



Ecophysiologie végétale Bilan d'énergie d'une plante et cycle de l'eau

Jean-Louis Durand

► To cite this version:

Jean-Louis Durand. Ecophysiologie végétale Bilan d'énergie d'une plante et cycle de l'eau. Master. France. 2021. hal-03338843

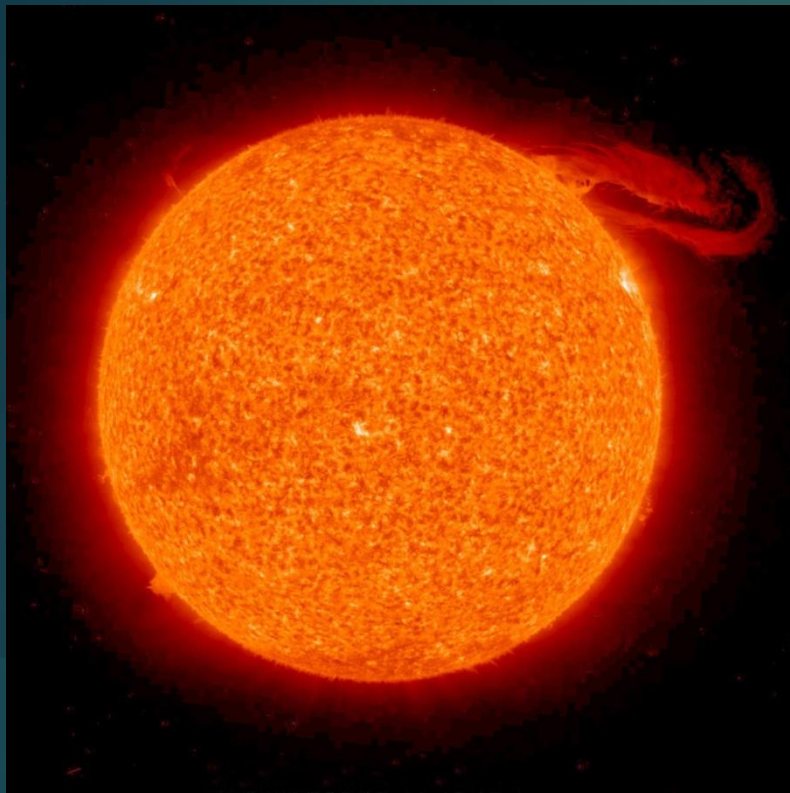
HAL Id: hal-03338843

<https://hal.inrae.fr/hal-03338843>

Submitted on 9 Sep 2021

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.



Ecophysiologie végétale

Bilan d'énergie d'une plante et cycle de l'eau



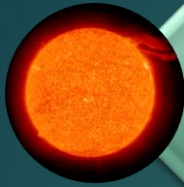
Jean-Louis Durand
INRAE Lusignan
Jean-louis.durand@inrae.fr



MASTÈRE PLANTES ET SOCIÉTÉ

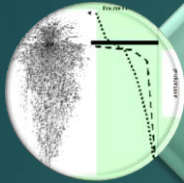
UE PRODUCTIONS AGRICOLES ET ENVIRONNEMENT

SEPTEMBRE 2021



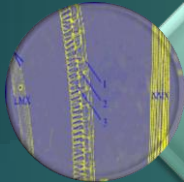
Le couplage hydrique des plantes et de l'atmosphère.

- Le rayonnement solaire.
- Le déficit de saturation en eau de l'air.
- Le bilan d'énergie d'une feuille et d'un peuplement.



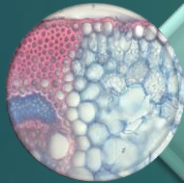
L'état hydriques d'une plante.

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



La régulation du transport de l'eau dans la plante.

- La tension-cohésion
- Le xylème
- Le phloème
- Croissance volumique



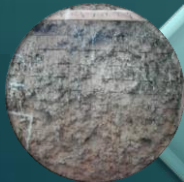
La régulation de la transpiration.

- 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.

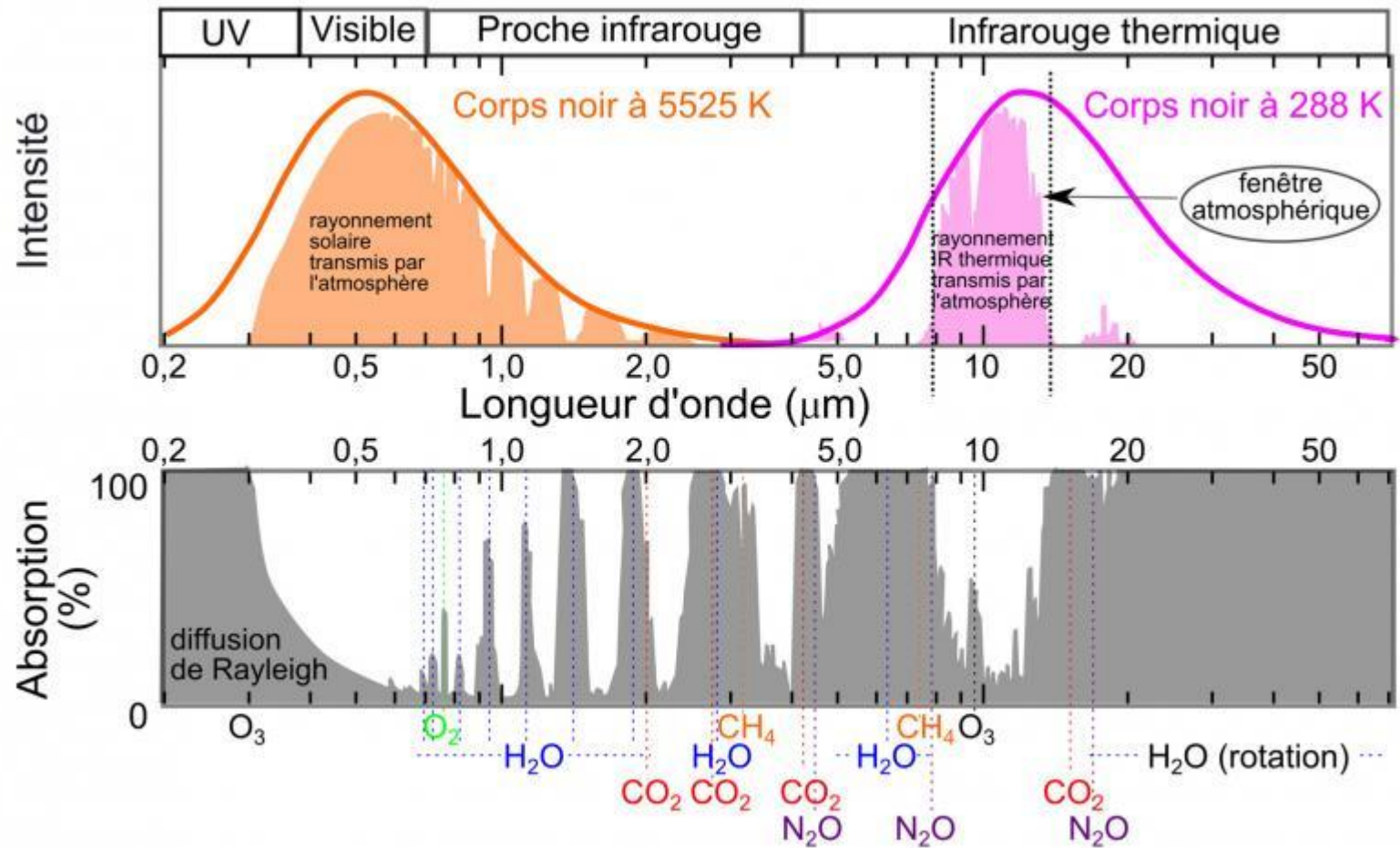


L'absorption de l'eau par la plante.

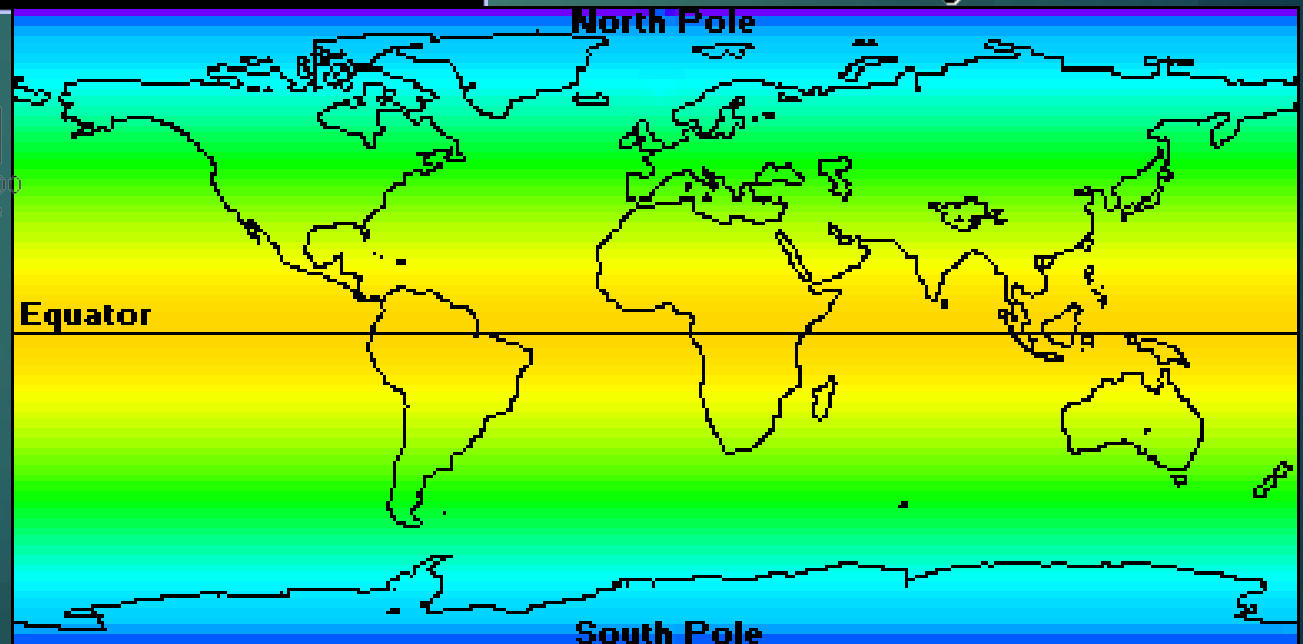
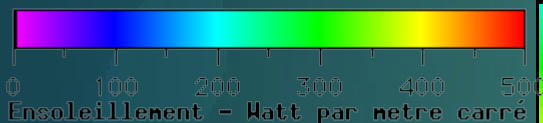
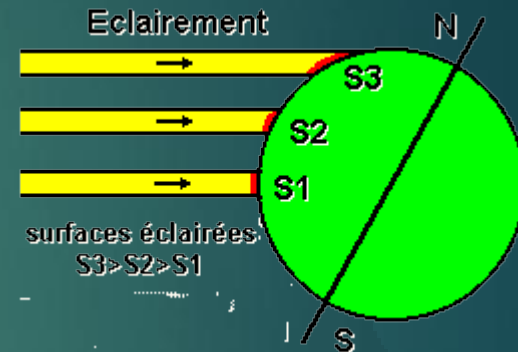
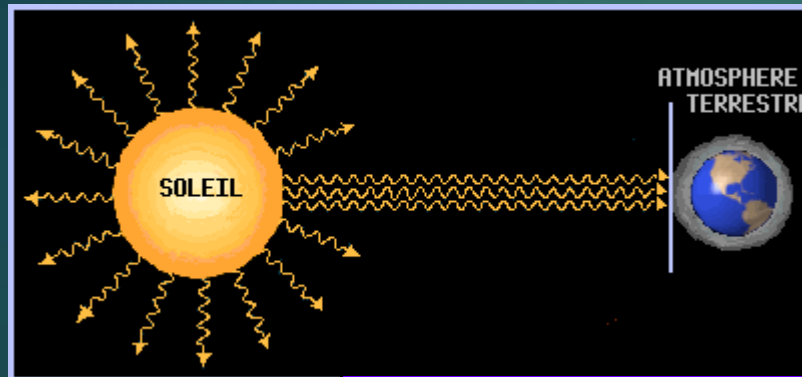
- Absorption d'eau par les racines.
 - À l'échelle de la racine
 - À l'échelle du système racinaire

