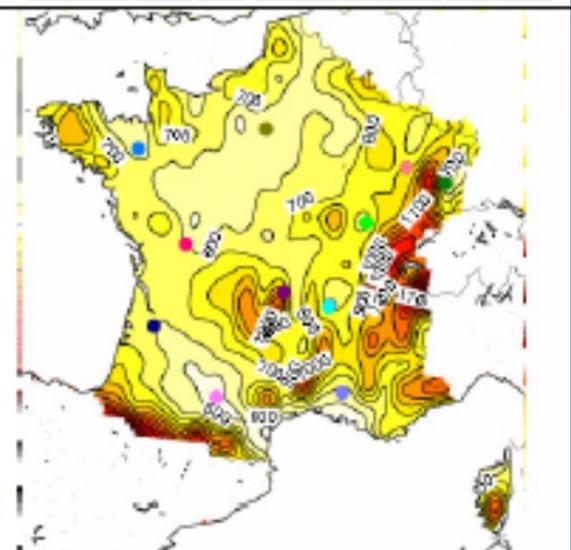
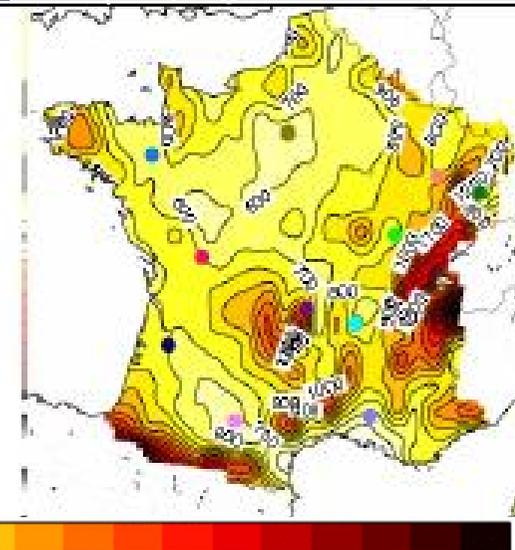
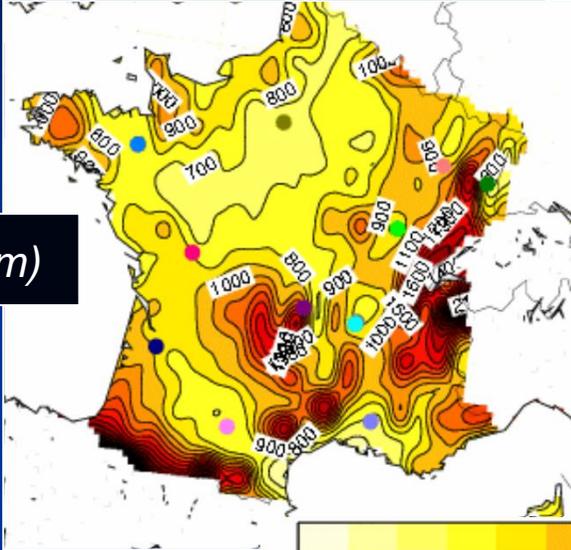
Evolution des pluies et du bilan hydrique climatique

1970-1999 (observé)

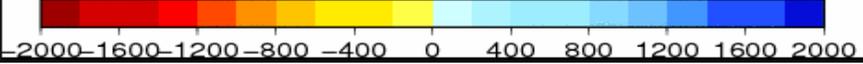
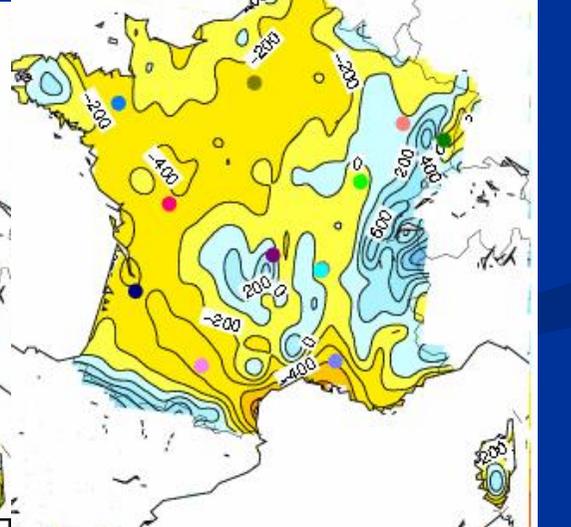
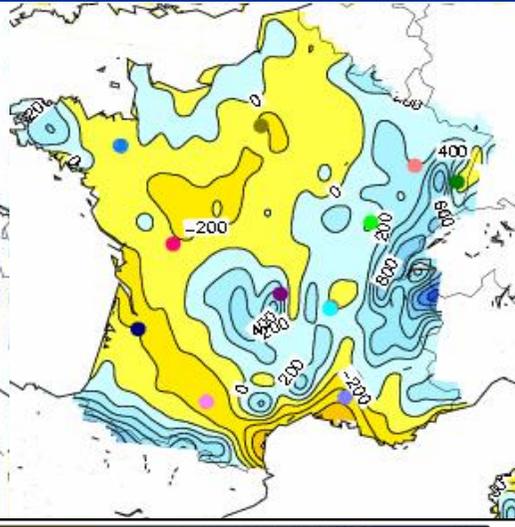
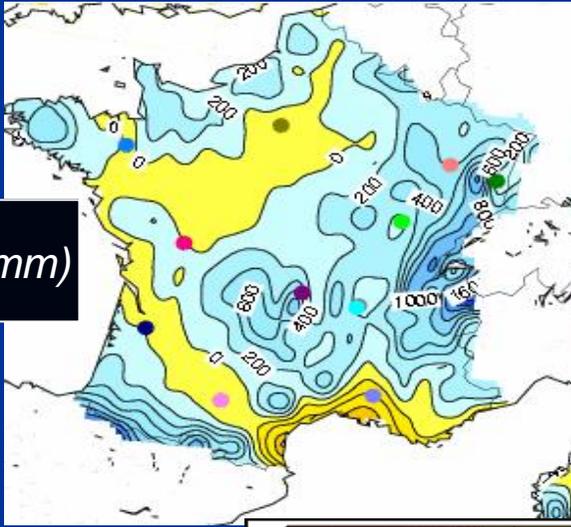
2020-2049 (simulé)
(Arpège-A1b-TT)

2070-2099 (simulé)
(Arpège-A1b-TT)

R (mm)



R-ETo (mm)



- **Le couplage hydrique des plantes et de l'atmosphère.**
 - Le rayonnement solaire.
 - Le déficit de saturation en eau de l'air.
 - Le bilan d'énergie d'une feuille et d'un peuplement.

- **Le bilan et l'état hydriques d'une plante.**
 - Le potentiel hydrique d'une plante
 - Teneur en eau relative, volume et contraintes dans une plantes
 - Rôles de la pression osmotique et de turgescence

- **Régulation du transport de l'eau dans la plante.**
 - La tension-cohésion
 - Le xylème
 - Les autres mouvements d'eau
 - Croissance volumique
 - Le phloème

- **Régulation de la transpiration.**
 - Conductance aérodynamique
 - Conductance stomatique
 - Conductance cuticulaire

- **Les ressources en eau du sol.**

Les variations temporelles et spatiales de l'humidité du sol
Conductivité hydraulique et état hydrique d'un sol.

- **Régulations de l'absorption de l'eau par la plante.**
 - Absorption d'eau par les racines.
 - À l'échelle de la racine
 - À l'échelle du système racinaire

**Déterminants
physiques et
régulation des flux
d'eau dans le
système sol-plante-
atmosphère**

atmosphère
système sol-plante-
d'eau dans le
régulation des flux
physiques et

■ Bibliographie

■ *Livres*

- Cruiziat & Lagouarde 1996. Actes de l'Ecole Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Tome 1. De la plante au peuplement végétal. INRA éditions. 670 p.
- Kramer & Boyer 1995. Water relations of plants and soils. Academic Press, Inc.
- Lüttge, Kluge et Bauer. U 2002. Botanique. Tec&Doc. 604 p.
- Loomis et Connor, 1992. Crop Ecology : productivity and management in agricultural systems. Cambridge University Press. 538 (existe une traduction en espagnol).
- Nobel P. S. Nobel. 2005. Physicochemical and Environmental Plant Physiology, 3rd ed Academic Press/Elsevier Burlington, 567 p

■ *Articles*

- Burch JH, 1978. Soil and Plant Resistances to Water Absorption by Plant Root Systems . Aust. J. Agric. Res., 1979, 30, 279-92.
- Doussan, Vercambre, Pagès, 1999. Water uptake by two contrasting root systems (maize, peach tree): results from a model of hydraulic architecture; (*Etude de l'absorption hydrique par deux types de système racinaires contrastés [mais-pecher] avec un modèle d'architecture hydraulique*) Agronomie 19, 255-263.
- Jones H, 2007. Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. J Exp Bot 58, 119-130.
- Monteith J. 1995. A reinterpretation of stomatal responses to humidity. Plant Cell Env. 18, 357-364.
- Passioura J 1988. Water transport in and to roots. Ann Rev Plant Physiol Plant Mol. Physiol. 39, 245-565.
- Raschke, 1979. Movements of Stomata. In Haupt & Feinleib (ed) Physiology of Movements. Springer Verlag. 381-441.
- Sack , Holbrook, 2006. Leaf Hydraulics. Ann Rev Plant Biol. 57, 361-381.
- Tardieu, Davies, 1992. Stomatal response to abscissic acid is a function of current plant water status. Plant Physiol 98, 540-545.
- Tinker 1976. Roots and water . Phil Trans R Soc London B 273, 445-461.

Composantes du potentiel hydrique: la pression osmotique

$$\pi \cong RT \frac{n_s}{V_e}$$

$$\pi_0 \cong RT \frac{n_s}{V_0}$$

$$\pi \cong \pi_0 \frac{V_0}{V_E}$$

$$\pi = \pi_0 R_{WC}$$

Composantes du potentiel hydrique: la pression hydrostatique (turgescence)

$$\left\{ \begin{array}{l} dP = \varepsilon \frac{dV_e}{V_e} \Rightarrow P = P_0 \left(\frac{V_e}{V_0} \right)^{\varepsilon_0} \\ \varepsilon = \varepsilon_0 P \end{array} \right.$$

P_0 est la pression à pleine turgescence ($\psi = 0$)

Force motrice de l'eau en général

- Travail = force motrice * déplacement = variation d'énergie potentielle par unité de volume (potentiel hydrique)

$$W = d\psi = f dx \Rightarrow \vec{f} = \frac{d\psi}{dx}$$

De l'énergie par unité de volume à la pression...

$$\text{Joules/m}^3 \text{ --- } > \text{N m / m}^3 = \text{Pa}$$

L'unité « standard » de potentiel hydrique et ses composantes est le Pascal & ses multiples (MPa, kPa...)

La pression atmosphérique est proche de 0.1 MPa

- Conductivités hydrauliques

$$i_{SP} = K_{SP}(\psi_S - \psi_P)$$

Le chemin de l'eau

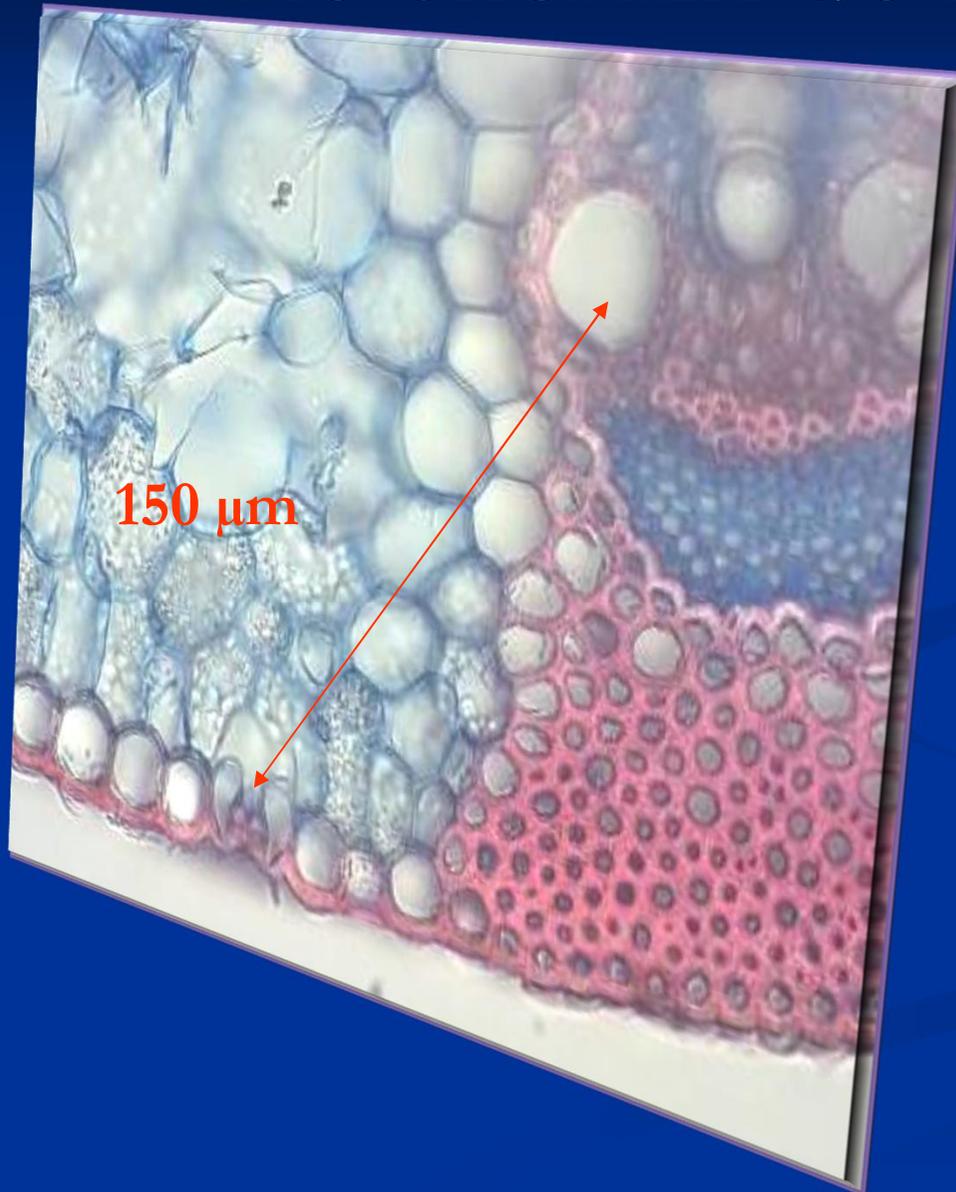
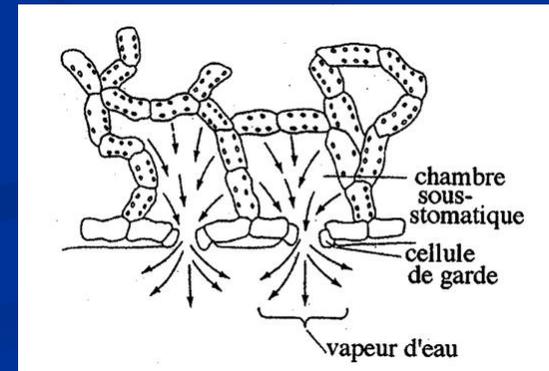


