



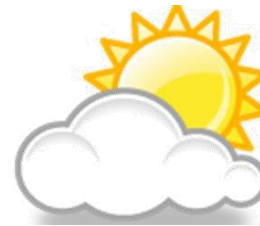
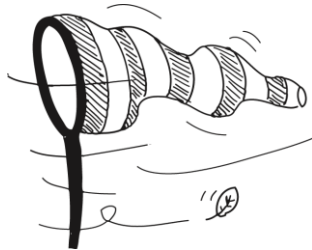
# L'évapotranspiration de référence

Gilles Boulet,  
CESBIO/IRD



# Eau + Energie = Evaporation

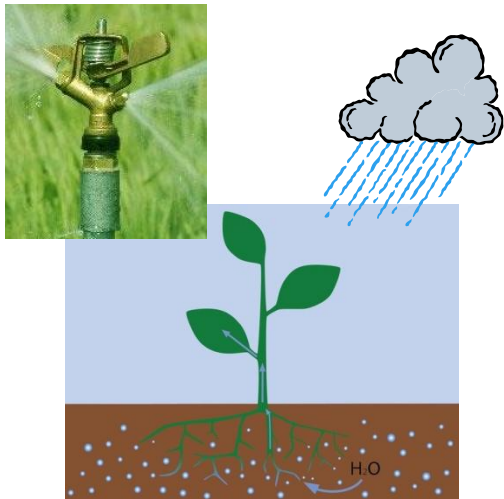
- Pour bien faire sécher son linge, dans quel conditions le placer ?
  - Au **soleil**
  - Dans un endroit **chaud** et **sec**
  - Dans un endroit **aéré**
- L'évaporation dépend donc de facteurs climatiques qui sont:
  - L'énergie solaire
  - La température et l'humidité de l'air
  - La vitesse du vent



L'évaporation est le processus par lequel l'eau liquide est convertie en vapeur (**vaporisation**) puis extraite du milieu (**convection et diffusion**)

# Pourquoi l'évapotranspiration de référence ?

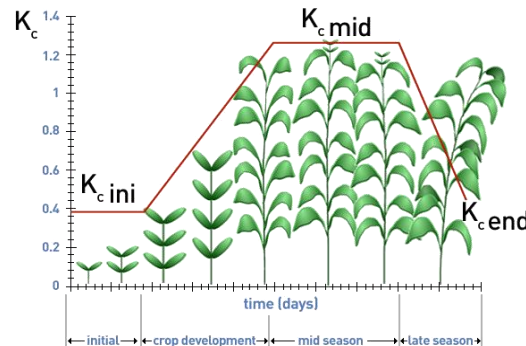
L'évapotranspiration est essentiellement fonction de...



L'eau du sol



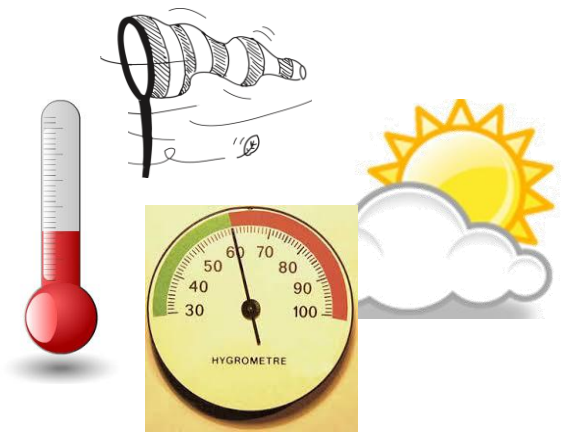
Bilan hydrique



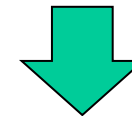
La végétation



Satellite (NDVI)