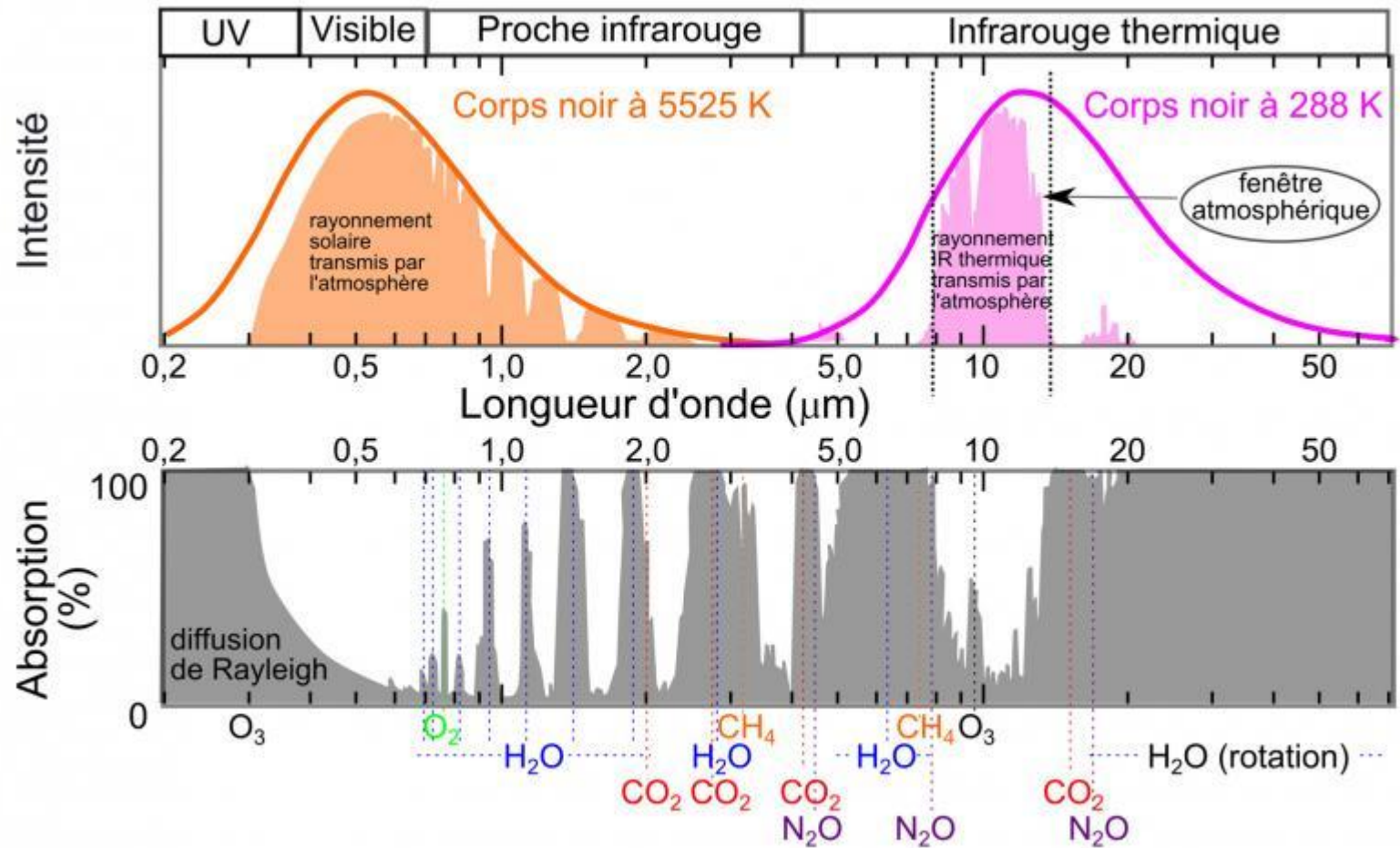
L'énergie solaire

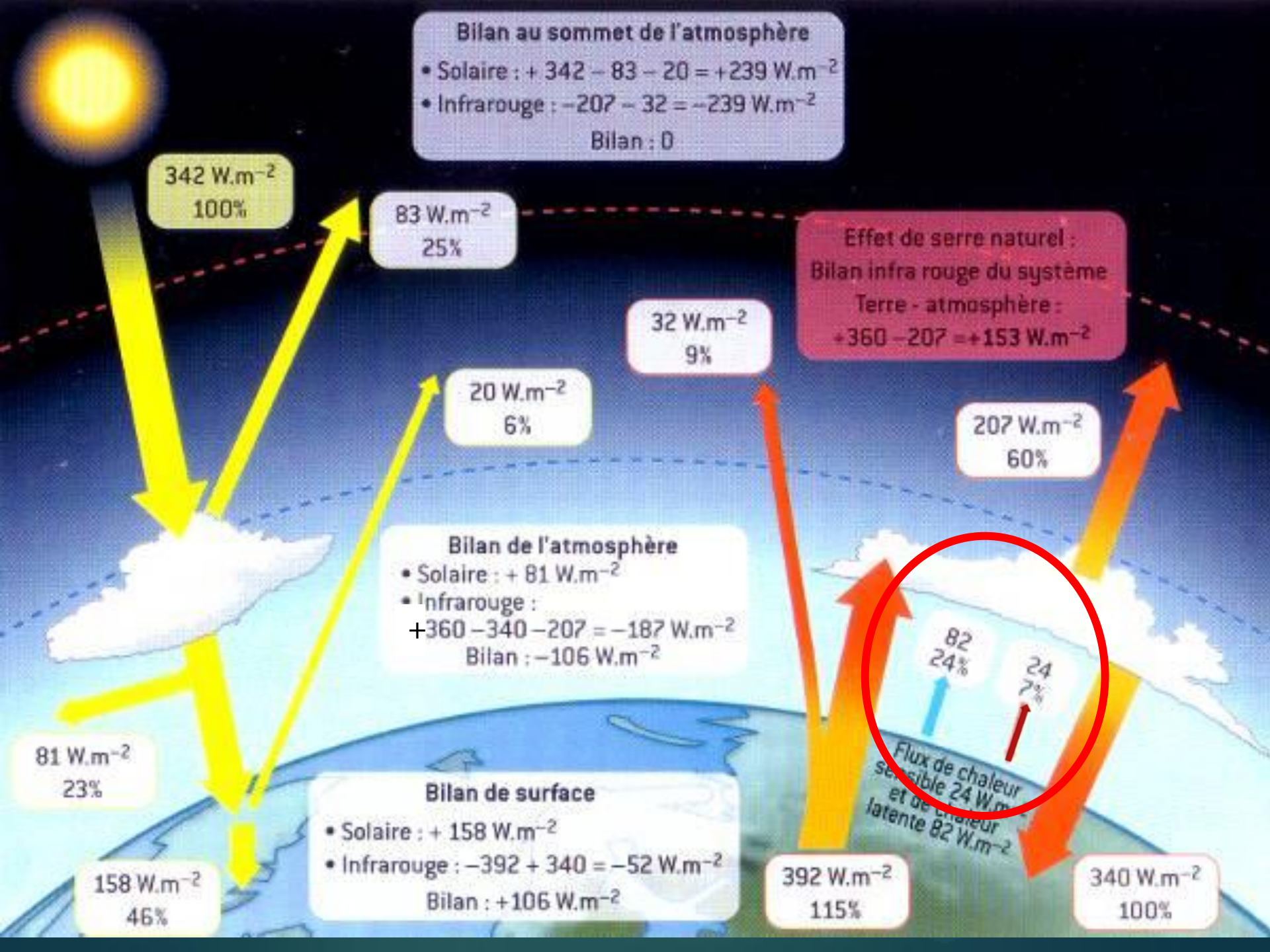
- ▶ Produite dans le soleil par les réactions nucléaires qui porte ce dernier à une température de surface de l'ordre de 5525 K
- ▶ D'un diamètre de 1,39 million de km et situé à 149,6 millions de km de la Terre, il irradie celle-ci d'un rayonnement d'une densité de flux moyenne de l'ordre de 342 W.m^{-2} : 1350 W.m^{-2} à l'équateur, moins de 50 aux pôles



Ce rayonnement incident sur une sphère (approximation) traverse l'atmosphère et atteint une surface horizontale avec une valeur d'éclairement réduite par la géométrie du système, la densité de l'atmosphère et son pouvoir d'absorption et de diffusion du rayonnement.





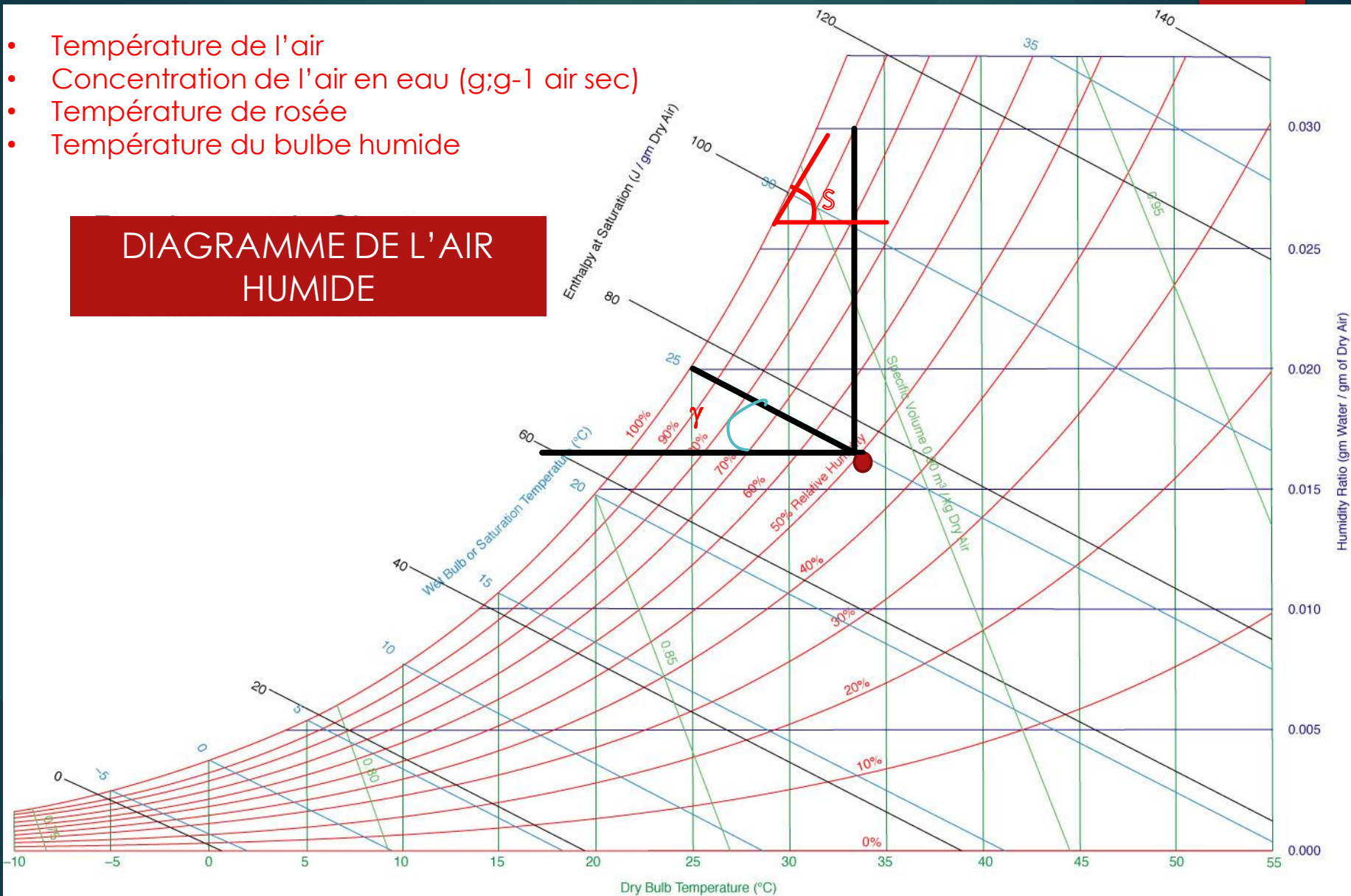


Le bilan d'énergie:

$$R_n = H + LE + G$$

- Température de l'air
- Concentration de l'air en eau (g/g-1 air sec)
- Température de rosée
- Température du bulbe humide

DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE





- ▶ $e^* = 0.611 \exp[17,27T_a/(T_a+237,3)]$

- ▶ s = pente de la relation entre l'humidité saturante et la température (de^*/dT_a)

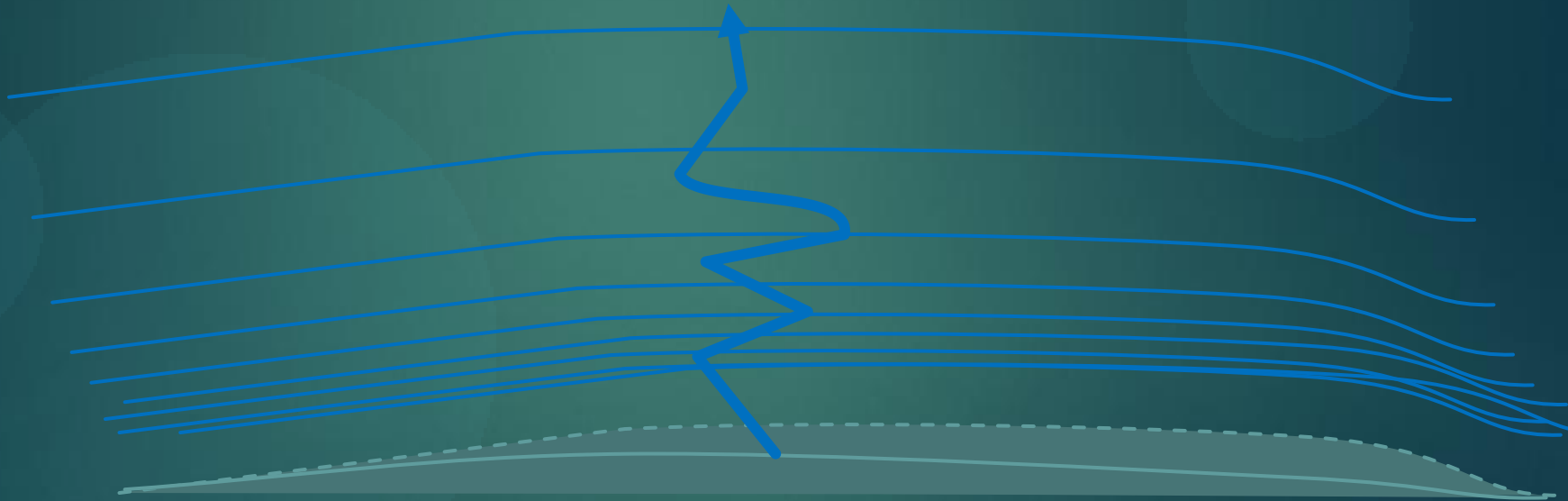
- ▶ $\gamma = [e^*(T_w) - e_a(T_a)]/[T_a - T_w]$

Evapotranspiration d'une culture

Pour une journée à 20°C, l'évaporation d'un gramme d'eau liquide consomme 2442 kJ.