Photo S Carré, Lusignan

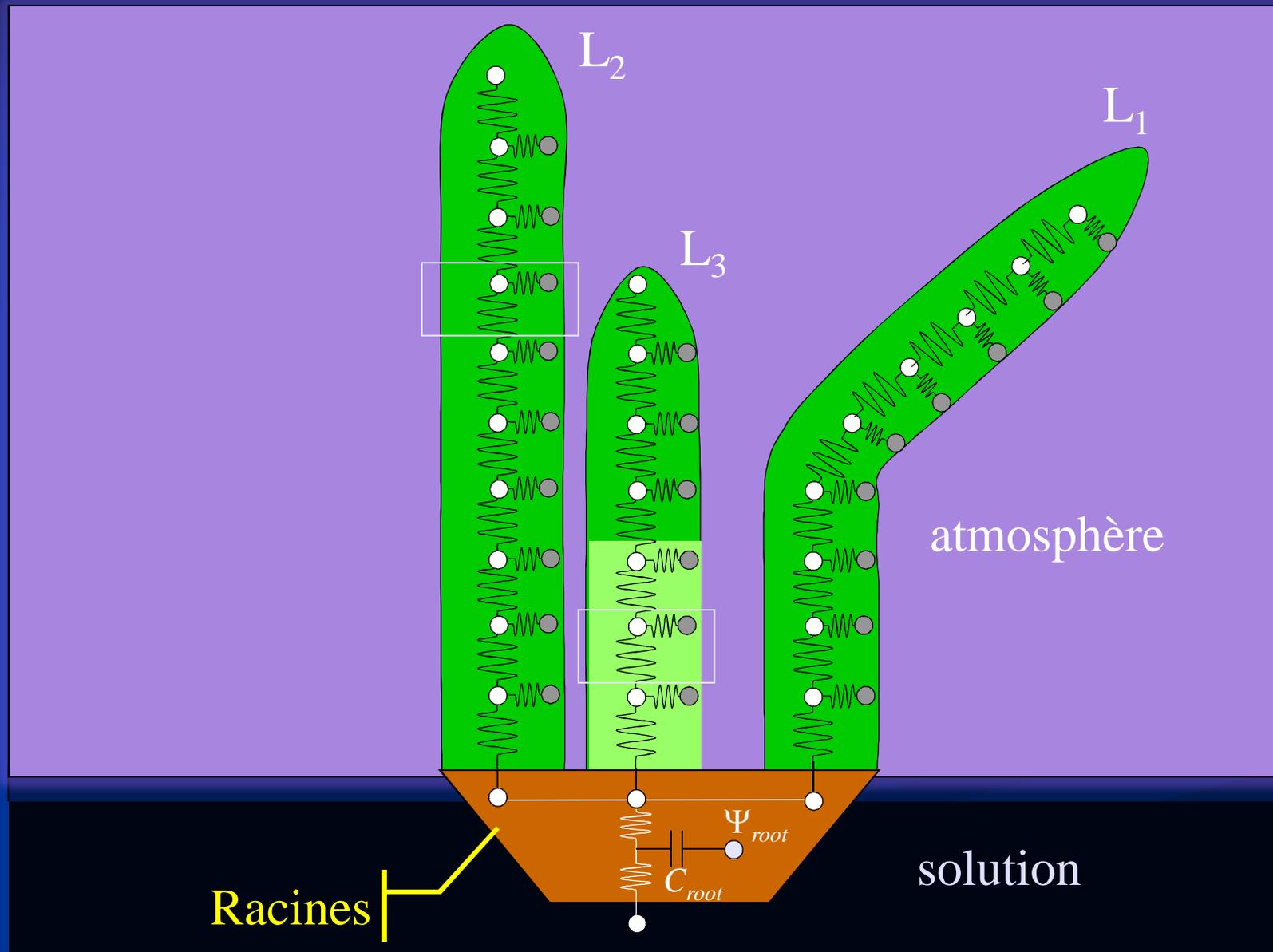


Flux d'eau à travers la plante



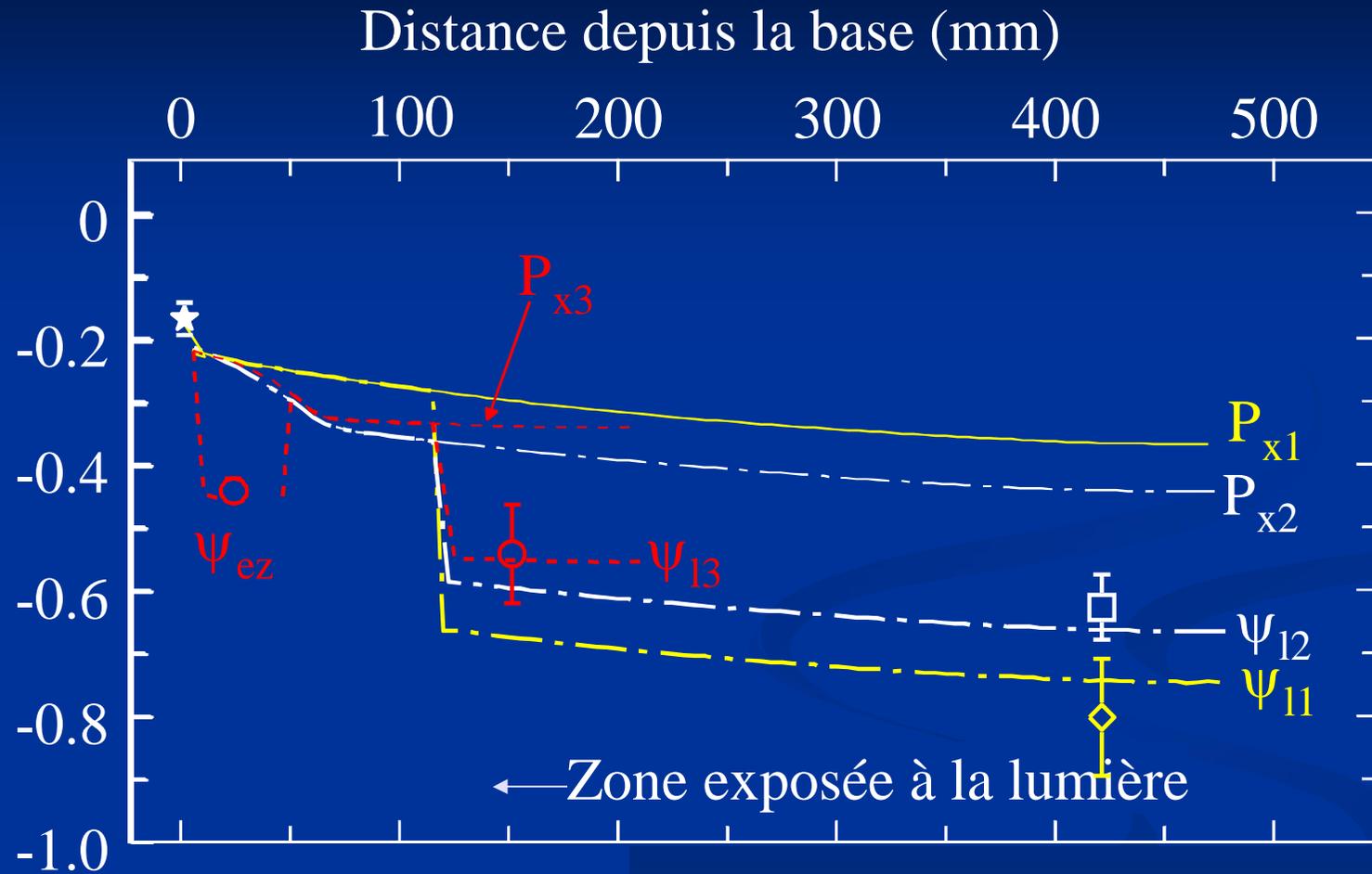
Régulation du transport de l'eau dans la plante

Architecture hydraulique d'une graminée



Mesures et simulations de potentiels hydriques

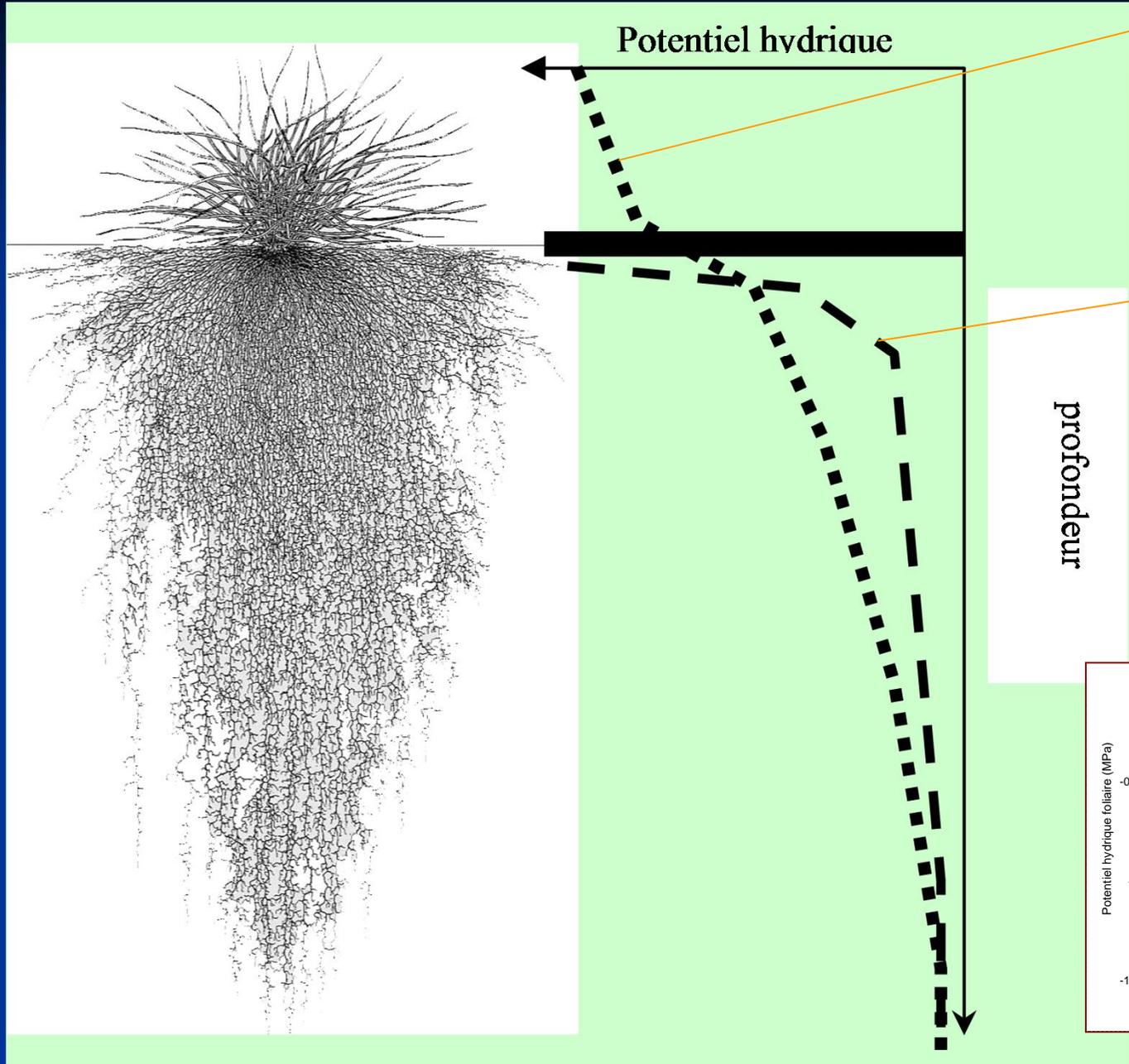
Mesures et simulations de potentiels
Du mésophylle et du xylème (MPa)



Martre et al. 2000. Hydraulic architecture and water flow in growing grass tillers (*festuca arundinacea*

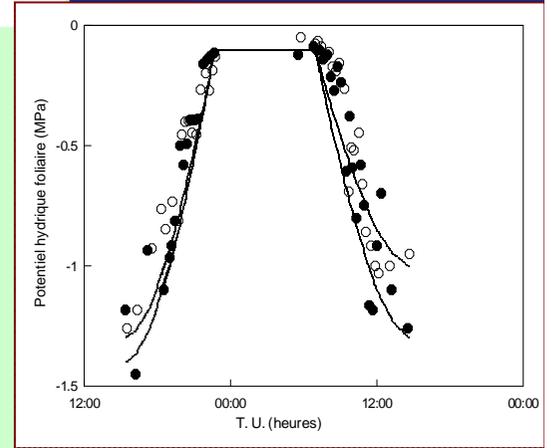
Comment fonctionne l'ascension de la sève