Sur un m² de culture, 6mm d'évapotranspiration correspondent à 6000 g, et demandent donc approximativement 13,5 MJ
→ l'ordre de grandeur de l'énergie solaire reçue

Couche limite, résistance aérodynamique, vent et résistance stomatique

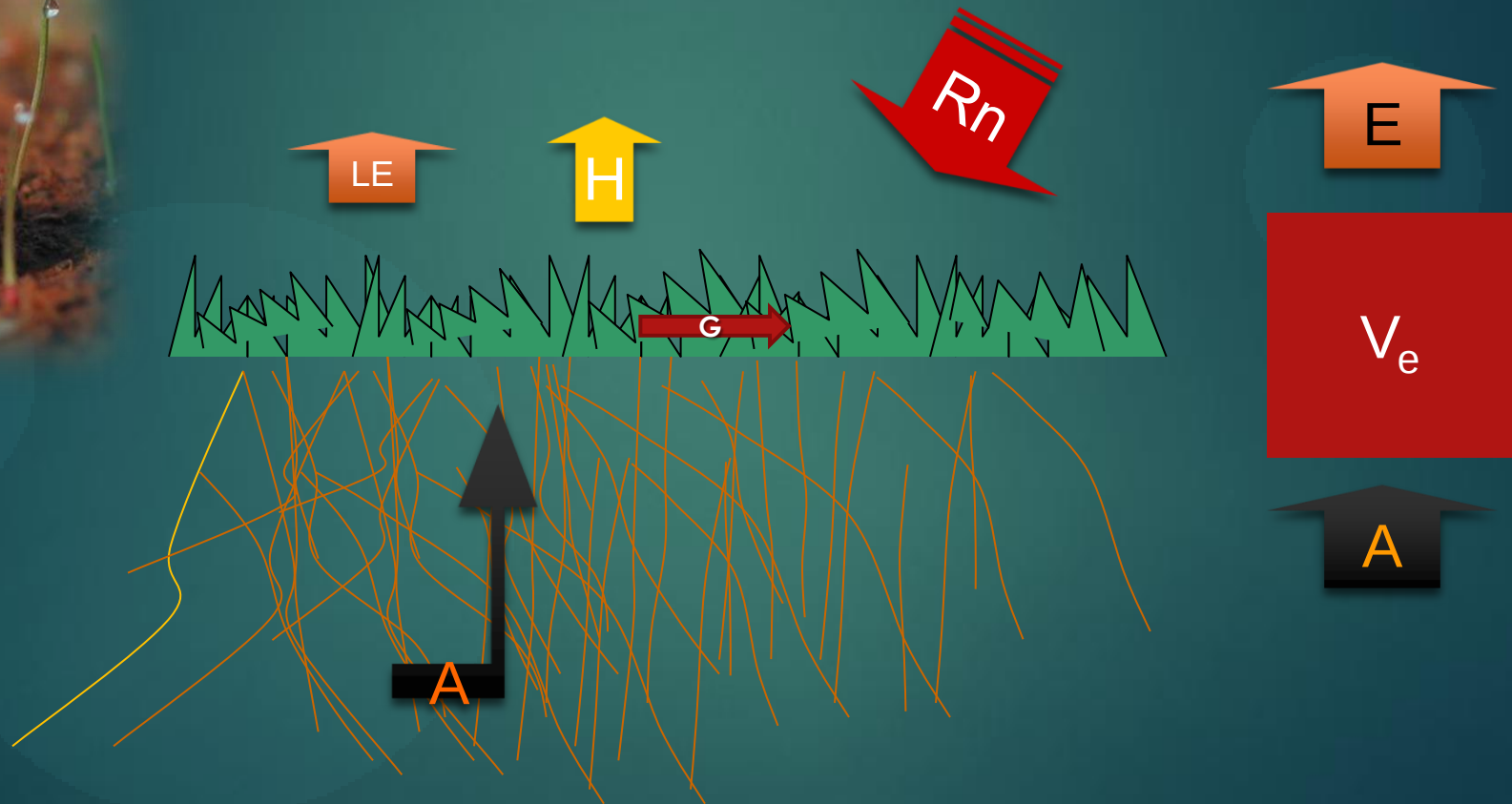


Les équation de l'évapotranspiration

- ▶ L'énergie disponible est R_n :
- ▶ $R_n = H + LE + G$
- ▶ $E = \rho_a C_p (e^* - e_a) / (r_c + r_a)$
- ▶ $LE = [s(R_n + G) + \rho_a C_p (e^* - e_a) / r_a] / [s + \gamma(1 + r_c / r_a)]$

H chaleur sensible, LE chaleur latente, L chaleur latente de vaporisation de l'eau, s pente de la relation entre T et la pression saturante, R_n , rayonnement net, G flux dans le sol, r_a densité de l'air, C_p capacité calorifique de l'eau, e^* teneur en eau à saturation, e_a teneur en eau, g constante psychrométrique, r_a résistance aérodynamique du couvert, r_c résistance stomatique.

Du bilan d'énergie au bilan hydrique



$$A - E = \frac{dV_E}{dt}$$

$$E \sim A = \frac{\Psi_{sol} - \Psi_{plante}}{R_{sol/plante}}$$

$$\Psi_{sol} = f(H_{sol}) \quad \frac{dH_{sol}}{dt} = -A + RR + I$$

$$\Psi_{plante} = P(V_E) - \pi(V_E)$$

- H_{sol} humidité volumique du sol
- A absorption
- E transpiration
- I Irrigation
- Ψ_{sol} potentiel hydrique du sol
- Ψ_{plante} potentiel hydrique de la plante
- P pression hydraulique dans la plante
- π pression osmotique dans la plante
- RR Pluies
- V_e volume d'eau dans la plante



Composantes du potentiel hydrique: la pression osmotique

$$\Psi_0 = 0 = P_0 - \Pi_0$$

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

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

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

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

R constante des gaz parfait

T température en kelvin

R_{WC} Teneur en eau relative de la plante

Composantes du potentiel hydrique: la pression hydrostatique (turgescence)

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

- P_0 pression à pleine turgescence ($\psi = 0$)
- ε_0 module d'Young, d'élasticité globale à pleine turgescence

Force motrice de l'eau en général

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

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

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

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

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

$$i_{sP} = K_{sP} (\psi_s - \psi_P)$$

La circulation de l'eau dans la feuille

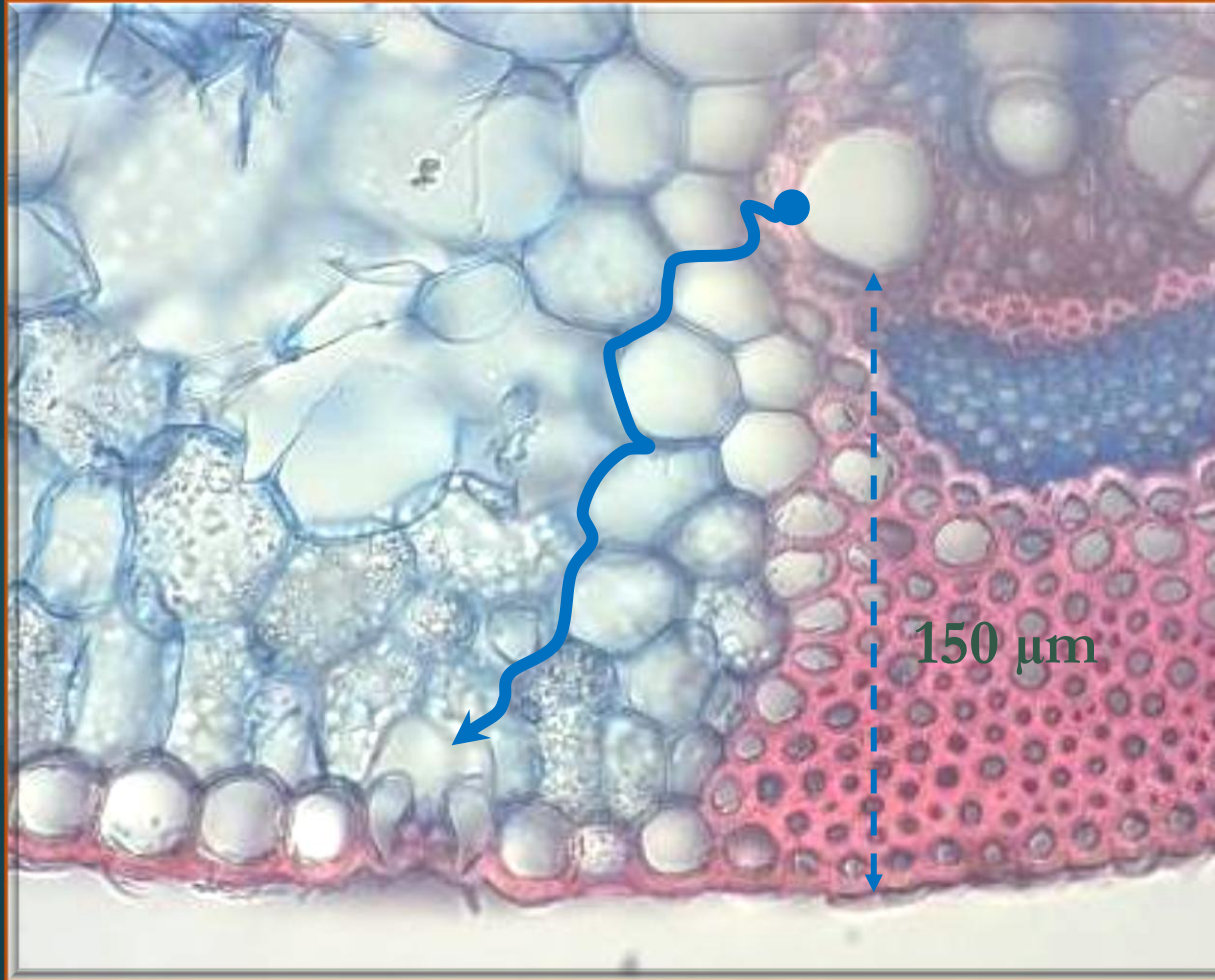
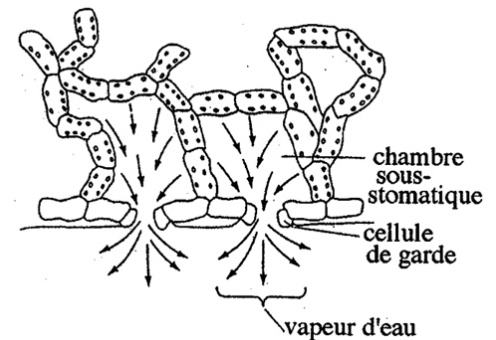
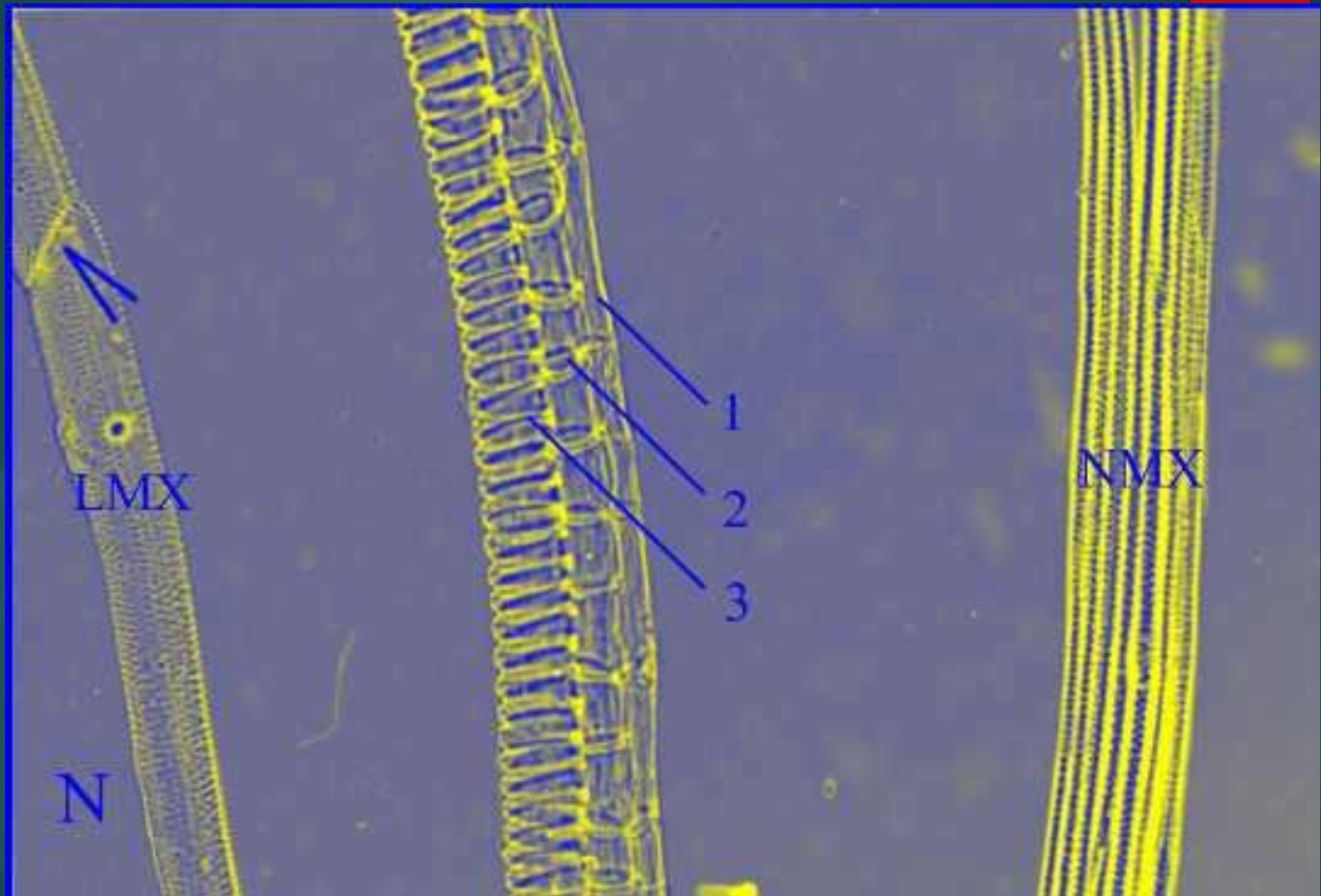


Photo S Carré.. INRA Lusignan



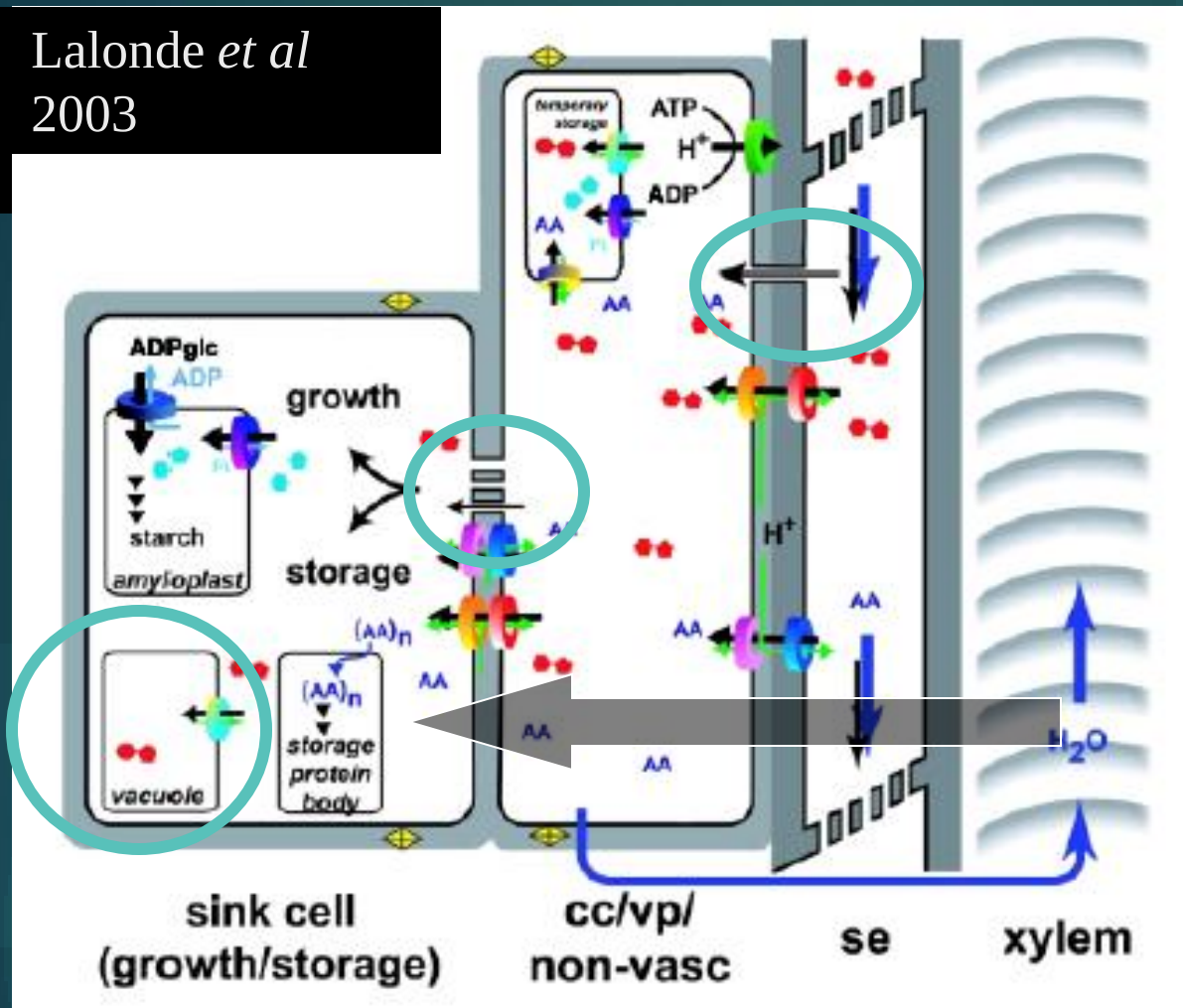


Martre, P., Durand, J. L., & Cochard, H. (2000). Changes in axial hydraulic conductivity along elongating leaf blades in relation to xylem maturation in tall fescue. *The New Phytologist*, 146(2), 235-247.

Circulation phloémienne



Lalonde *et al*
2003



- Le déchargement symplastique a été décrit dans les zc végétatives

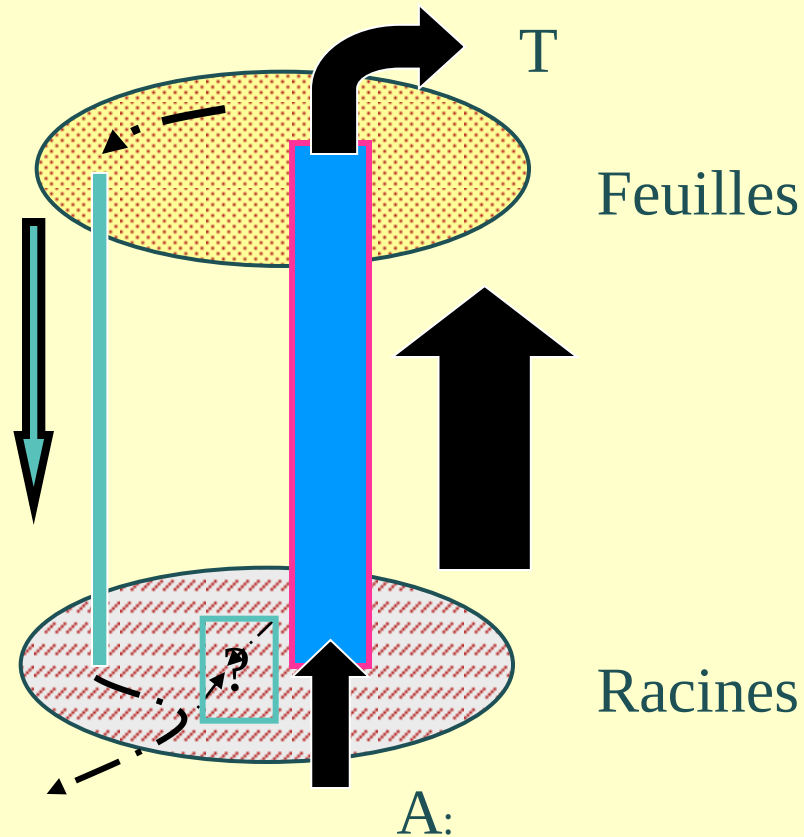
- Il y a une similarité entre la teneur en saccharose de la sève phloémienne et le calcul de la concentration de la solution déposée dans les zc des feuilles en croissance



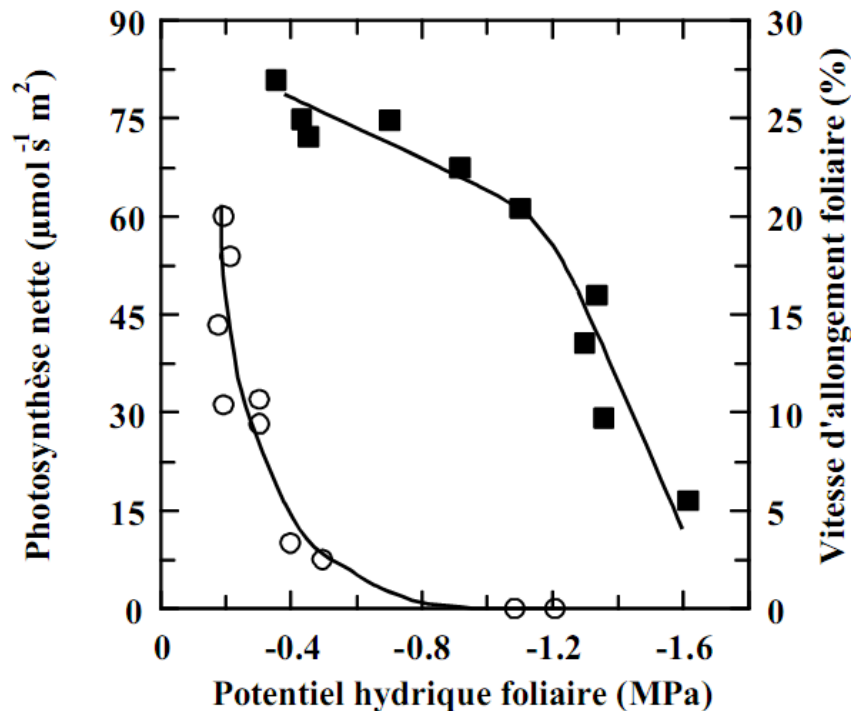
Lalonde, S., Tegeder, M., Throne-Holst, M., Frommer, W. B., & Patrick, J. W. (2003). Phloem loading and unloading of sugars and amino acids. *Plant, Cell & Environment*, 26(1), 37-56.

Le Phloème serait-il la source en eau ?

Circulation de croissance



L'expansion des organes en volume est le processus le plus sensible au déficit hydrique



Boyer JS, 1970. Leaf Enlargement and metabolic rates in corn, soybean and sunflower at various leaf water potentials. J Exp Bot 233-235

Figure 1

Relation entre la vitesse d'allongement foliaire (○), la photosynthèse nette (■) et le potentiel hydrique foliaire chez le maïs (d'après Boyer, 1970).