1. La transpiration commence sous l'effet de l'augmentation du rayonnement
2. La tension dans les parois des chambres sous-stomatique se relève et « tire » sur l'eau des vaisseaux
3. L'eau monte dans les vaisseaux depuis les racines dont le potentiel hydrique diminue
4. L'eau du sol entre dans les racines pour alimenter le courant transpiratoire
5. Un flux d'eau du sol vers les racines se établit, entraînant les ions mobiles (anions)



Potentiel hydrique de la plante

Potentiel hydrique du sol



Régulation du transport de l'eau dans la plante

Position	P MPa	π MPa	P _{gh} MPa	$RT/V_w Ln(R_H)$ MPa	Ψ MPa
Sol 0.5 cm	-0.03	0.01	0		-0.04
Sol adjacent aux racines	-0.1	0.05	0		-0.15
Xylème de la racine	-0.3	0.1	0		-0.4
Xylème dans la tige	-0.5	0.05	0		-0.55
Vacuole de la cellule mésophyllienne	0.8	1.4	0		-0.6
Parois cellule mésophyllienne	-0.5	0.1	0		-0.6
Air espaces intercellulaires			0	-0.6	-0.6
Air ch. sous-stomatique (95 % H.R.)			0	-7.0	-7.0
Air dans la couche limite (60%)			0	-70.2	-70.2
Air régional (50 %)			0	-95.1	-95.1

Evaporation d'une feuille

E_s = transpiration spécifique ($\text{mmoles m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

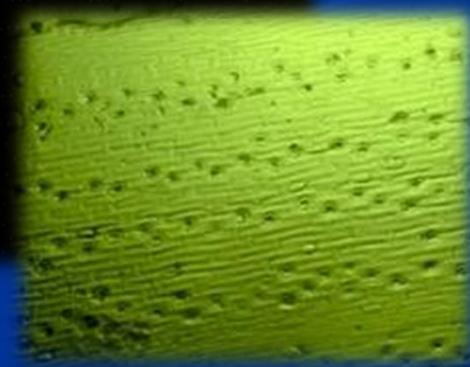
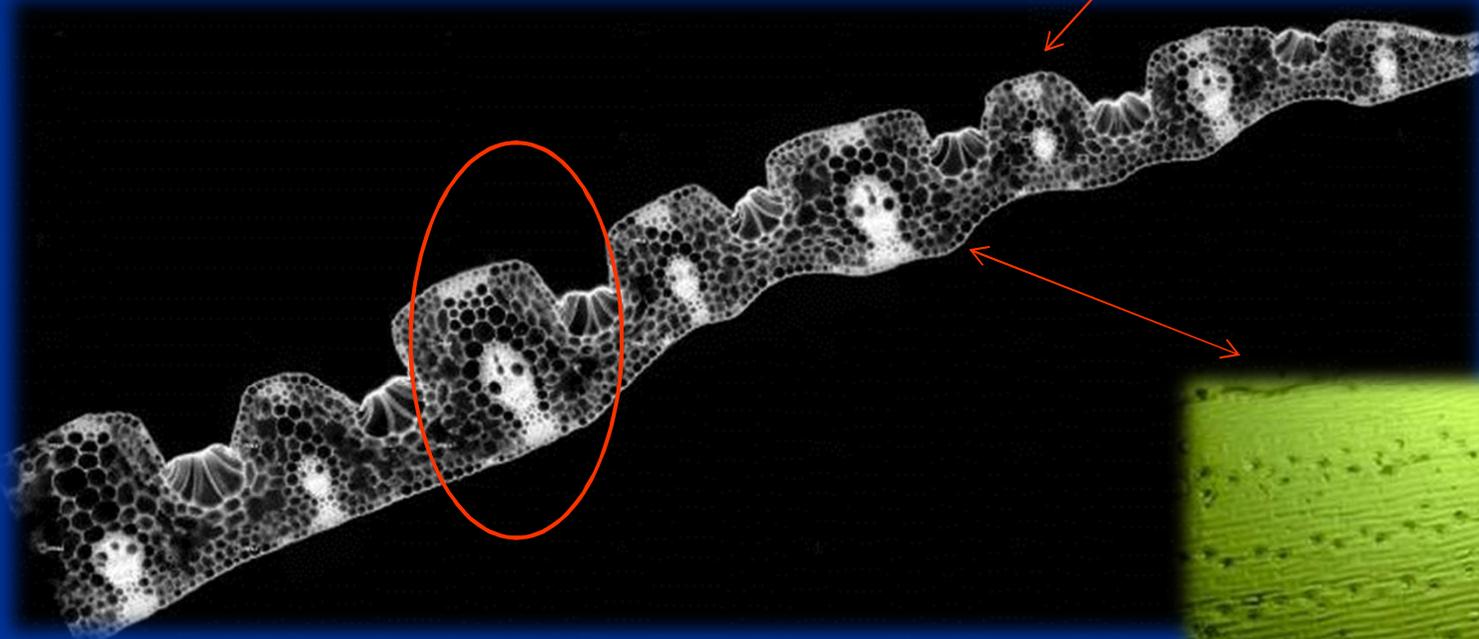
g_s = Conductance stomatique, en m.s^{-1}

S_f = surface de feuille (m^2)

e_f et e_a = concentrations en eau dans la feuille et dans l'air (mmoles m^{-3})

$$E = g_s (e_f - e_a) S_f$$

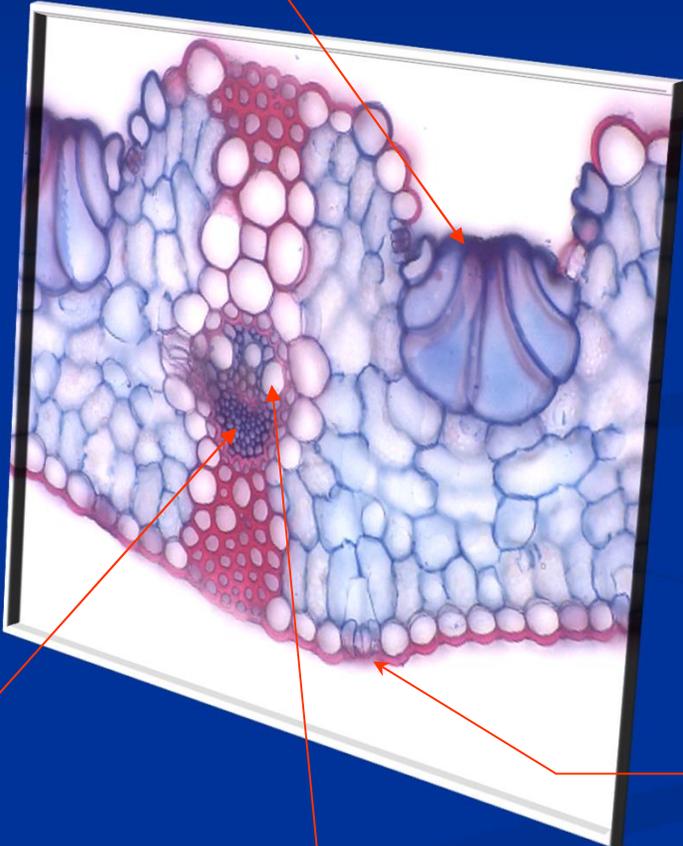
Régulation de la transpiration.



Stomates sur une feuille de détuque élevée

Régulation de la transpiration.

Cellules
bulliformes



100μ

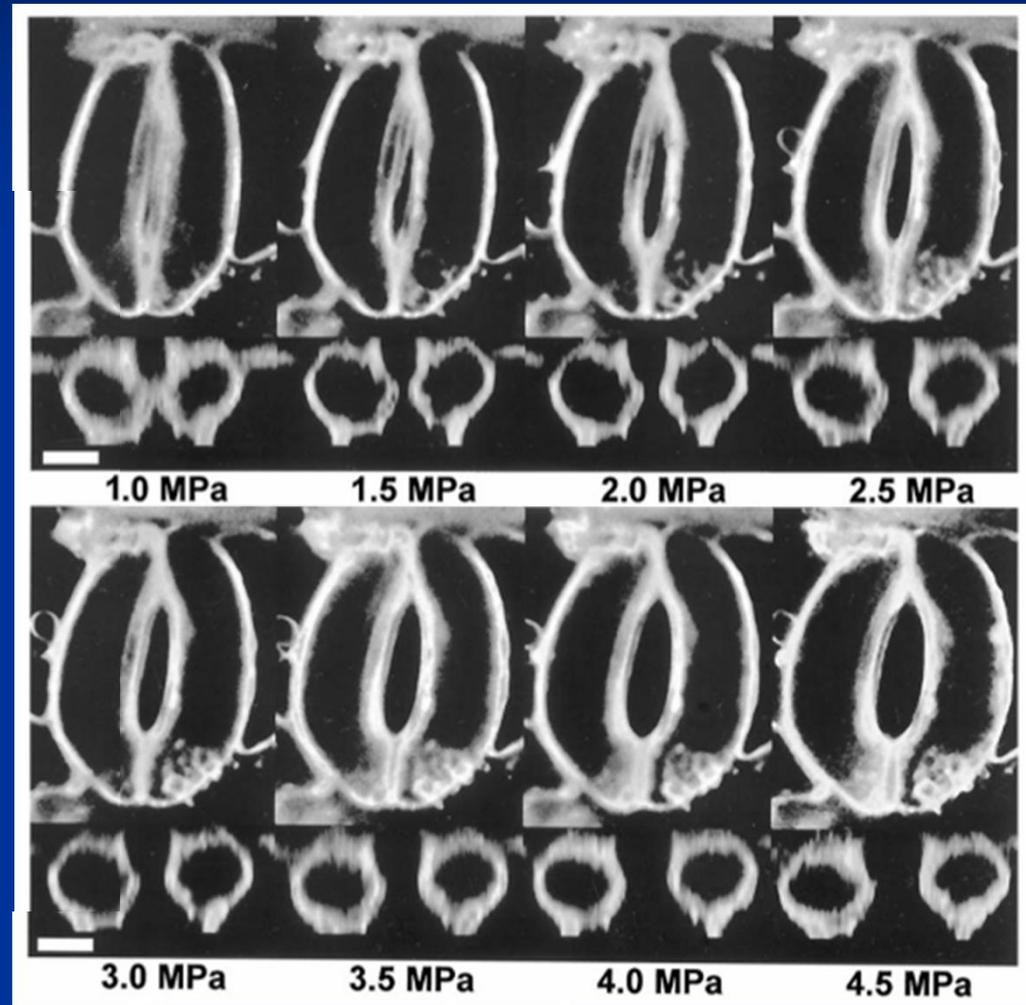
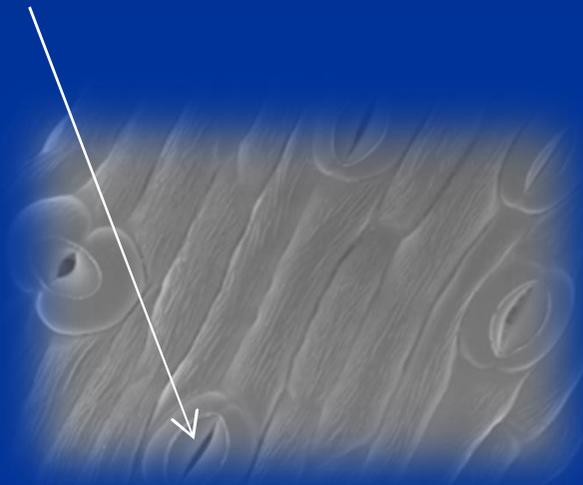
phloème

xylème

stomate

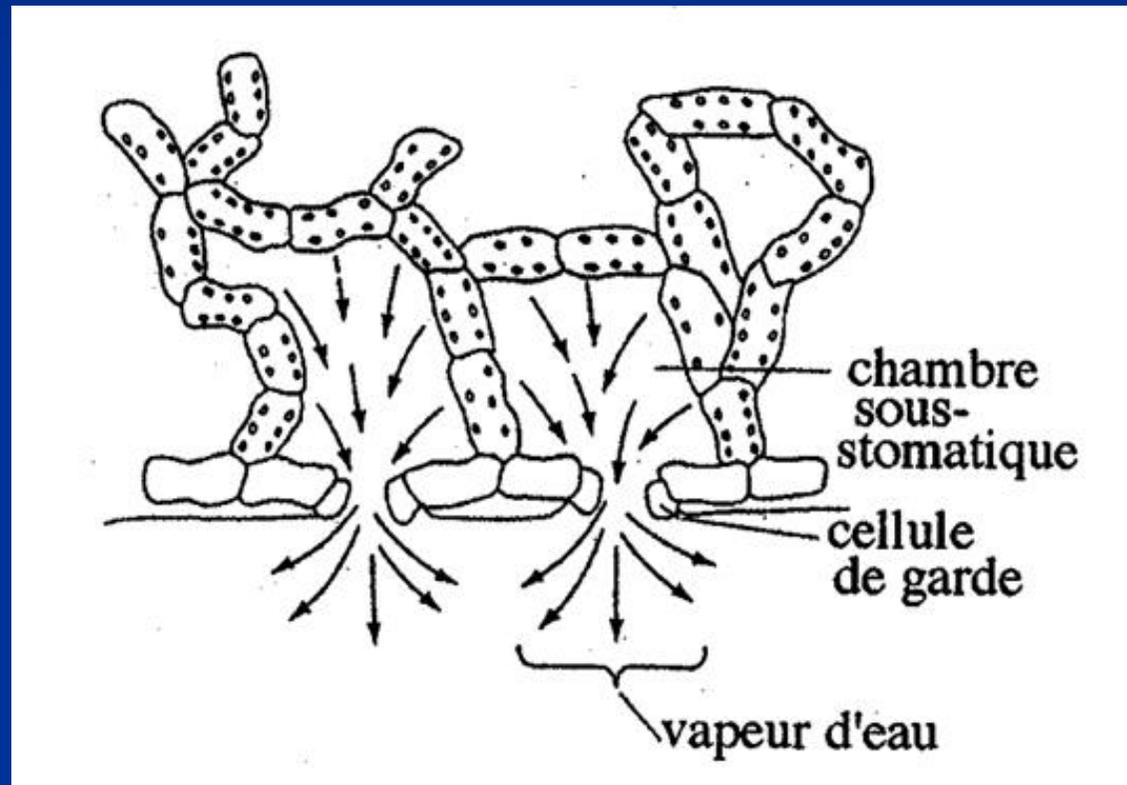
Exemple : ouverture et fermeture des stomates