Flux d'eau à travers la plante



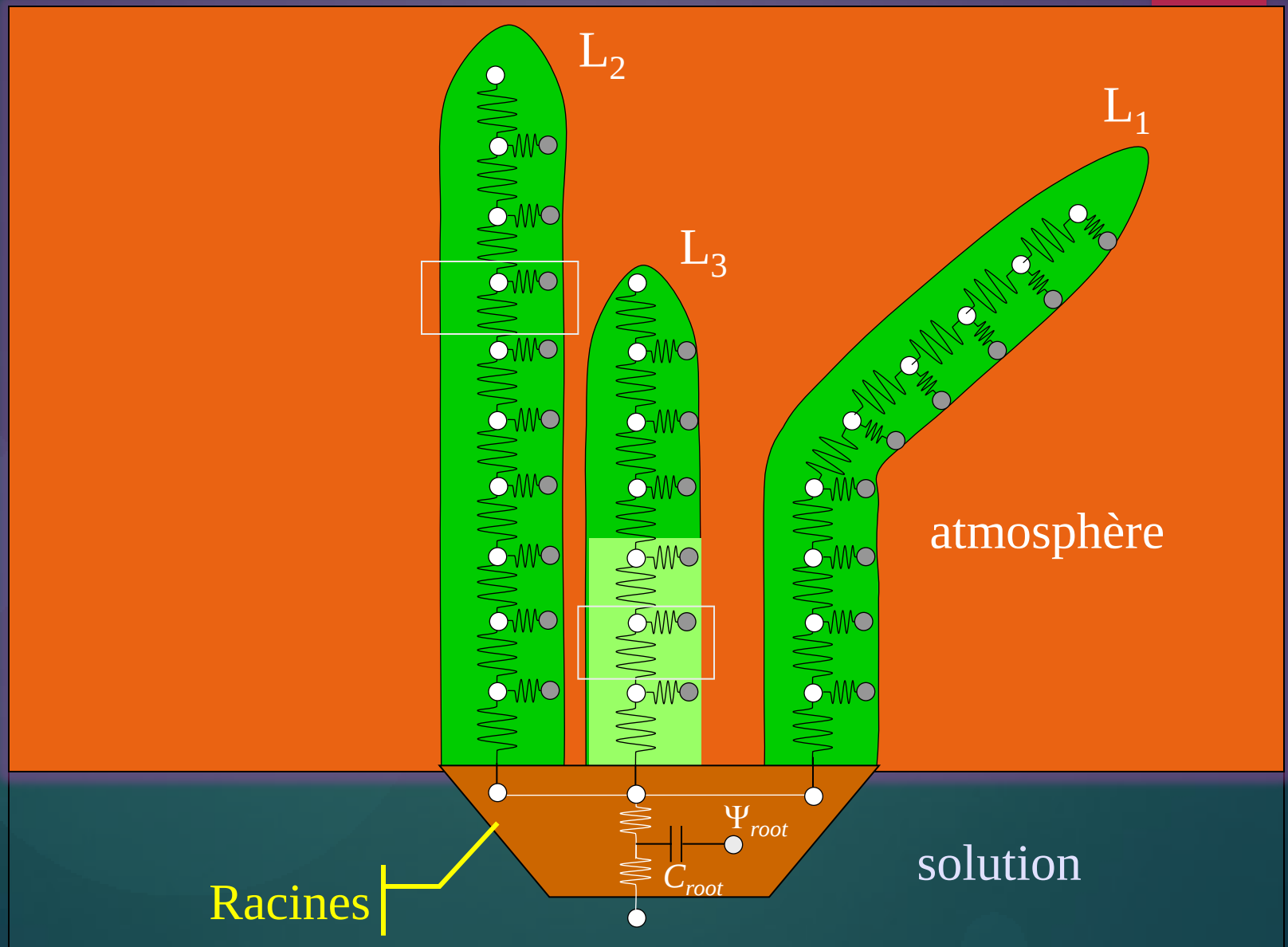
Circulation xylémienne

JL Durand. Guttation sur plantules de fétuque élevée au matin. Lusignan

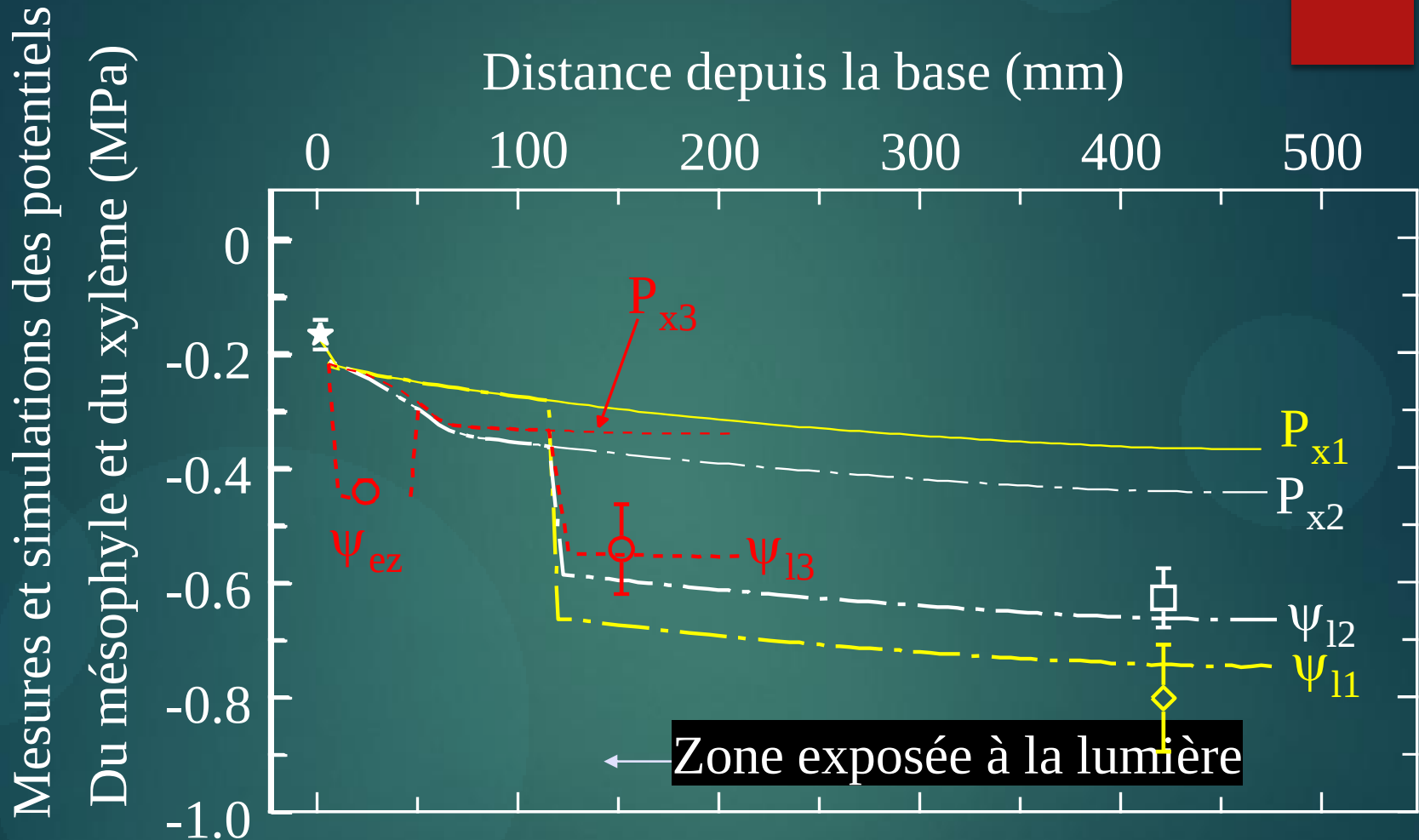


Architecture hydraulique d'une graminée

Régulation du transport de l'eau dans la plante



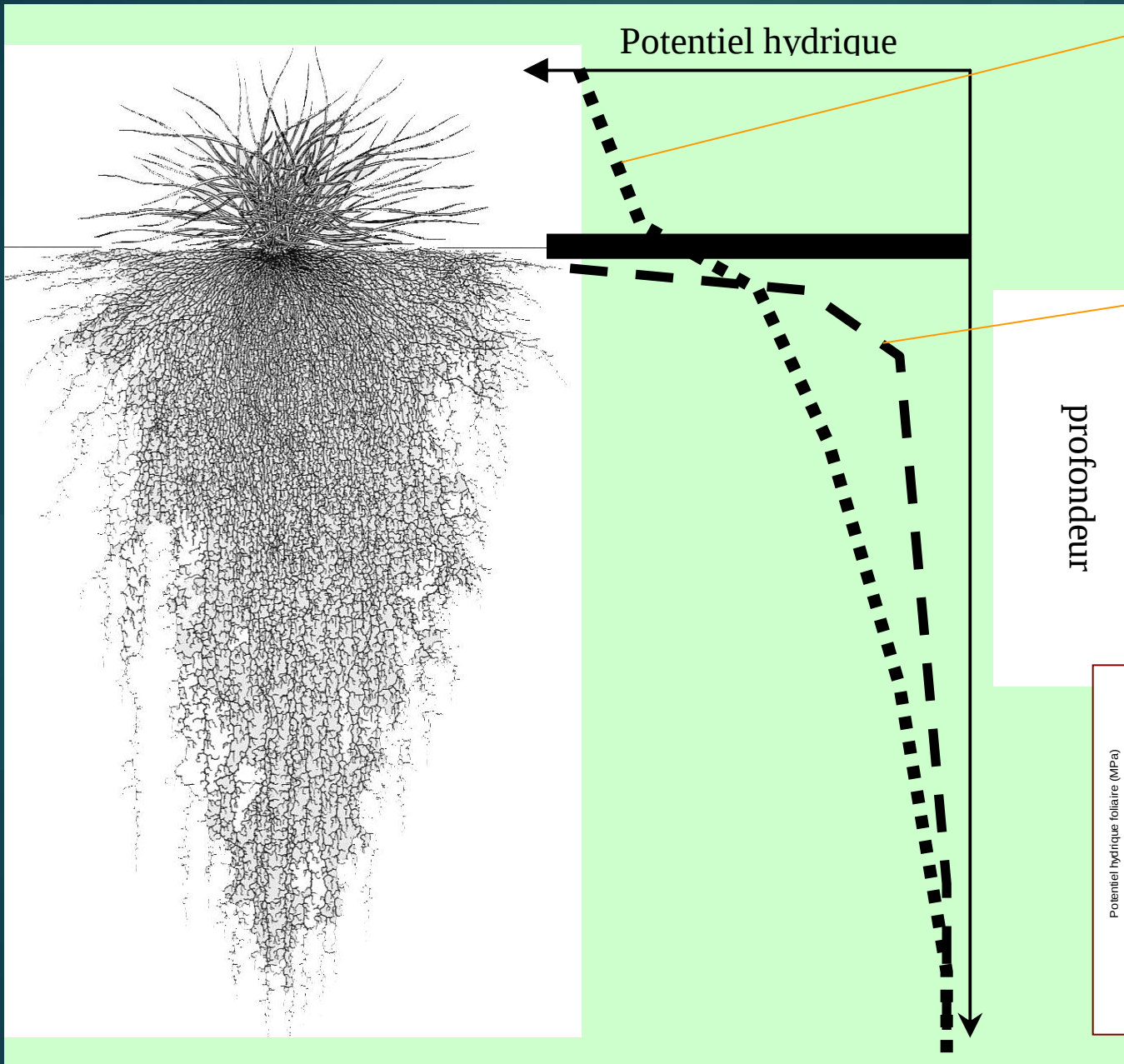
Mesures et simulations de potentiels hydriques



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

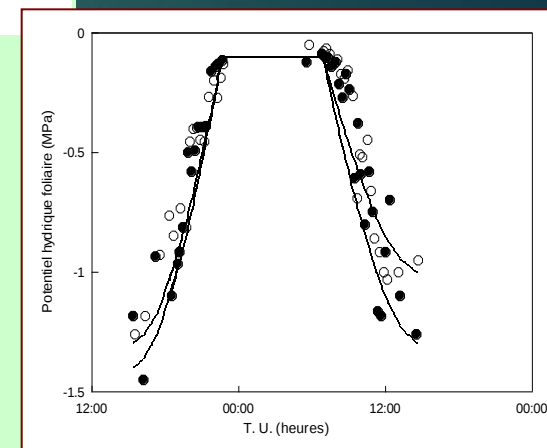
Comment fonctionne l'ascension de la sève

1. La transpiration commence sous l'effet de l'augmentation du rayonnement
2. La tension dans les parois des chambres sous-stomatique s'élève 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 s'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		$RT/V_w L_m (R_H)$ MPa	Ψ MPa
Sol 0.5 cm	-0.03	0.01			-0.04
Sol adjacent aux racines	-0.1	0.05			-0.15
Xylème de la racine	-0.3	0.1			-0.4
Xylème dans la tige	-0.5	0.05			-0.55
Vacuole de la cellule mésophyllienne	0.8	1.4			-0.6
Parois cellule mésophyllienne	-0.5	0.1			-0.6
Air espaces intercellulaires				-0.6	-0.6
Air ch. sous-stomatique (95 % H.R.)				-7.0	-7.0
Air dans la couche limite (60%)				-70.2	-70.2
Air régional (50 %)				-95.1	-95.1

Evaporation d'une feuille

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

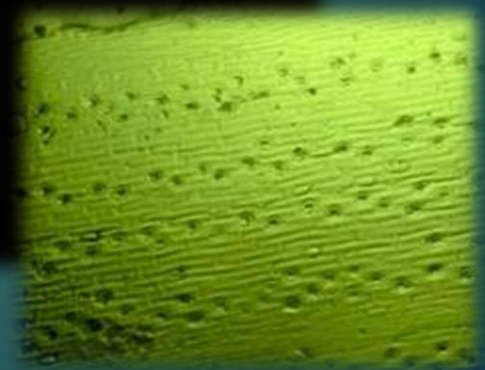
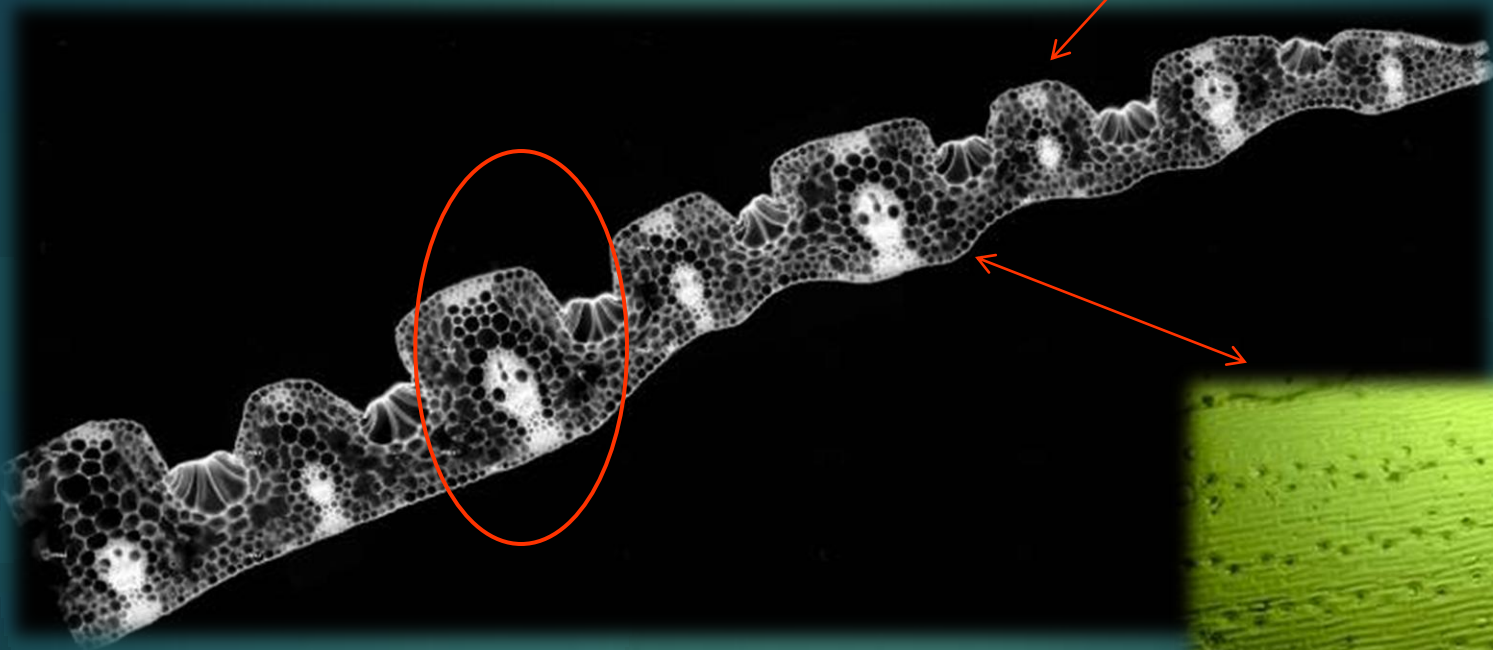
g_s = Conductance stomatique, en m.s^{-1}

S_f = surface de feuille (m^2)

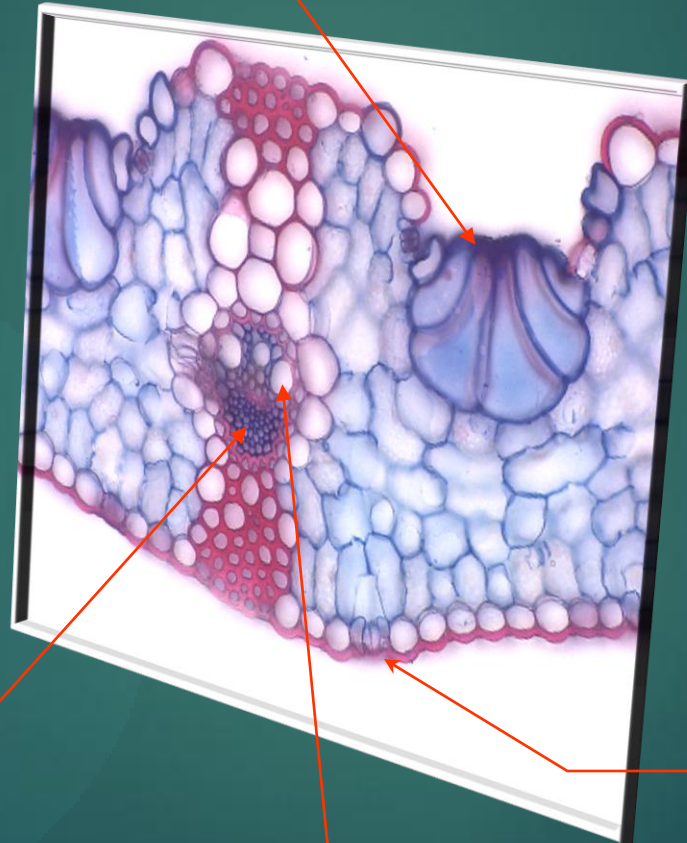
e_f et e_a = concentrations en eau dans la feuille et dans l'air (mmoles m^{-3})

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

Régulation de la transpiration.



Cellules
bulliformes



100µ

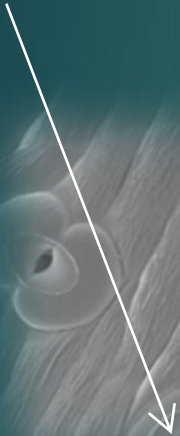
phloème

xylème

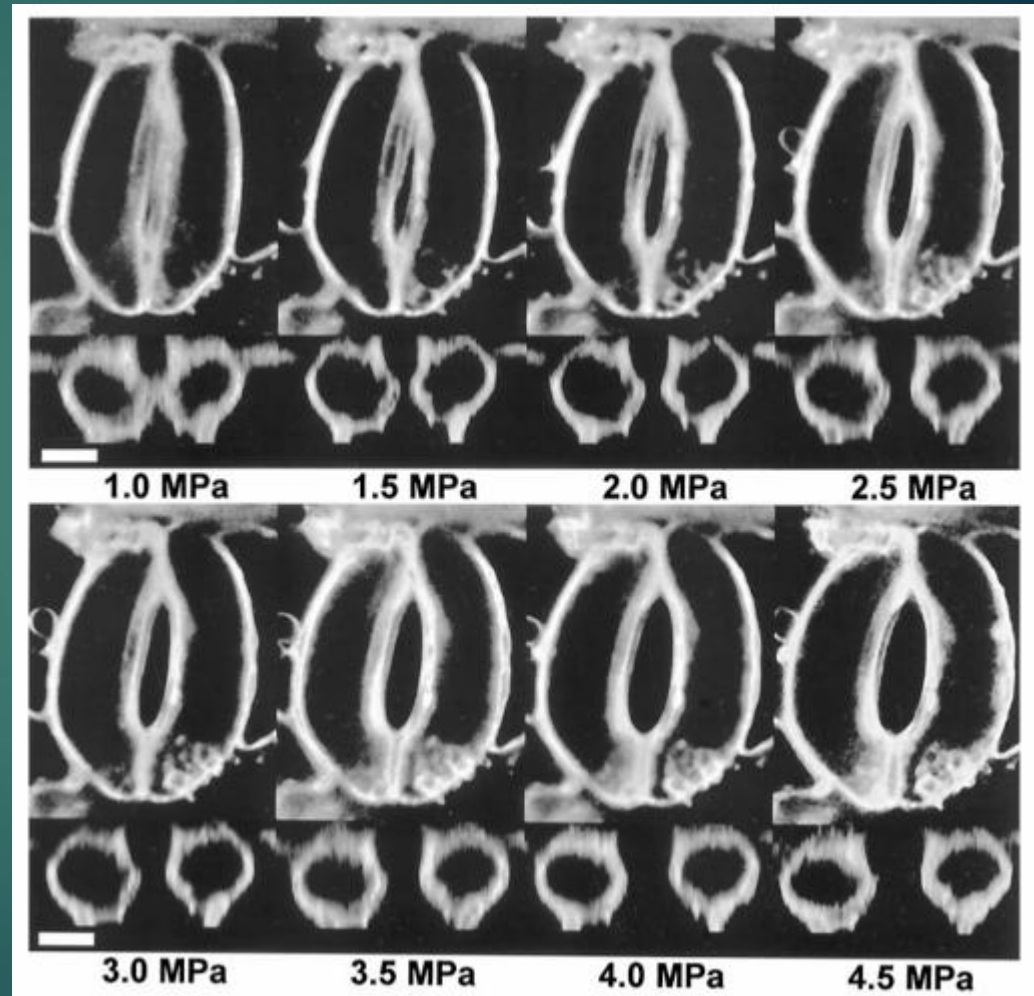
stomate

Exemple : ouverture et fermeture des stomates

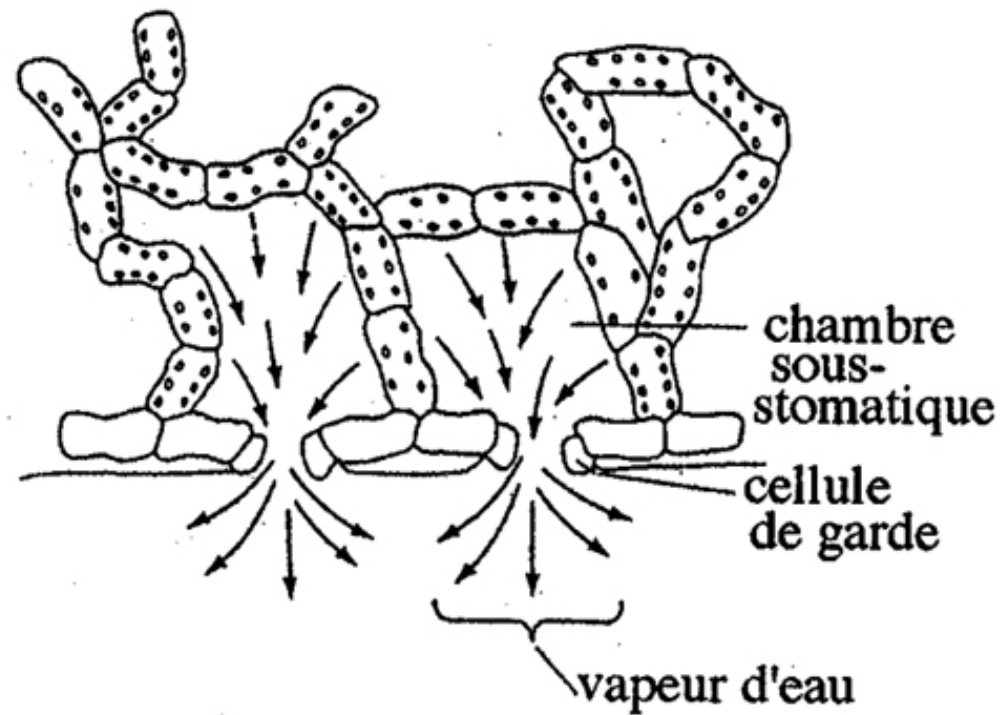
stomate



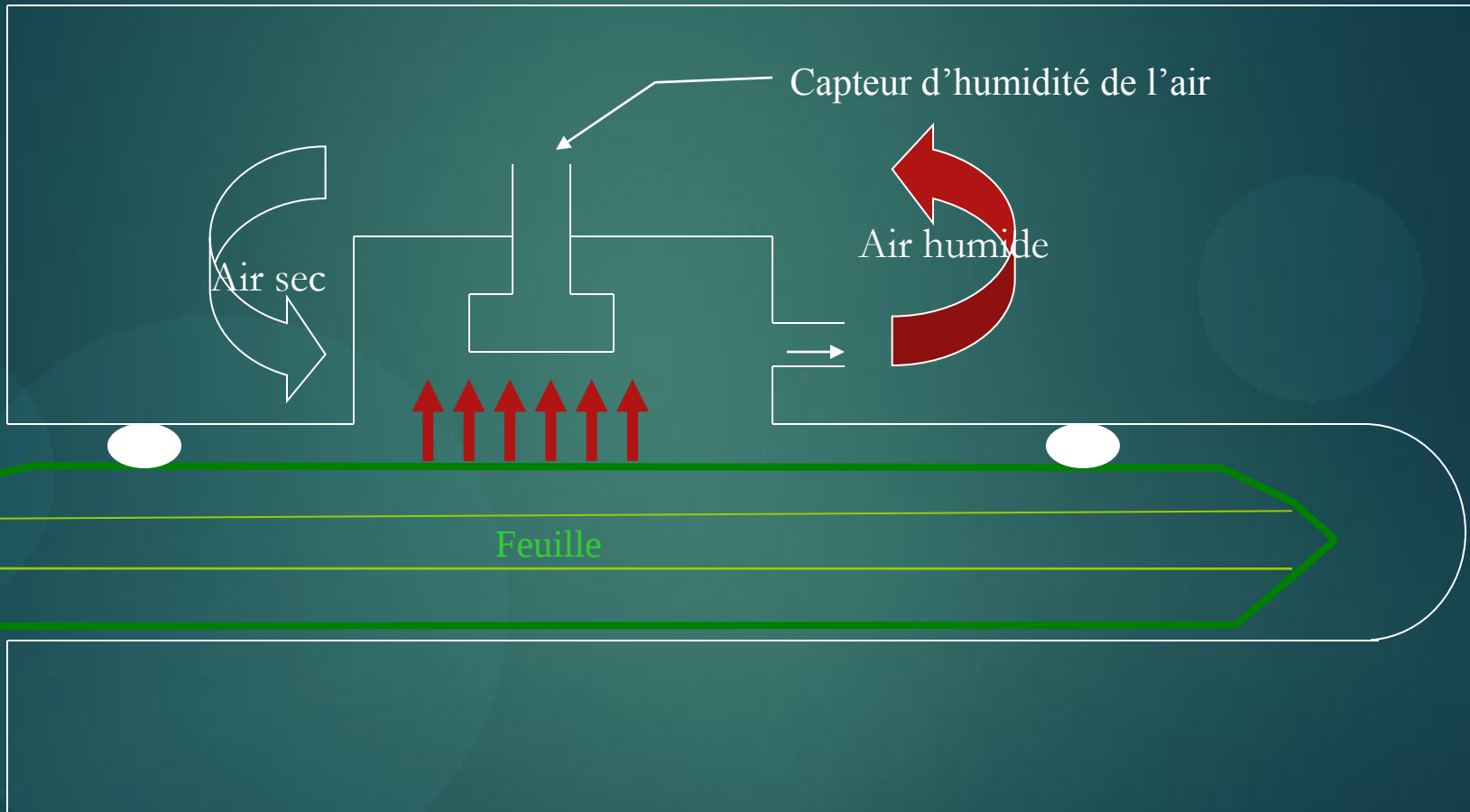
Franks, P. J., & Farquhar, G. D. (2001). The effect of exogenous abscisic acid on stomatal development, stomatal mechanics, and leaf gas exchange in *Tradescantia virginiana*. *Plant physiology*, 125(2), 935-942.



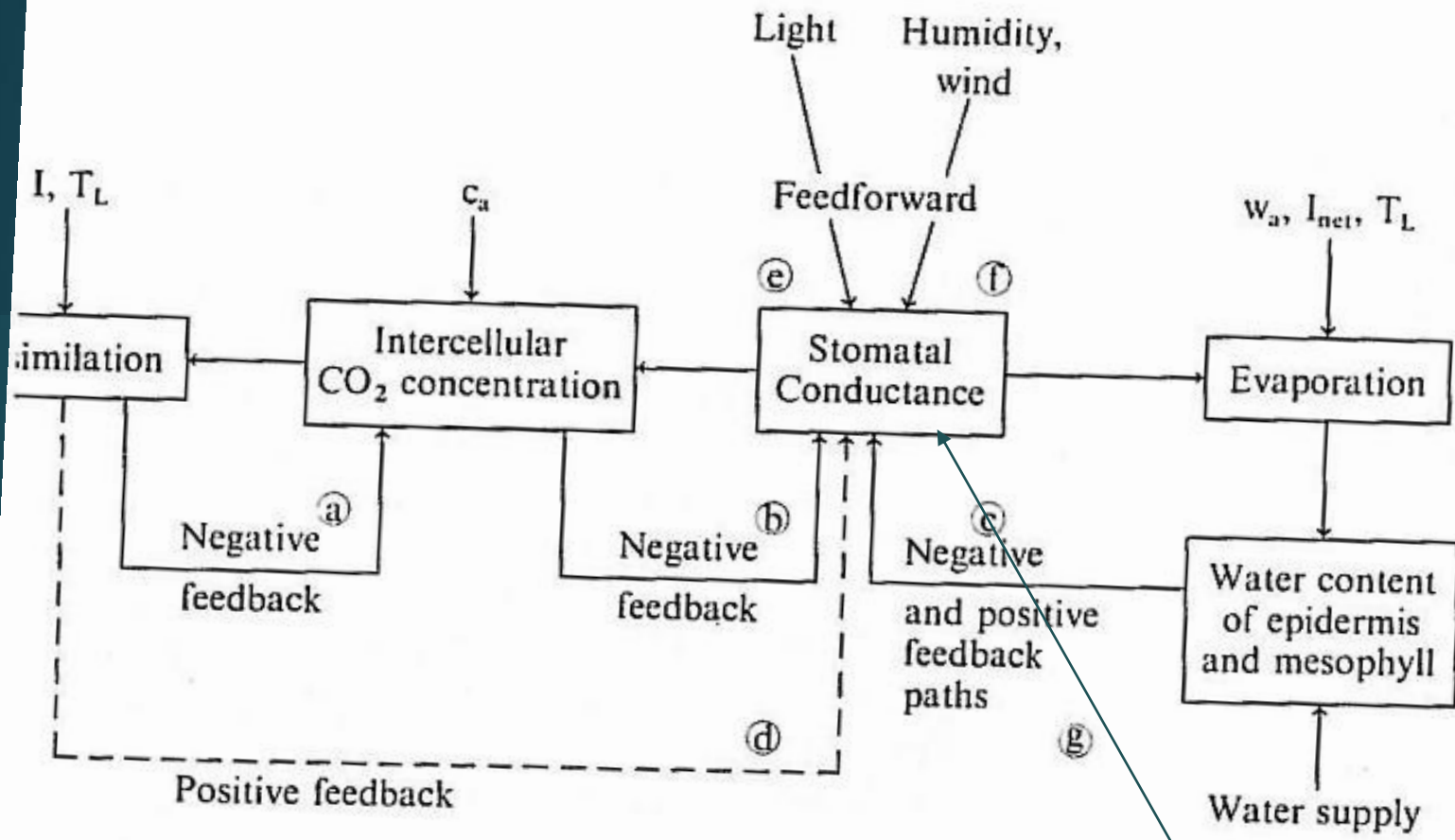
Franks *et al*, Plant Physiol. 2001



Pince de poromètre

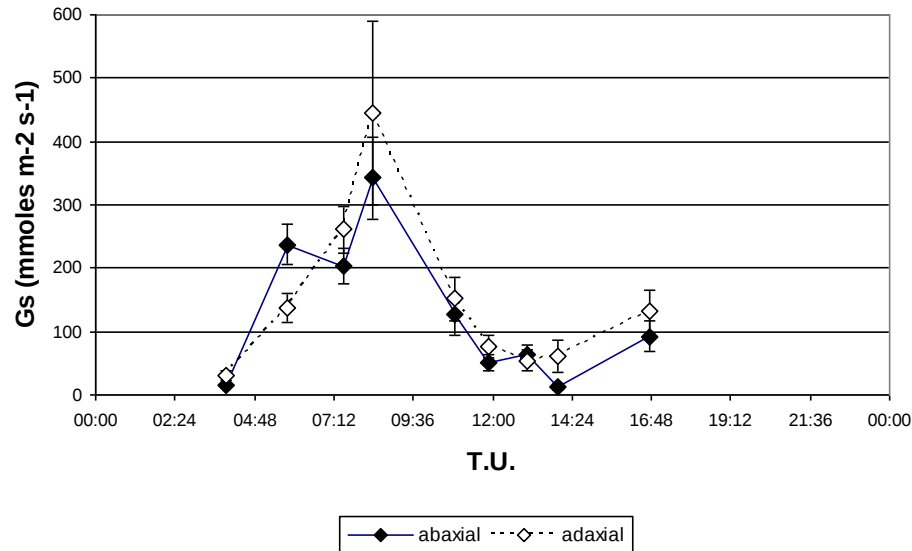




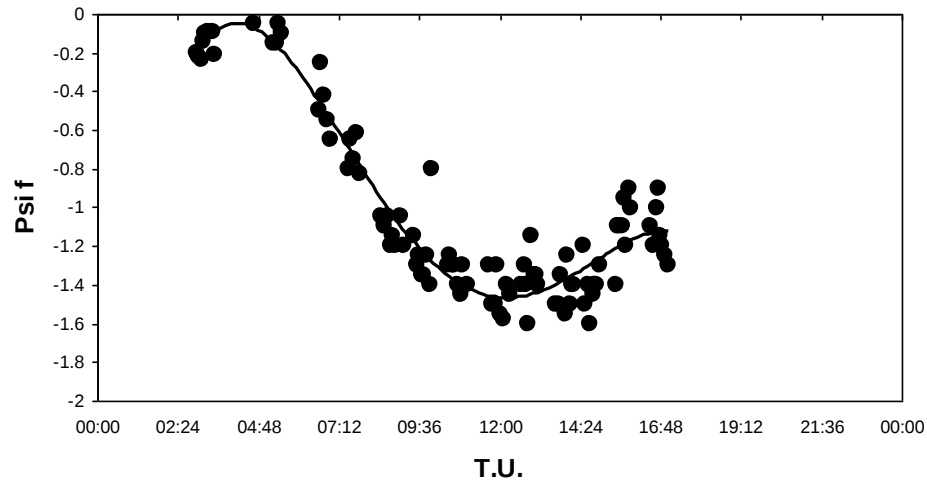


Soil water content

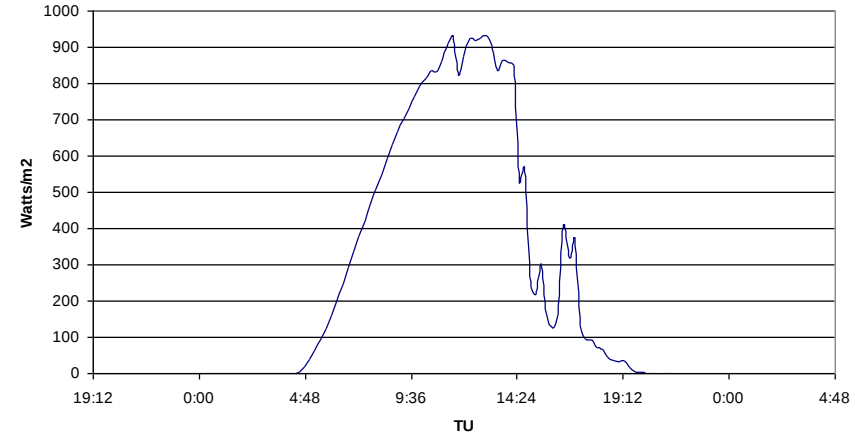
16 juillet 2004 (PIETE)