stomate

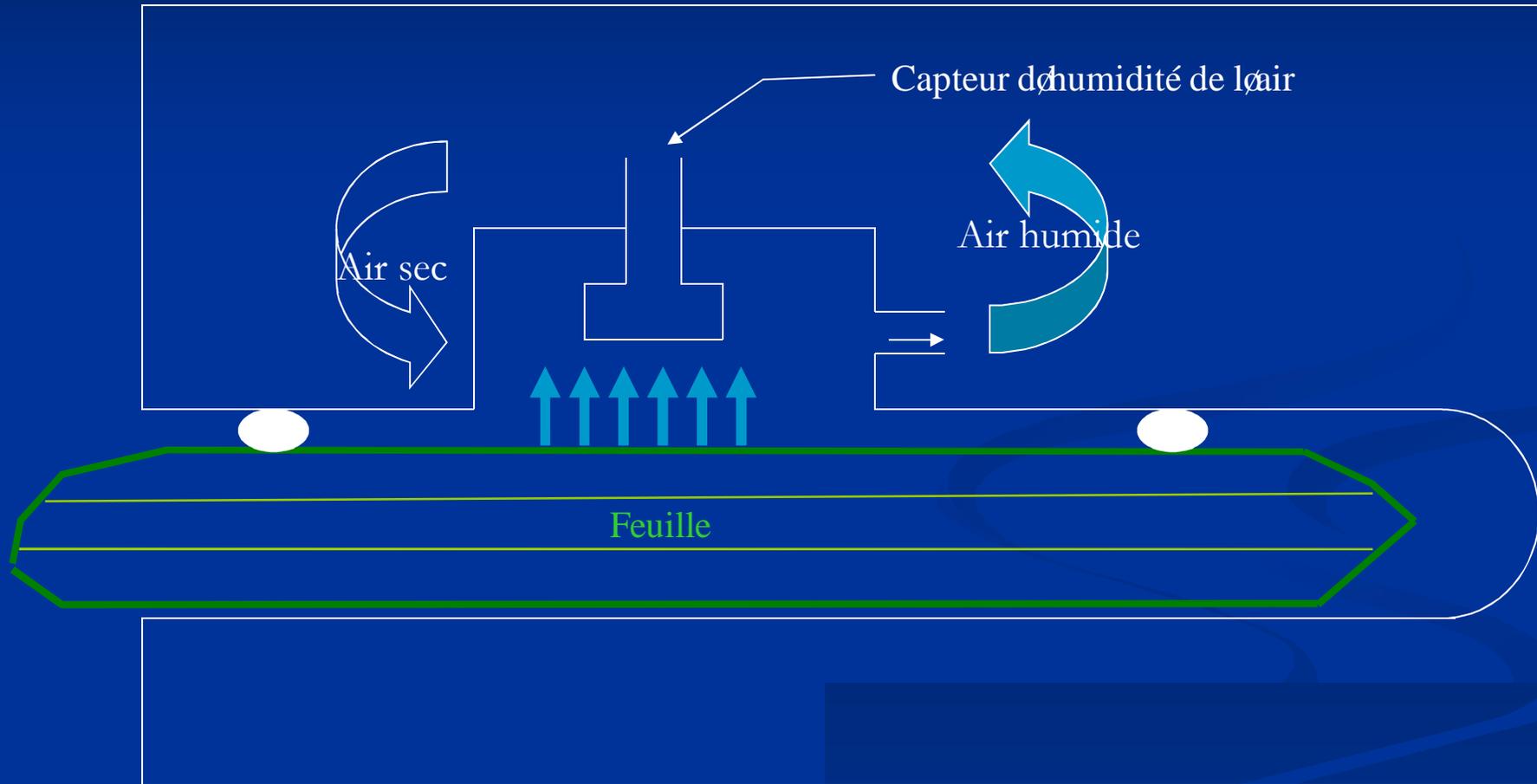


Franks *et al*, Plant Physiol. 2001

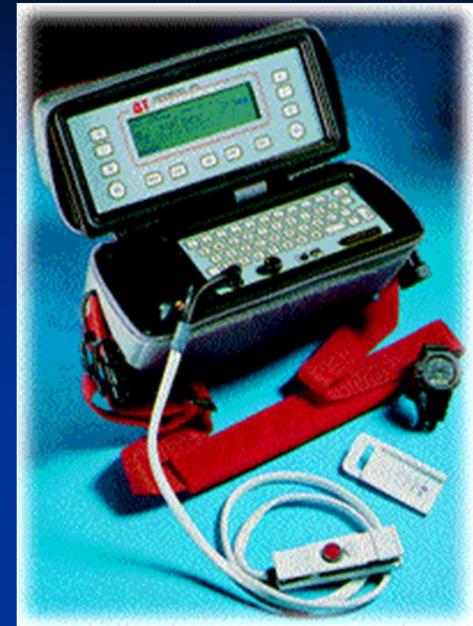
Régulation de la transpiration.

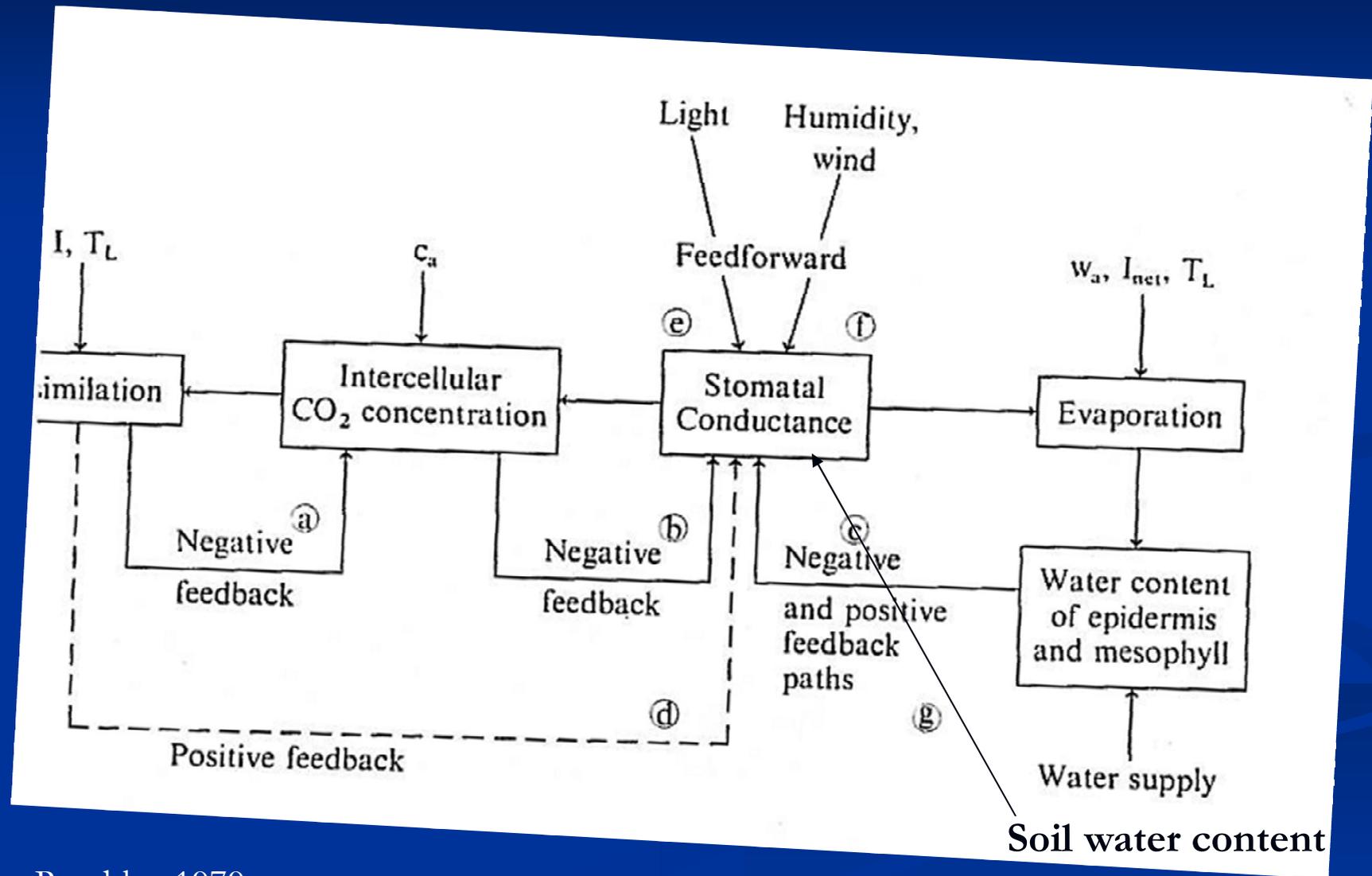


Pince de poromètre



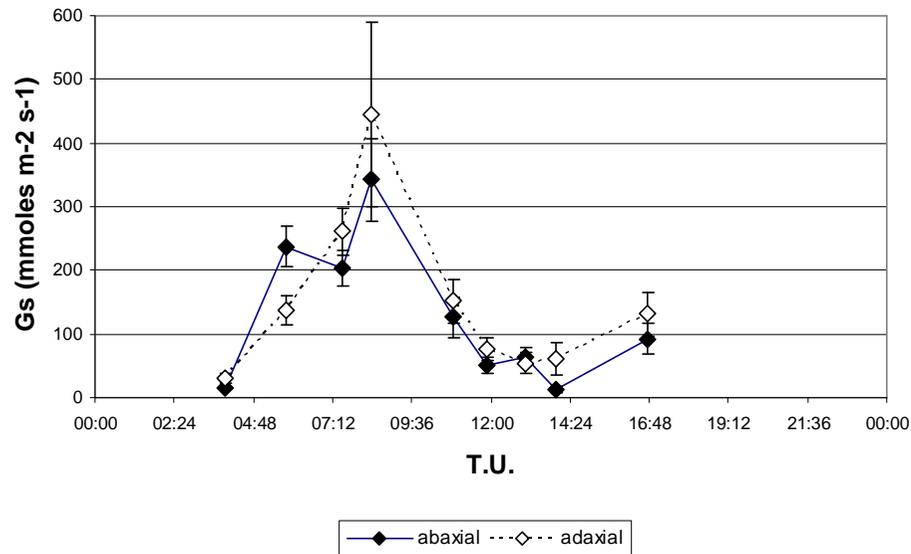
Régulation de la transpiration.



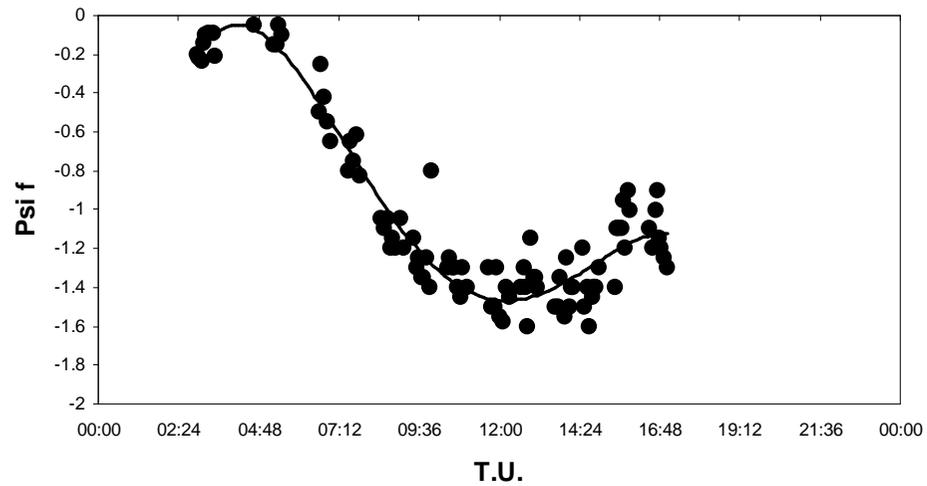


Régulation de la transpiration.

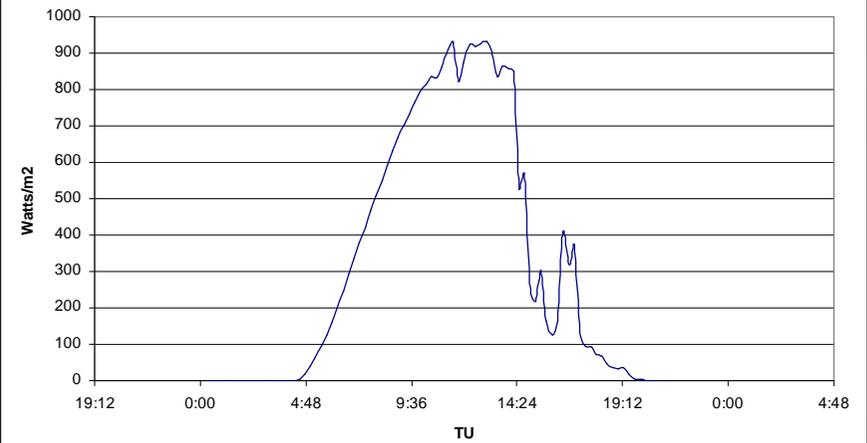
16 juillet 2004 (PIETE)



16 juillet 2004 (PIETE)

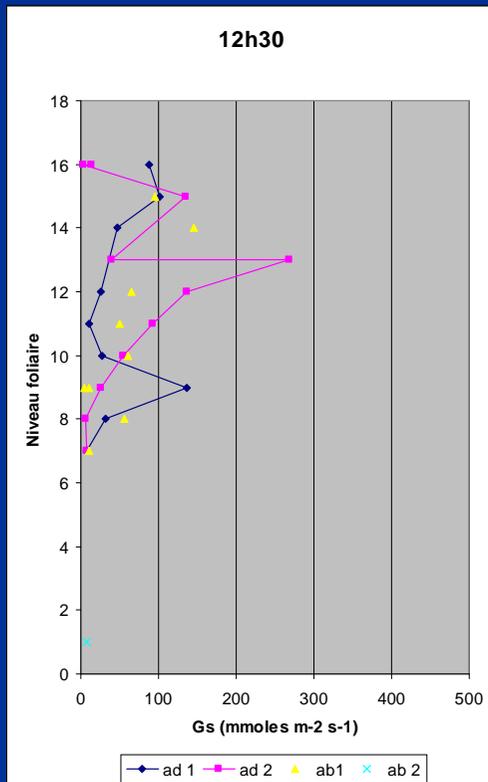


16 juillet

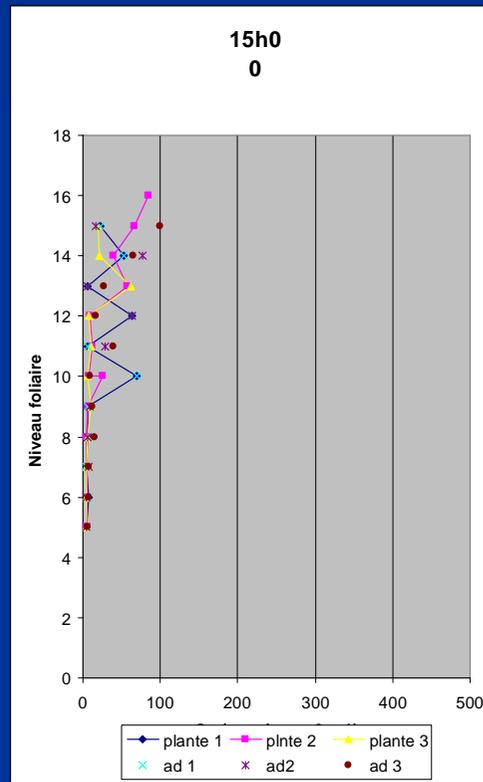


Profil de G_s

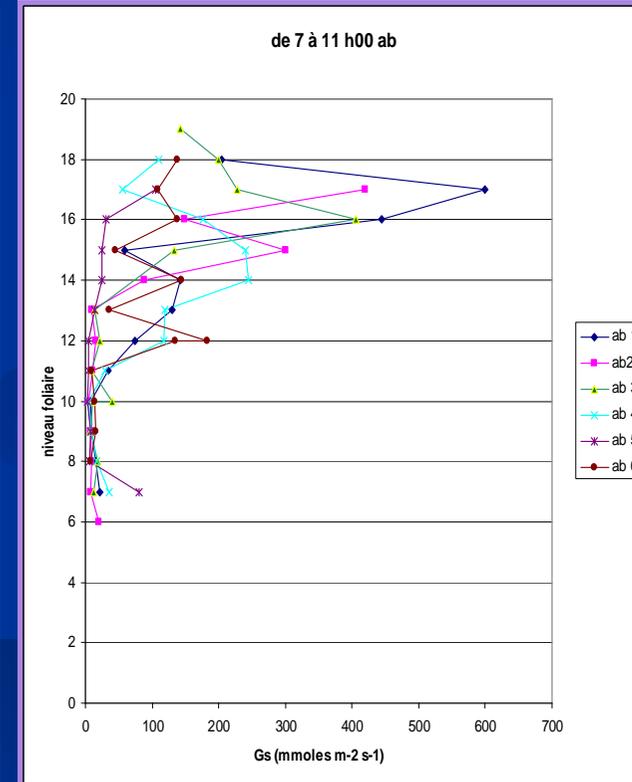
16 juillet



16 juillet

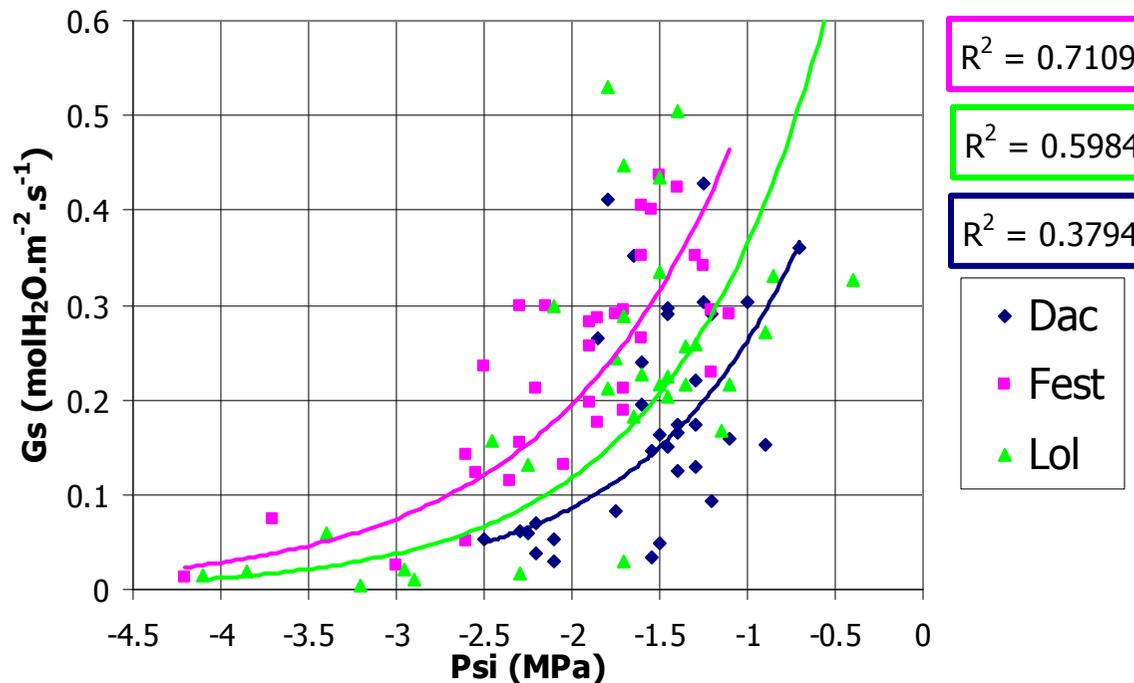


29 juillet



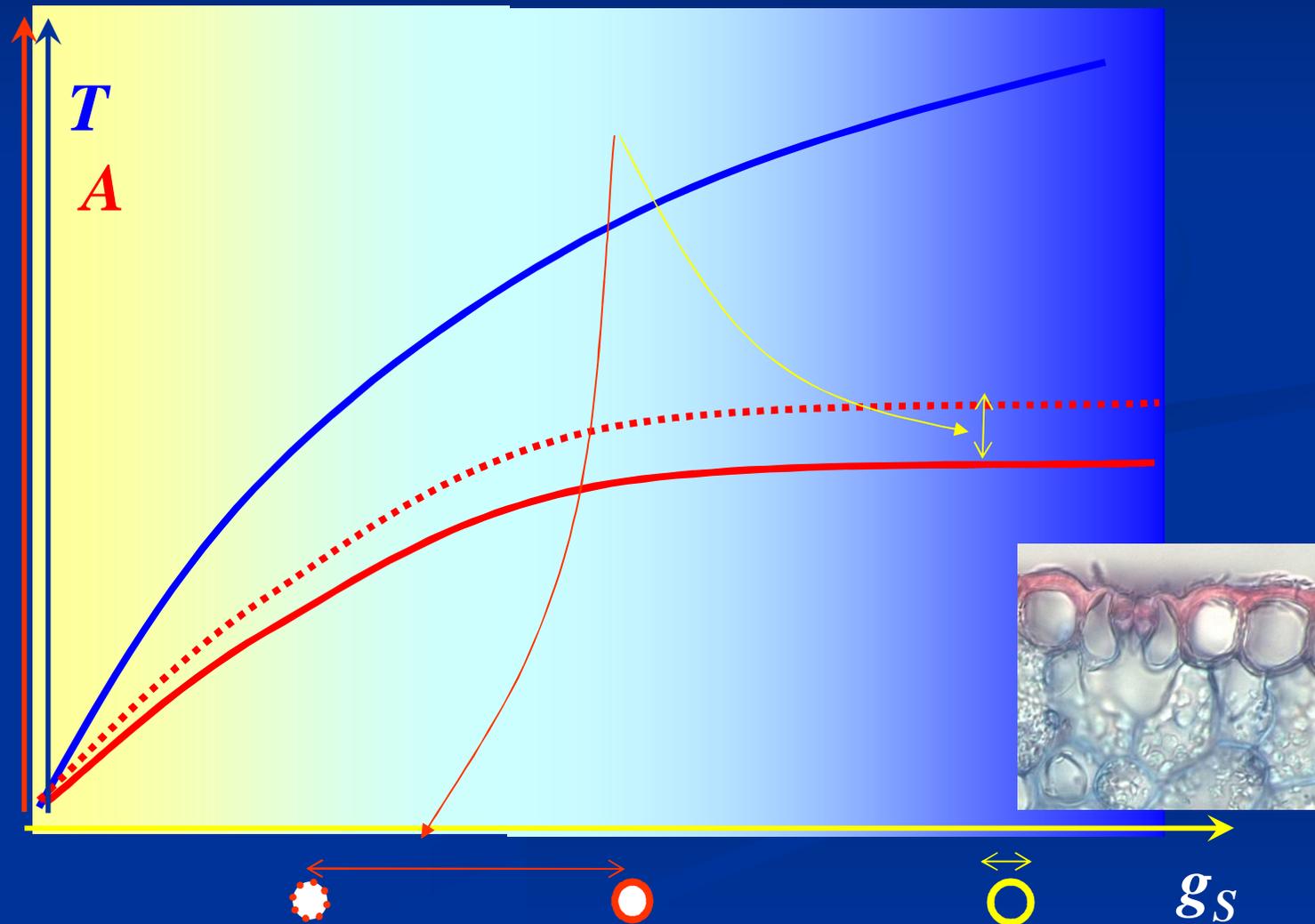
La conductance est plus ou moins sensible à l'état hydrique selon les espèces...

Fig 3: Conductance stomatique en fonction du potentiel hydrique



L'efficacité de l'eau: une image intégrée de l'état hydrique ?

La feuille accroît obligatoirement son efficacité de l'eau à mesure que les stomates se ferment, toutes choses égales par ailleurs.



Ressources en eau du sol et enracinement

Les ressources en eau du sol.

Les variations temporelles et spatiales de
l'humidité du sol

Conductivité hydraulique et état hydrique d'un
sol.

Mesurer les précipitations



- Les erreurs de captation (5 à 80 %) : pluie inclinée, fortes pentes, turbulences du vent autour du pluviomètre.
- Les erreurs de l'instrument (environ 0,5 %) : déformation de l'appareil de mesure (par exemple déformation du papier enregistreur).
- Les erreurs dues aux rejaillissements (environ 1%).
- Les pertes par mouillage (environ 0,5 %) : déficit équivalent à l'eau qui humecte les parois intérieures du pluviomètre.
- Les erreurs dues à l'évaporation dans le récipient (environ 1%).
- Les erreurs propres aux pluviographes : en cas de fortes pluies, la vidange du système à siphon, et respectivement la vitesse de basculement des augets peuvent être trop lentes. Des pertes d'eau au moment du basculement des augets peuvent aussi avoir lieu.

Interception des pluies



L'eau dans le sol

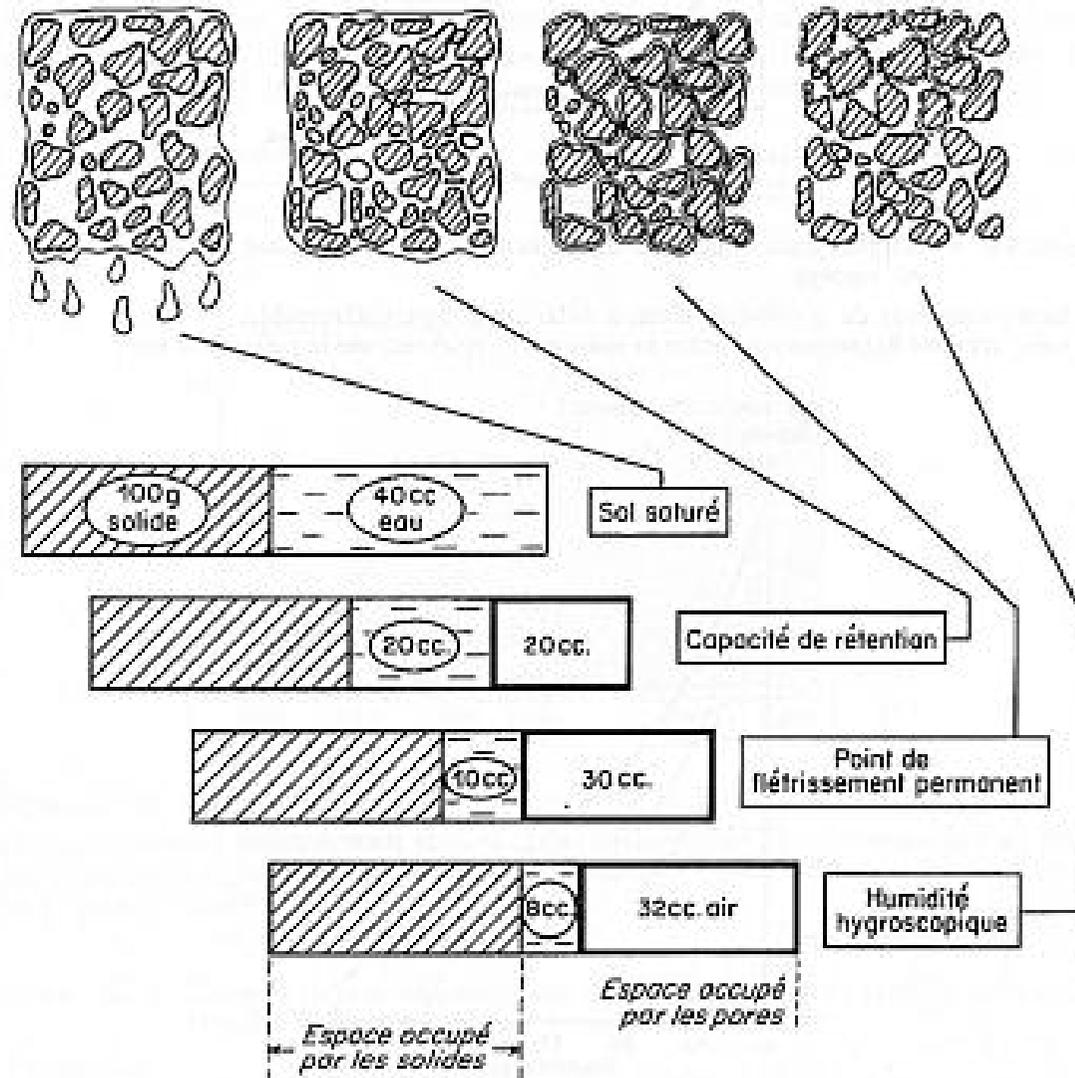


Figure 44. - Schéma indiquant les espaces occupés par les phases solide, liquide et gazeuse, dans un sol de limon argilo-sableux (d'après BUCKMAN et BRADY, 1965).