16 juillet 2004 (PIETE)

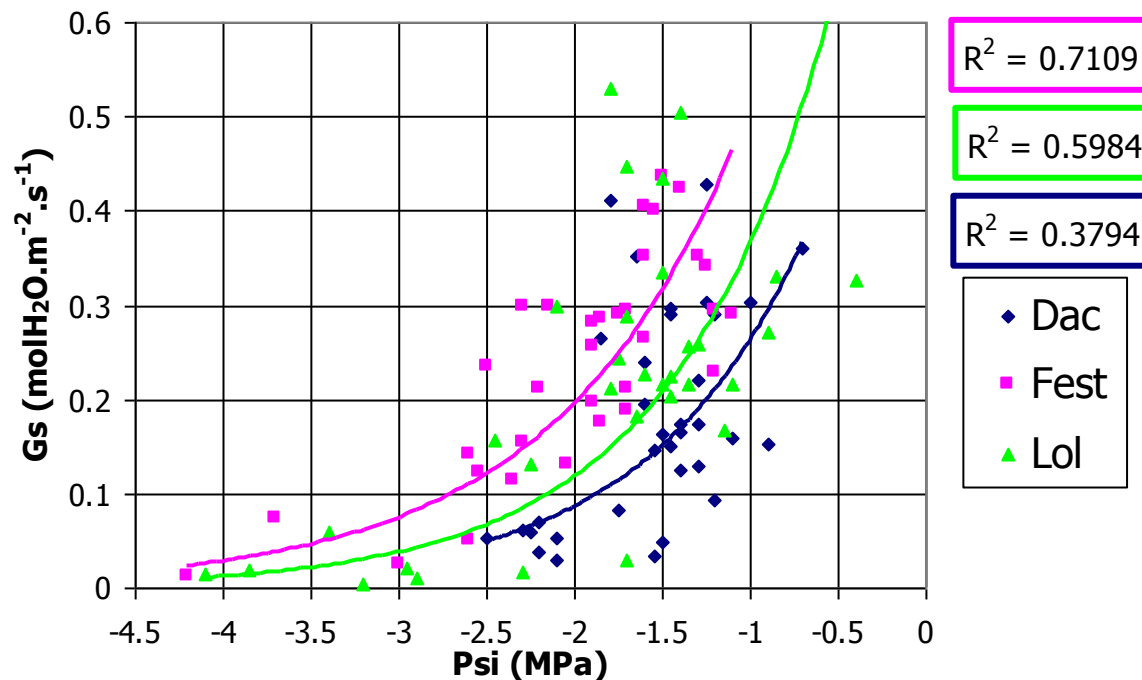


16 juillet



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

Fig 3: Conductance stomatique en fonction du potentiel hydrique



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.

Précipitation, interception des pluies



L'eau dans le sol

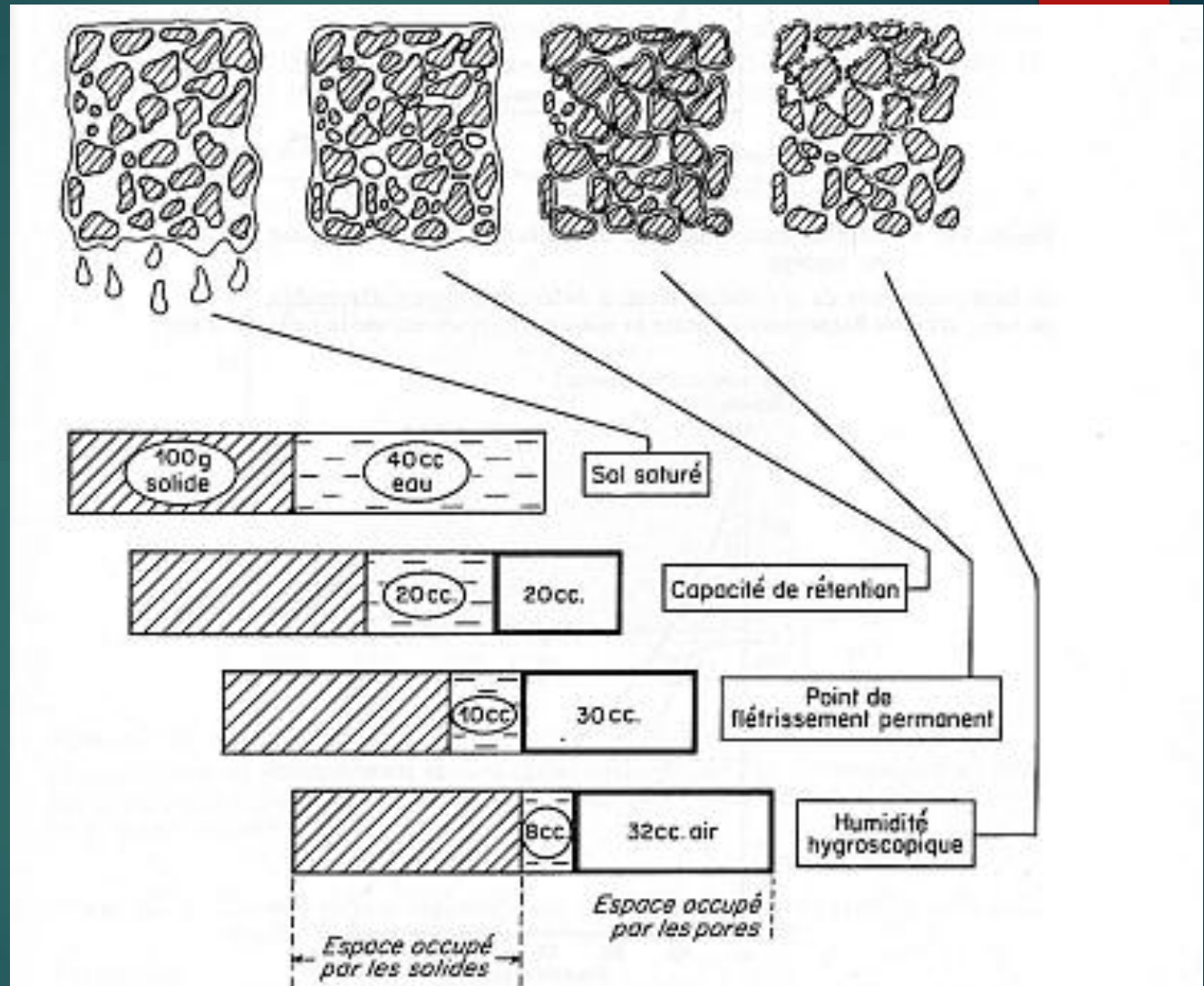


Figure 44. - Schéma indiquant les espaces occupés par les phases solide, liquide et gazeuse, dans un sol de limon argilo-sableux (d'après BUCKMAN et BRADY, 1965).

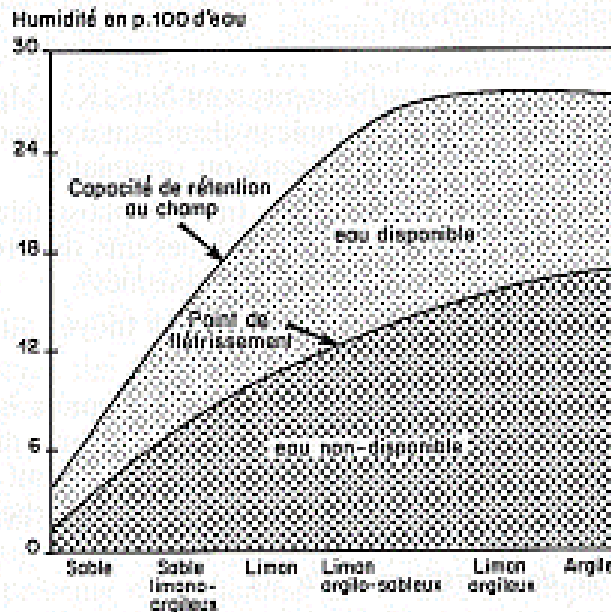


Figure 47. — Réserve utile en fonction de la texture (d'après BUCKMA)
La réserve utile ou eau disponible pour la plante augmente, lorsque fine, jusqu'aux limons argilo-sableux puis reste constante et peut légèrement diminuer dans les domaines très argileux.

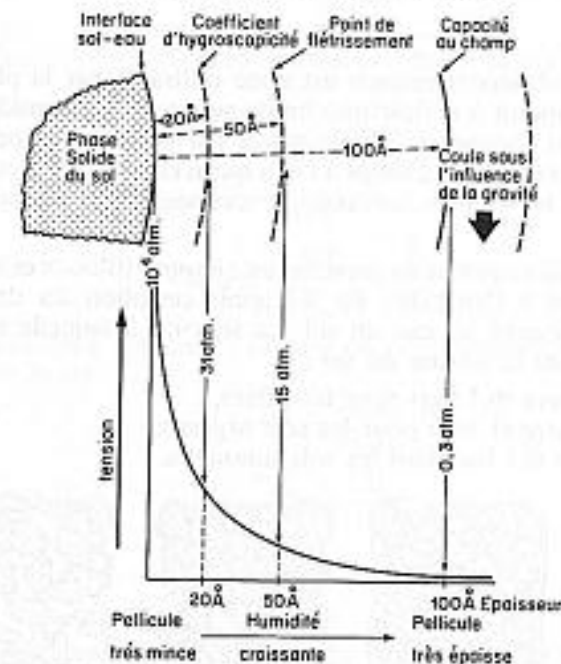
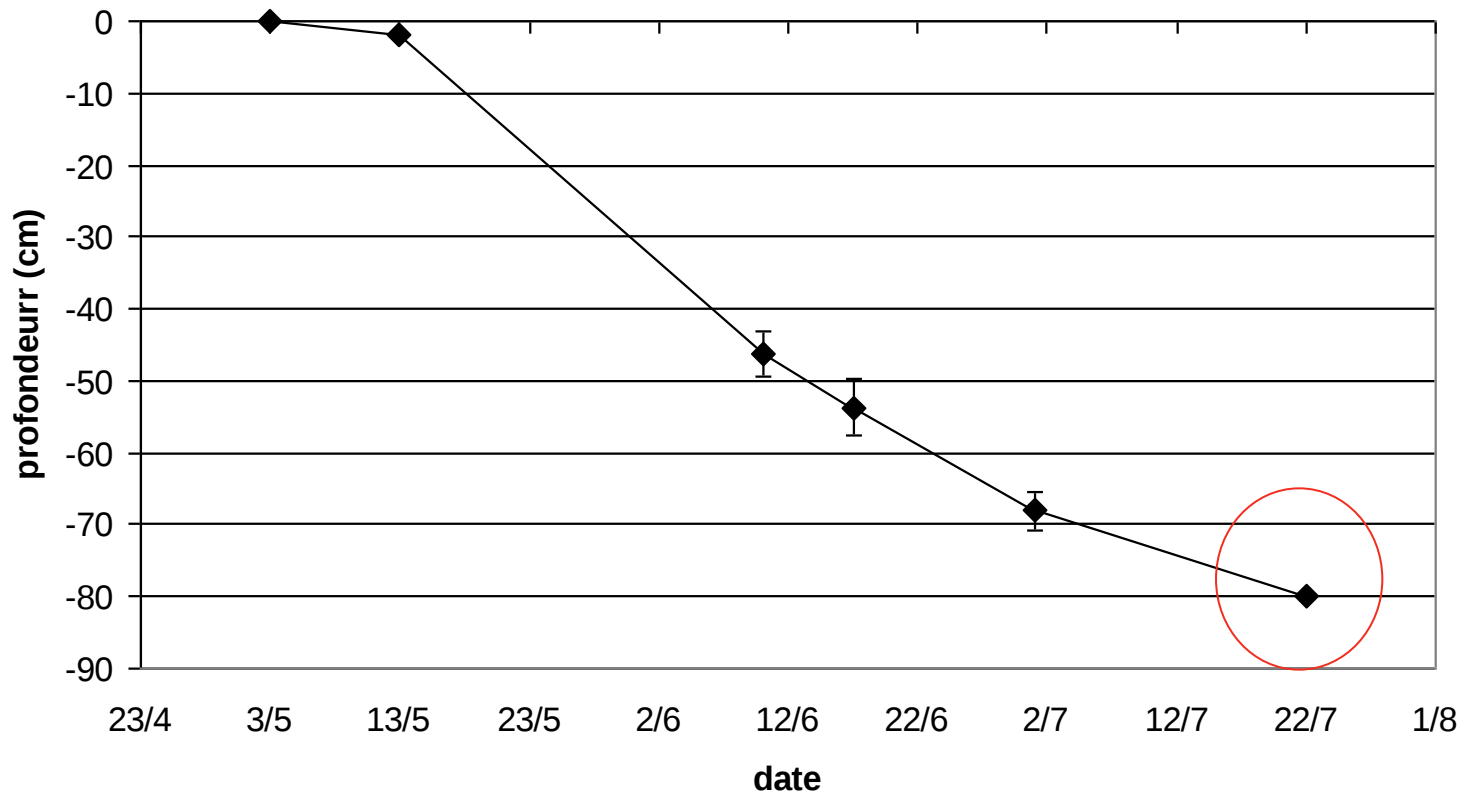