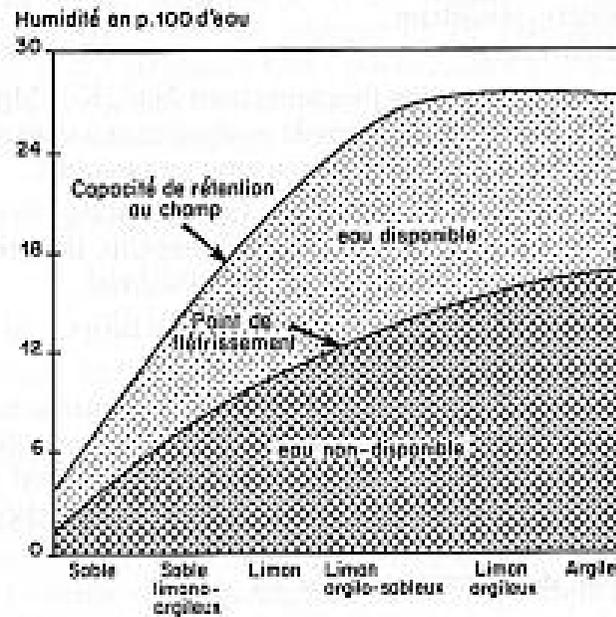


Figure 47. - Réserve utile en fonction de la texture (d'après BUCKMA). La réserve utile ou eau disponible pour la plante augmente, lorsque fine, jusqu'aux limons argilo-sableux puis reste constante et peut légèrement diminuer dans les domaines très argileux.

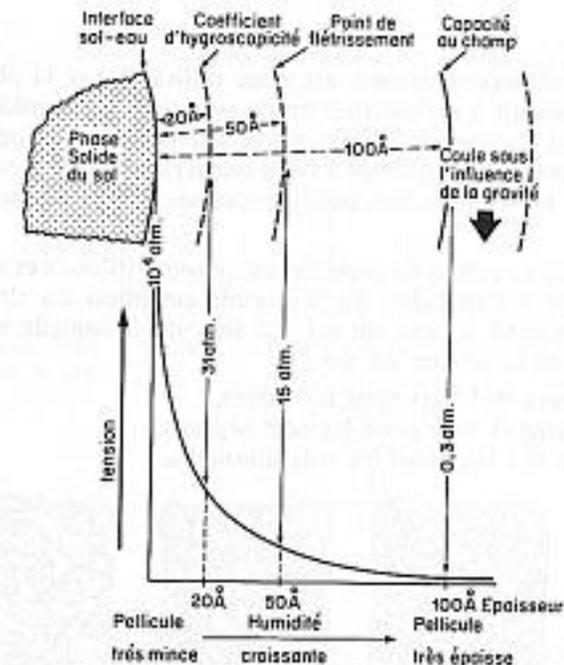
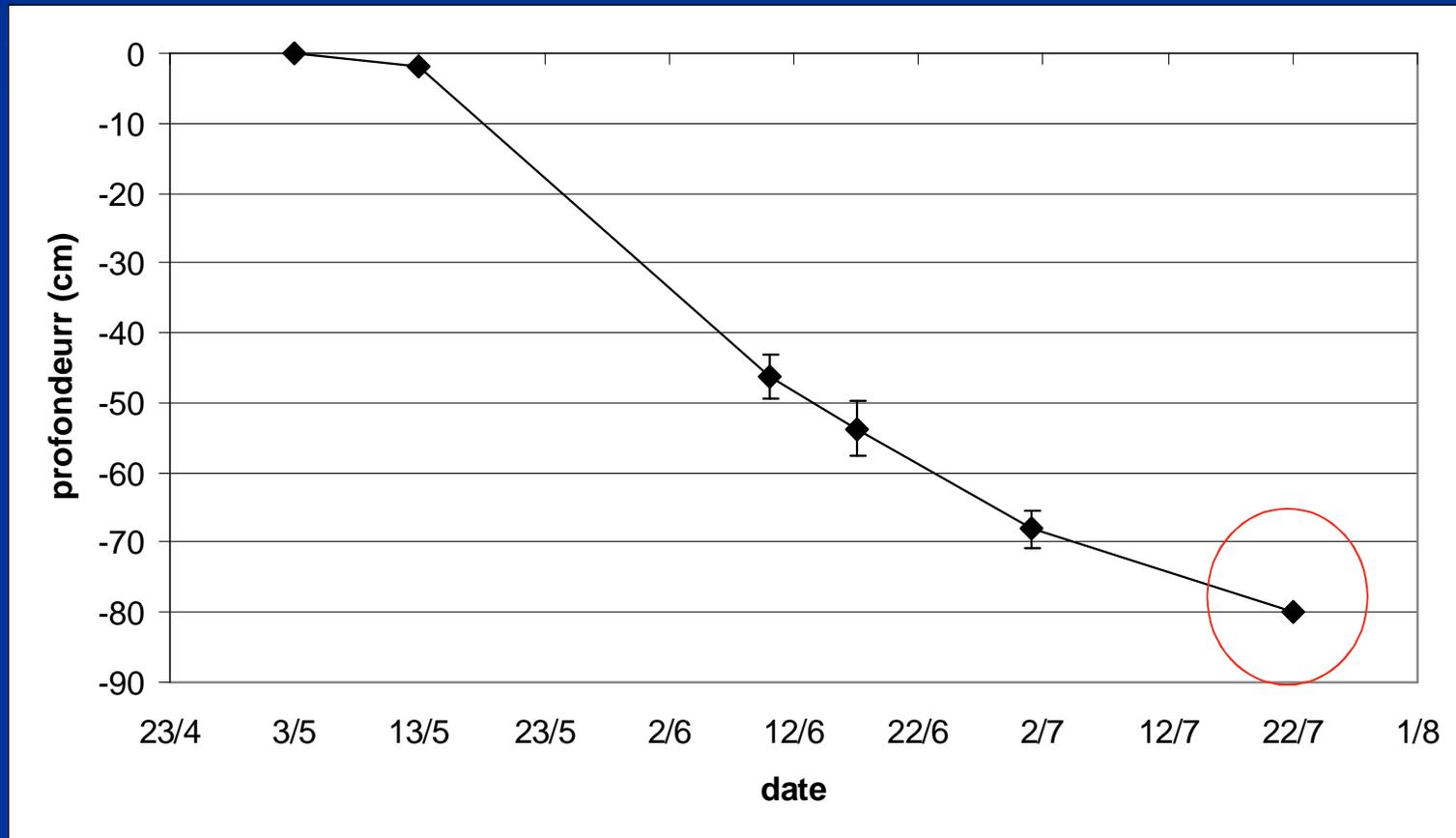


Figure 45. - Rapport entre l'épaisseur des pellicules d'eau et la tension avec laquelle l'eau est retenue

en haut : épaisseur de la pellicule d'eau à différents niveaux d'humidité,
en bas : relation logarithmique entre la tension et l'épaisseur de la pellicule d'eau

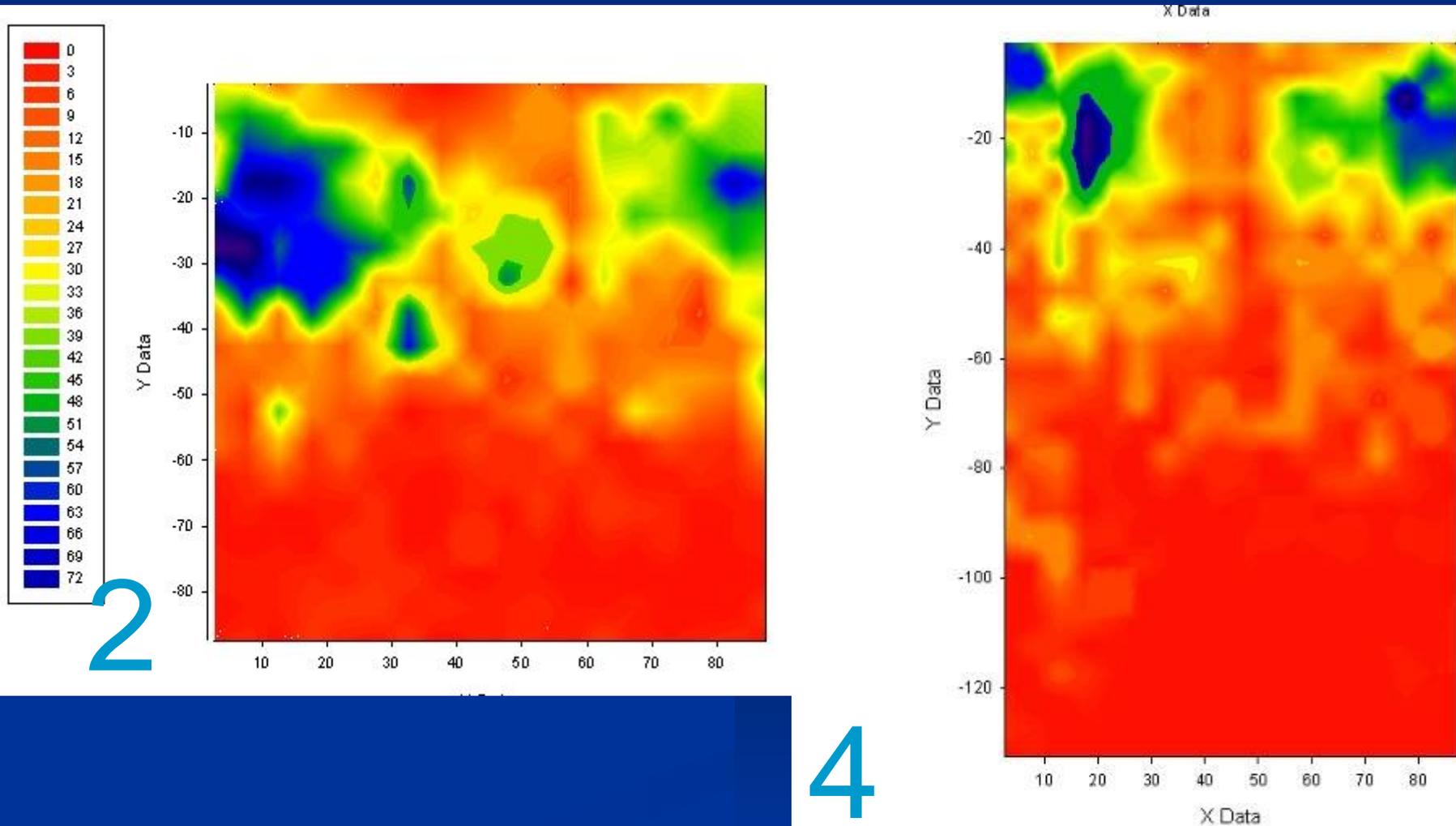
Profondeur enracinement (carottes de sol)



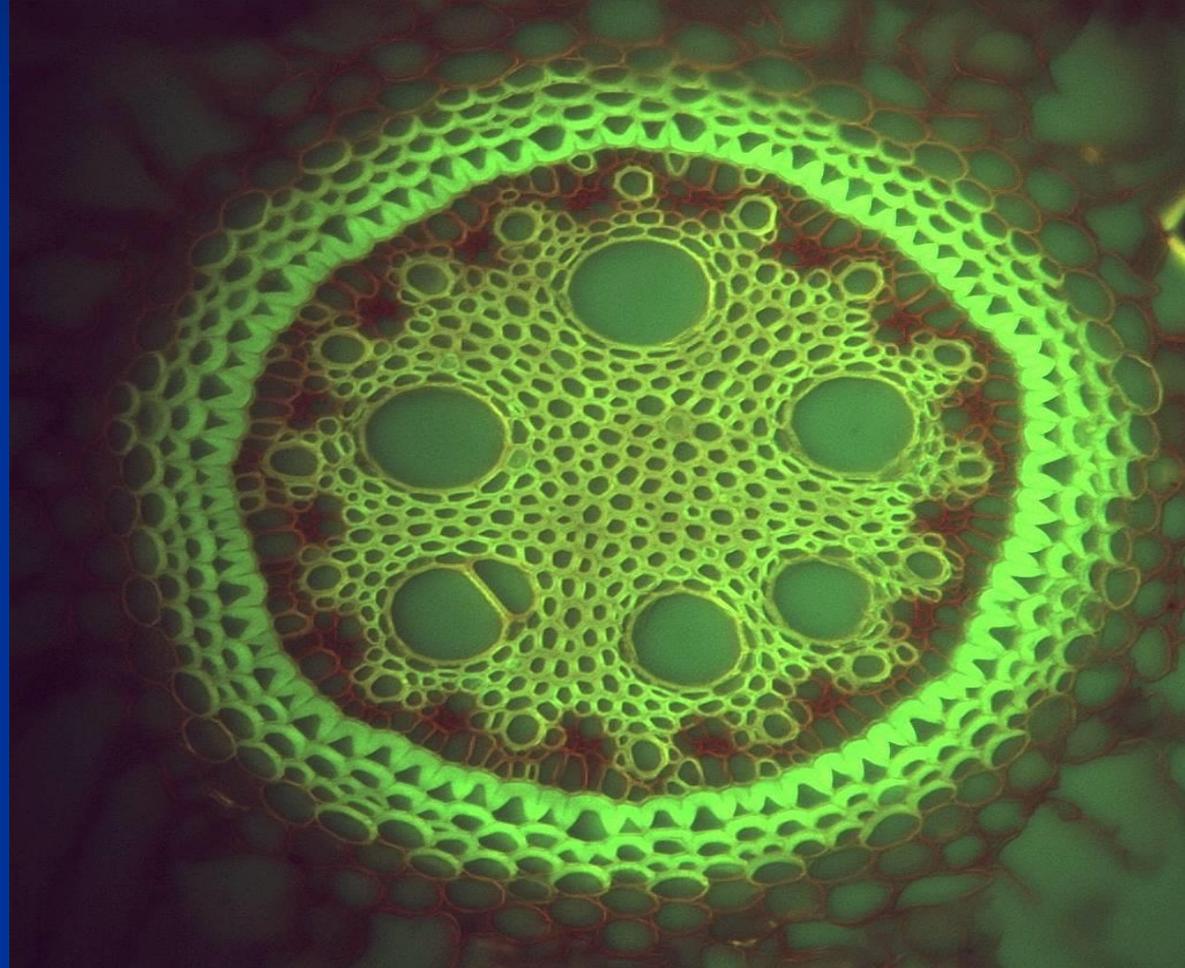
Comptage du nombre de racines sur une grille appliquée contre le profil.

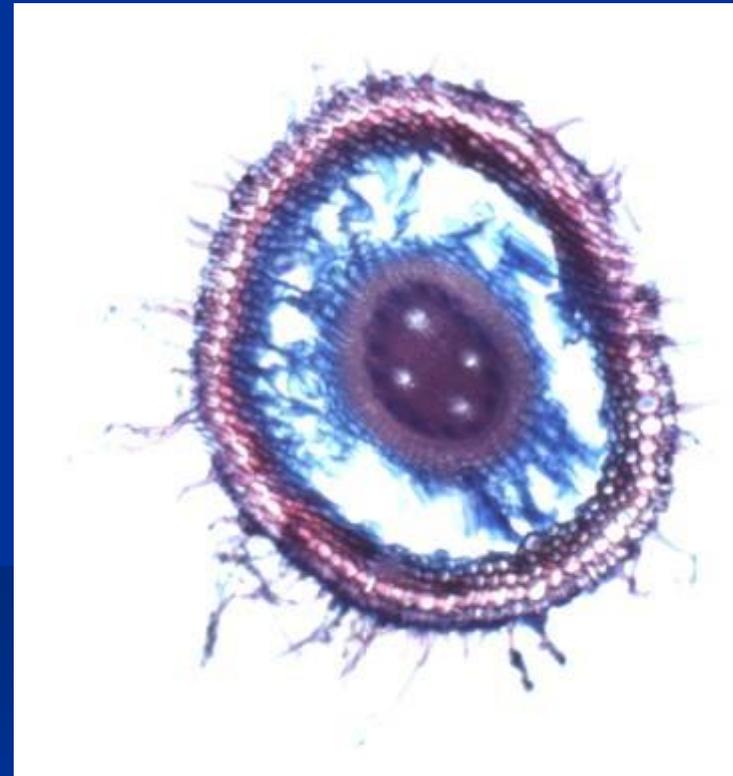
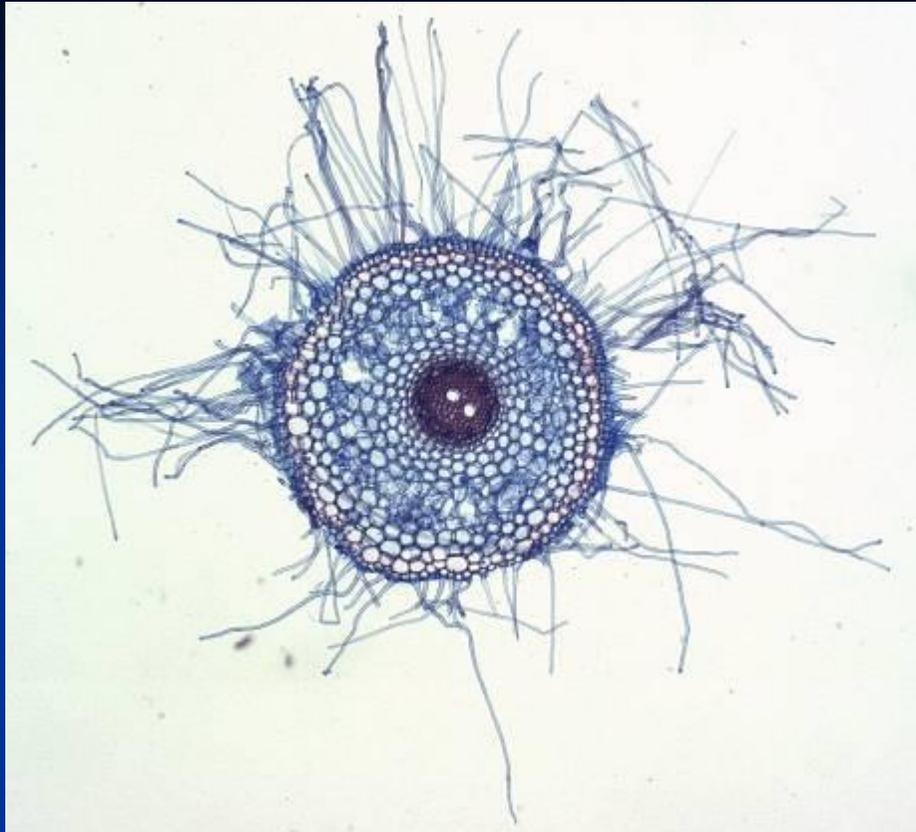


Profil de densités de racines le 22 juillet



Anatomie d'une racine





Le flux du sol à une plante:

R_s et R_p : résistances hydrauliques sol et plante resp.

A : surface occupée par la plante

w quantité prélevée dans l'horizon de hauteur h

L_v : densité racinaire

b : moitié de la distance moyenne entre deux racines

r : rayon d'une racine

K : conductivité hydraulique du sol

$$L_v = \frac{M_R \lambda_R}{V_{SOL}}$$

$$J_{SP} = \frac{\psi_S - \psi_P}{R_S + R_P}$$

$$q = \frac{w}{L_v h A}$$

$$R_S = \frac{\ln\left(\frac{1}{r^2 \pi L_v}\right)}{4\pi K}$$

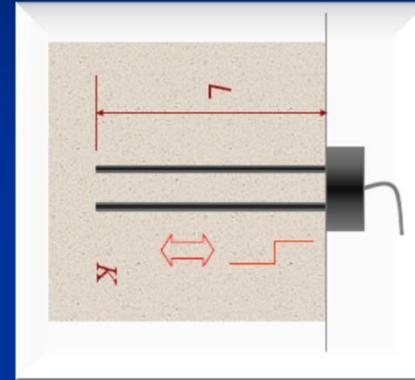
$$\psi_s - \psi_r = q \ln(b^2/r^2)/4\pi K,$$

Gardner, 1960

Mesurer l'eau du sol

- Teneur en eau
 - Pondérale
 - Sonde à neutrons
 - TDR (ou réflectométrie)

- Pression
 - Tensiomètres
 - Humidité de céramiques





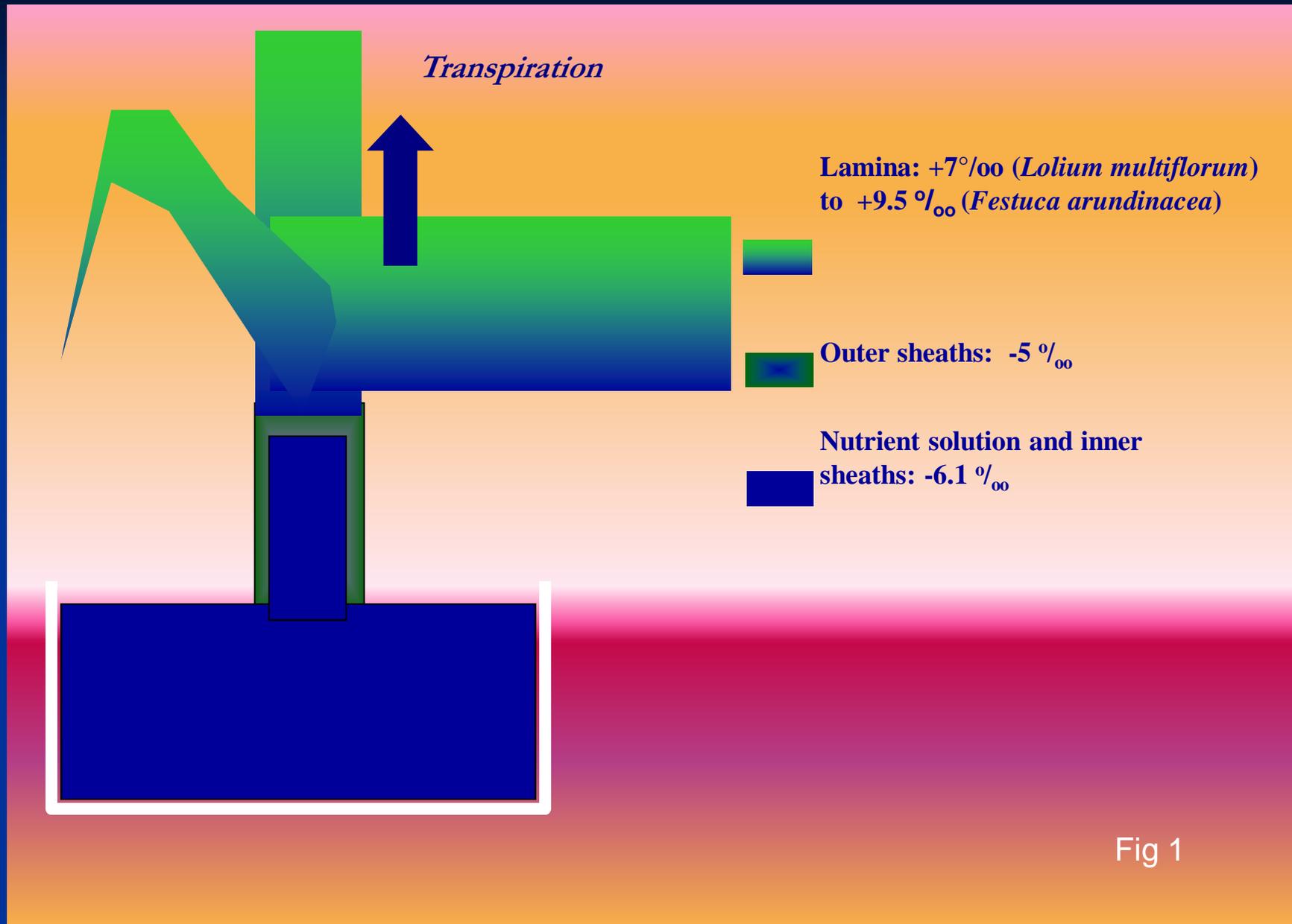
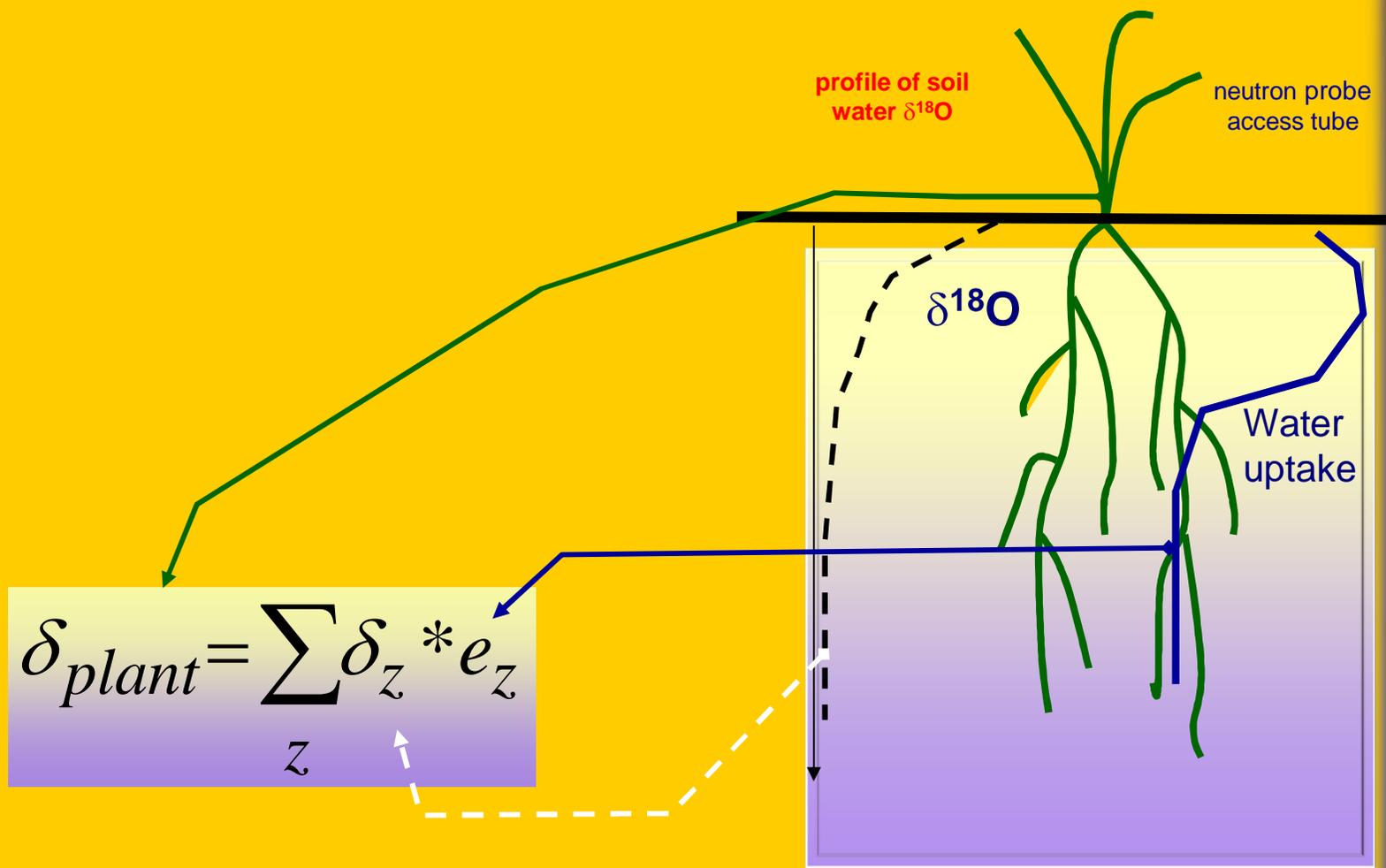
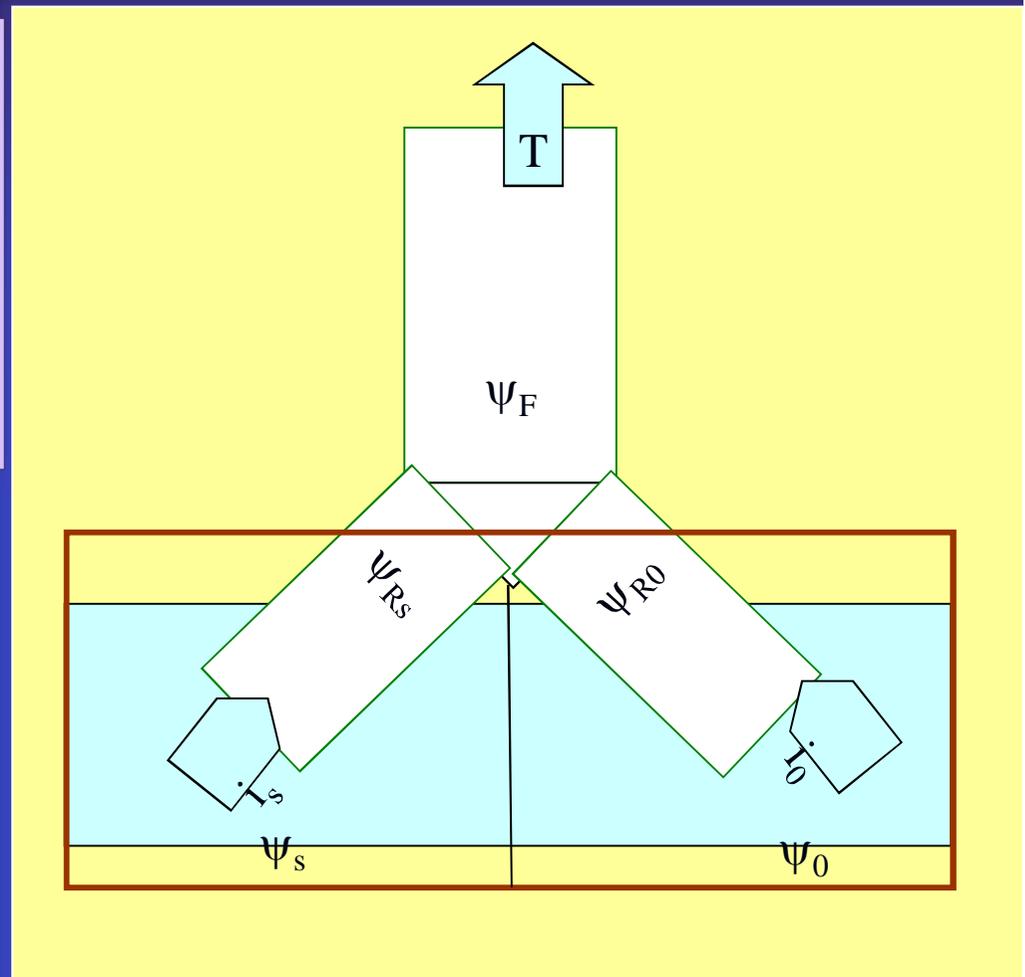
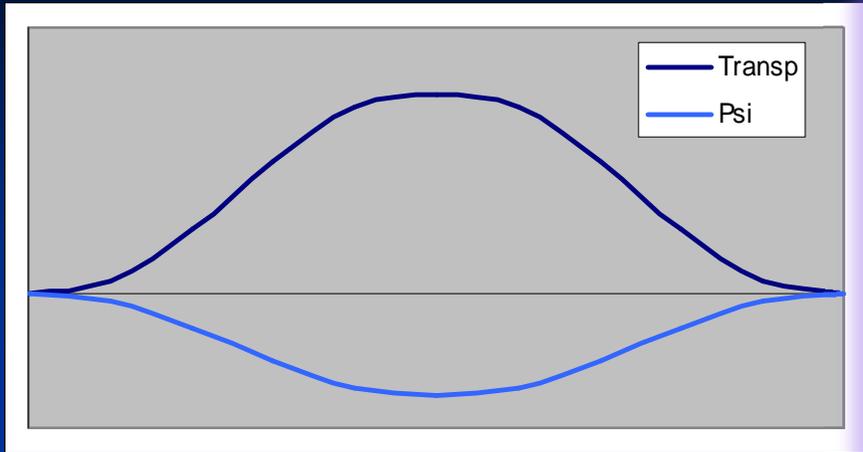