Figure 45. — Rapport entre l'épaisseur des pellicules d'eau et la tension avec laquelle l'eau est retenue

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

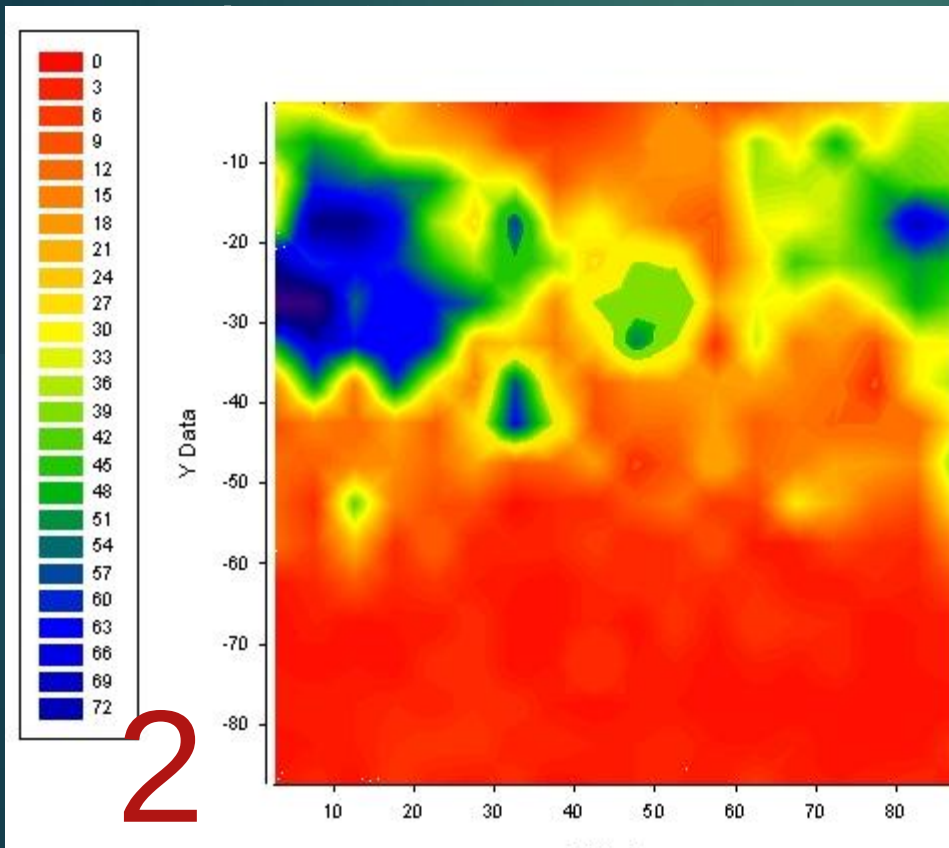
Profondeur enracinement (exemple de la croissance verticale des racines mesurée avec des carottes de sol)



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

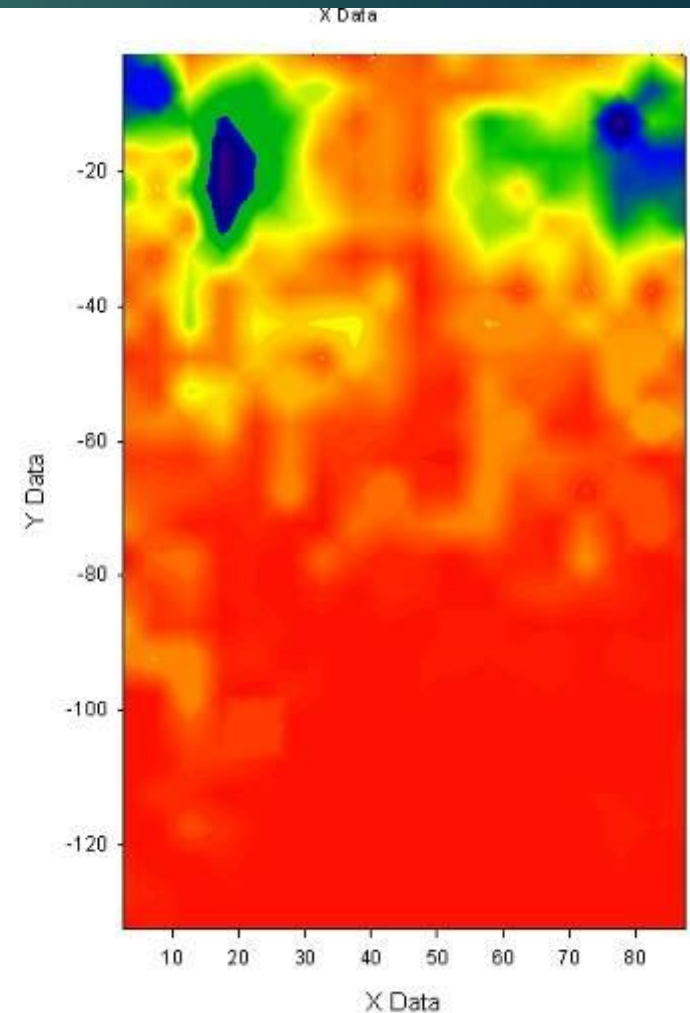


Profil de densités de racines le 22 juillet 2004 sur un sol rouge à



2

4



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

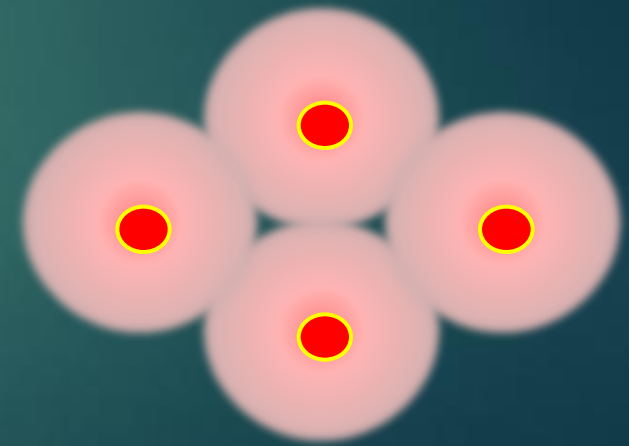
$$L_v = \frac{M_R \lambda_R}{V_{SOL}}$$

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

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

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

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



d'après Gardner, 1960

Mesurer l'eau du sol

■ Teneurs en eau pondérale et volumique

$$H_p = M_e / (M_e + M_{\text{solide}})$$

$$H_v = M_e / V_s$$

$$d_a = (M_e + M_{\text{solide}}) / V_s$$

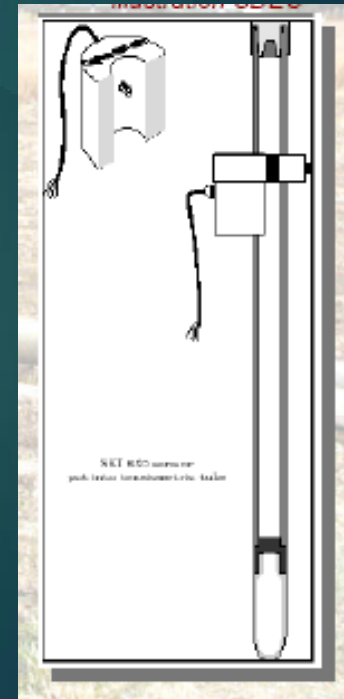
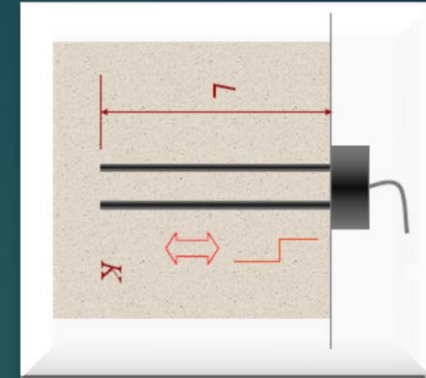
$$H_v = H_p \cdot d_a$$

H_p = humidité pondérale, M_e = masse d'eau de l'échantillon, M_{solide} = masse de solide de l'échantillon, H_v = humidité volumique, V_s volume de l'échantillon du sol *in situ*, d_a = densité apparente du sol.

- Sonde à neutrons
- TDR (ou réflectrométrie)
- Sonde Gamma pour mesure d_a

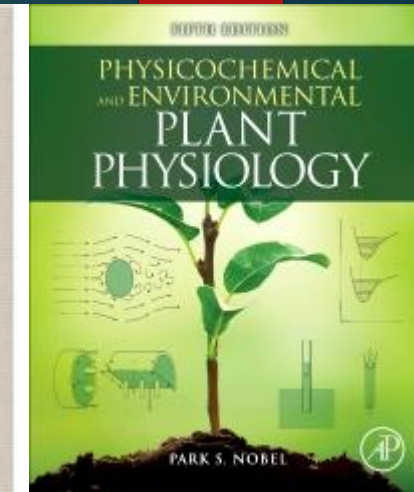
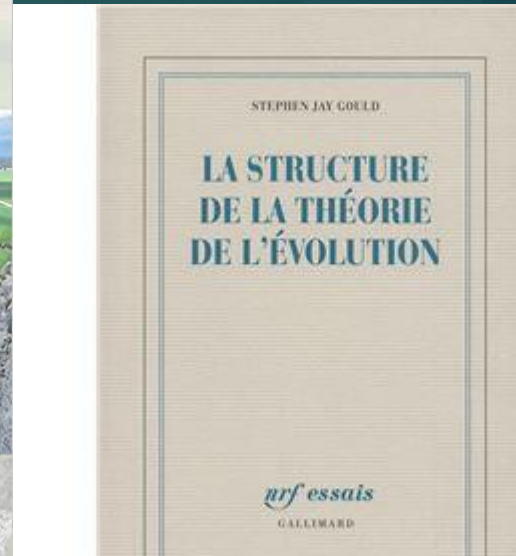
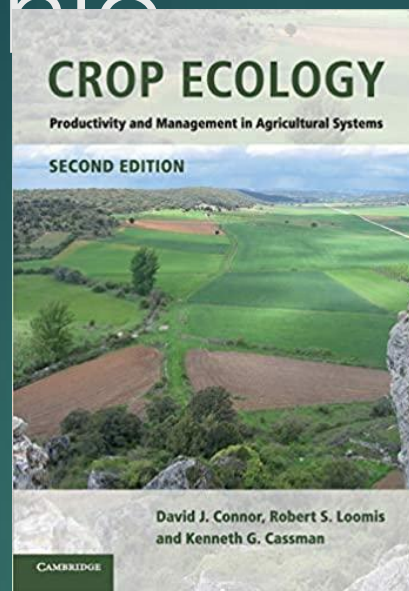
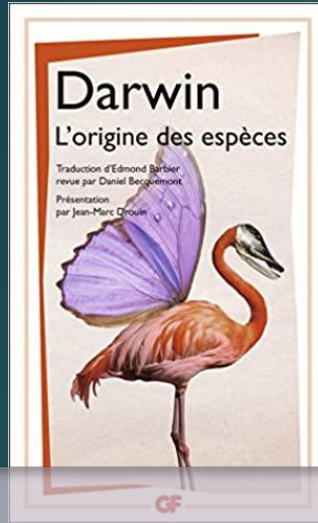
■ Pression

- Tensiomètres



conclusions

1. L'énergie solaire d'un lieu détermine au premier ordre **l'évapotranspiration potentielle**
2. L'énergie solaire absorbée par les feuilles détermine la quantité d'eau nécessaire pour la plante et **l'évapotranspiration maximale**.
3. L'architecture du système sol/plante/atmosphère détermine les mouvements d'eau possibles et **l'évapotranspiration réelle**:
4. la morphogenèse foliaire est le processus décisif de l'économie de l'eau : → conditions hydriques et réponses à l'état hydrique.
5. La quantité d'eau dans le sol limite la consommation d'eau potentielle.
6. L'enracinement détermine l'eau réellement disponible.
7. Les stomates régulent les échanges instantanés



LIVRES

- ▶ Park S Nobel. 2009. Physicochemical and Environmental Plant Physiology.(4e édition). Academic Press
- ▶ John Monteith 2013 Principles of Environmental Physics. (4e Edition) Academic Press
- ▶ Ian Woodward 1987/2008 Climate and Plant Distribution. Cambridge University Press.
- ▶ Connor, Loomis, Cassman, 2011. Crop Ecology. Cambridge University Press
- ▶ Charles Darwin 1859. L'Origine des Espèces. Traduction 2008. Garnier Flammarion.
- ▶ Stephen J Gould, 2002. La Structure de la Théorie de l'Evolution. Gallimard
- ▶ Gaston Bachelard. 1993 (ed) La Formation de l'Esprit Scientifique. Vrin
- ▶ Léo Coutellec 2015. La Science au pluriel. Quae.
- ▶ D'Arcy Thompson 2009 (ed) Forme et Croissance. Le Seuil

Bibliographie suite

ARTICLES

- ▶ Passioura J, 1979.Accountability, philosophy and plant physiology. *Search*, 10(10), 347-350.
- ▶ Durand JL Durand, J. L., Varlet-Grancher, C., Lemaire, G., Gastal, F., & Moulia, B. (1991). Carbon partitioning in forage crops. *Acta biotheoretica*, 39(3-4), 213-224.
- ▶ Durand, J. L. (2007). Les effets du déficit hydrique sur la plante: aspects physiologiques. *Fourrages* (190), 181-195.(2007).
- ▶ Durand, J. L., Lorgeou, J., Picon-Cochard, C., & Volaire, F. (2013). Ecophysiologie de la réponse et de l'adaptation des plantes fourragères et prairiales au changement climatique. *Fourrages* 214, 111-118.(2013).