Fig 1



$$\delta_{plant} = \sum_z \delta_z * e_z$$



Y a-t-il un effet de l'état hydrique de la plante sur sa capacité d'absorption de l'azote ?

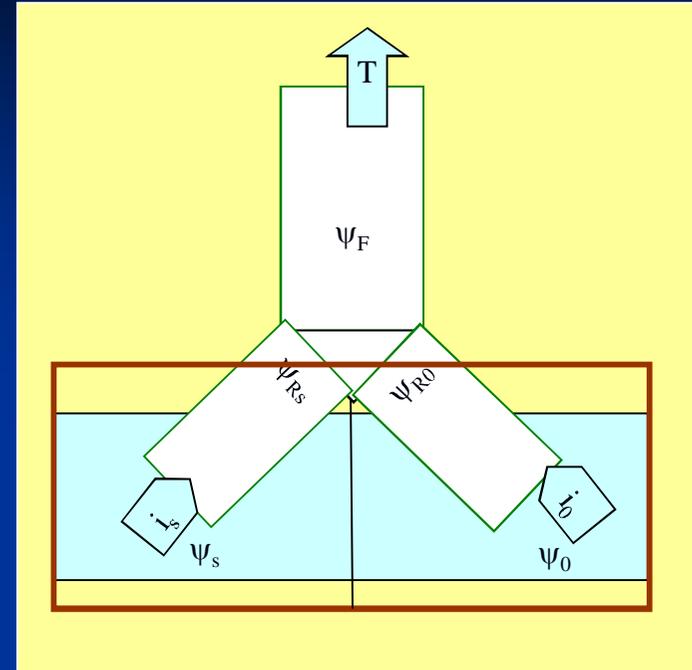
$$T = i_s + i_0$$

$$\psi_F = \psi_{Rs} = \psi_{R0}$$

$$\begin{cases} i_s = K_{rs}(\psi_s - \psi_F) \\ i_0 = K_{r0}(\psi_0 - \psi_F) \end{cases}$$

$$r = \frac{i_s}{i_s + i_0} = \frac{(\psi_s - \psi_F)}{(\psi_s - \psi_F) + \frac{K_{r0}}{K_{rs}}(\psi_0 - \psi_F)}$$

$$\frac{dr}{d\psi_s} = \frac{\frac{K_{r0}}{K_{rs}}(\psi_0 - \psi_s)}{\left[K_{rs}(\psi_s - \psi_F) + K_{r0}(\psi_0 - \psi_F) \right]^2} > 0$$



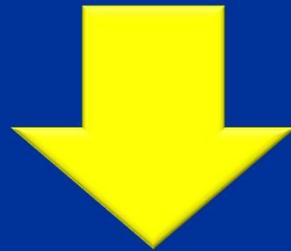
Si K indépendant de Ψ_f

$$\frac{dr}{d\psi_F} = \frac{-K_{rs} \left[K_{rs}(\psi_s - \psi_F) + K_{r0}(\psi_0 - \psi_F) \right] + K_{rs}(\psi_s - \psi_F)(K_{rs} + K_{r0})}{\left[K_{rs}(\psi_s - \psi_F) + K_{r0}(\psi_0 - \psi_F) \right]^2}$$

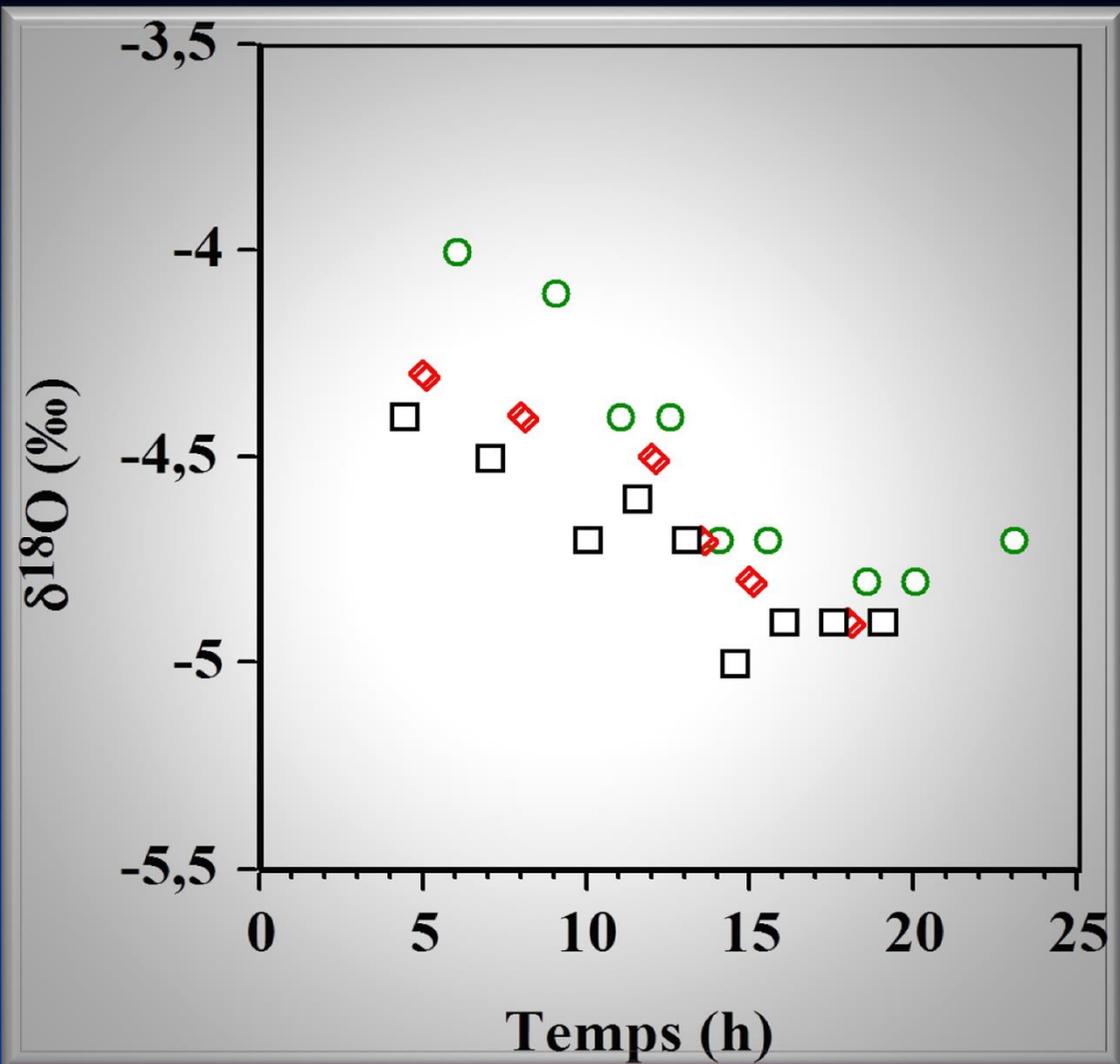
$$\frac{dr}{d\psi_F} = \frac{-K_{rs}K_{r0}(\psi_0 - \psi_s)}{\left[K_{rs}(\psi_s - \psi_F) + K_{r0}(\psi_0 - \psi_F) \right]^2} < 0$$

La participation des horizons secs à la consommation d'eau doit augmenter avec l'accroissement de la transpiration et la diminution du potentiel hydrique foliaire.

La part relative de l'eau qui vient des horizons secs dans le flux de transpiration doit augmenter entre le matin et le début d'après midi.



La signature isotopique de l'eau transpirée, ou de l'eau qui est prélevée dans le sol (c'est la même chose, en état stationnaire) doit indiquer un enrichissement en isotopes lourds.



Les mesures au champ infirment la prédiction précédente: l'hypothèse d'une conductance hydraulique sol-plante constante au cours de la doit vraisemblablement être rejetée.



Augmentation de la résistance sol/racine au cours de la journée...?

conclusions

1. L'architecture du système sol/plante/atmosphère détermine les mouvements d'eau possibles: la morphogenèse est le processus décisif de l'économie de l'eau en créant les conditions et en se pliant à l'état hydrique.
2. L'énergie solaire détermine la quantité d'eau nécessaire.
3. La quantité d'eau dans le sol limite la consommation d'eau potentielle.
4. L'enracinement détermine l'eau réellement disponible.
5. Au troisième ordre, les stomates régulent les échanges instantanés.