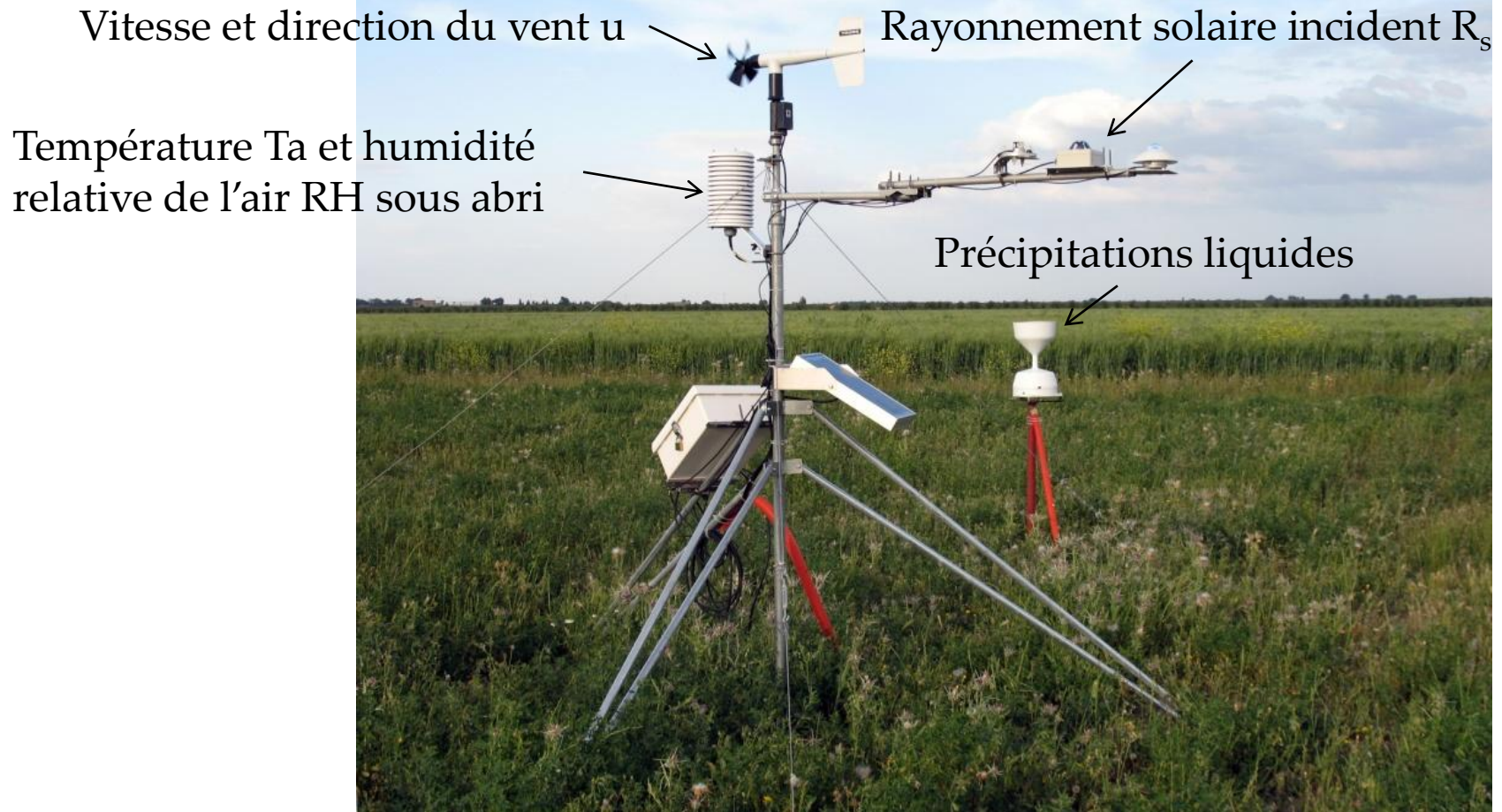


La demande climatique



Données météo  
synthétisées par **l'ET<sub>0</sub>**

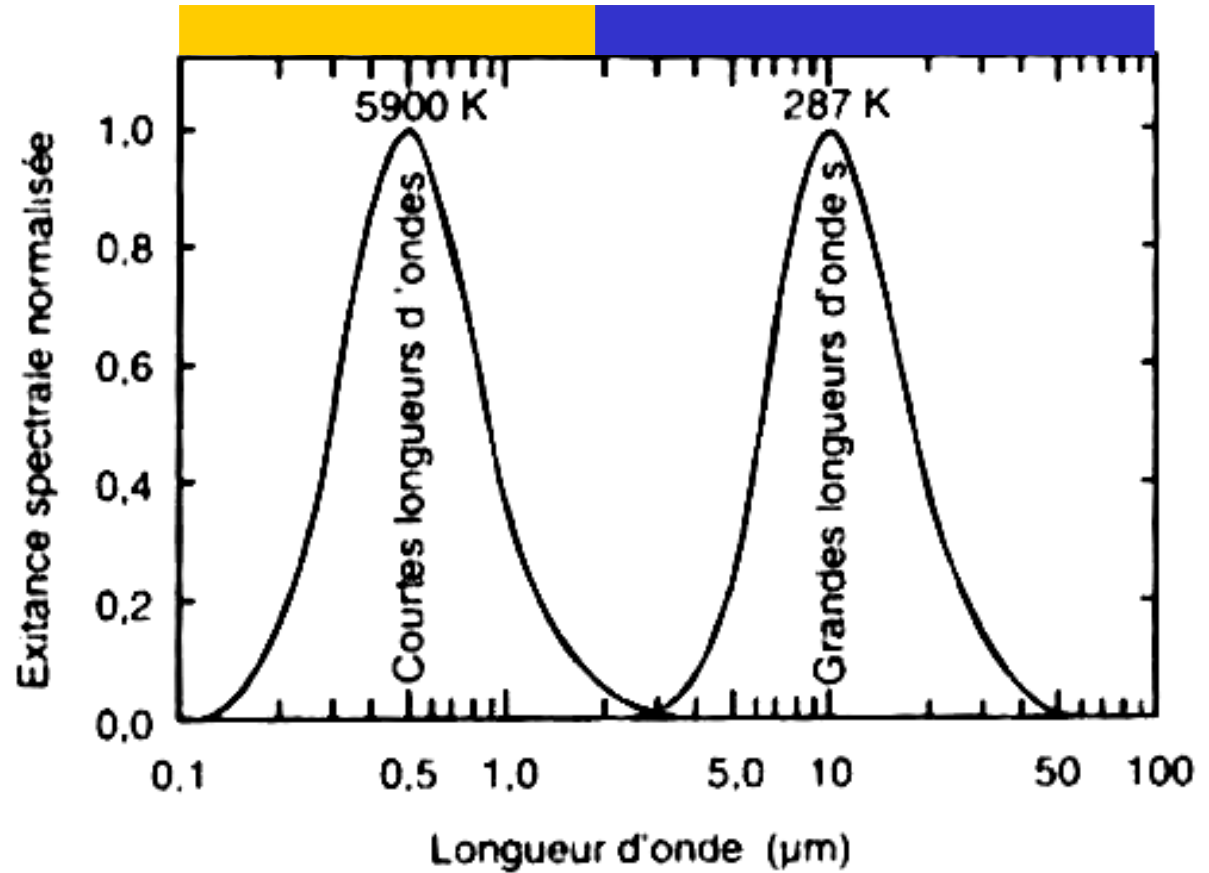
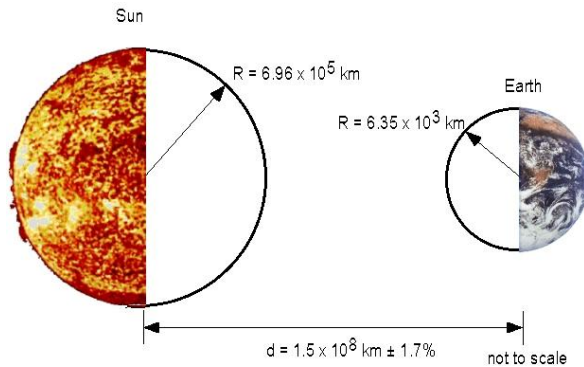
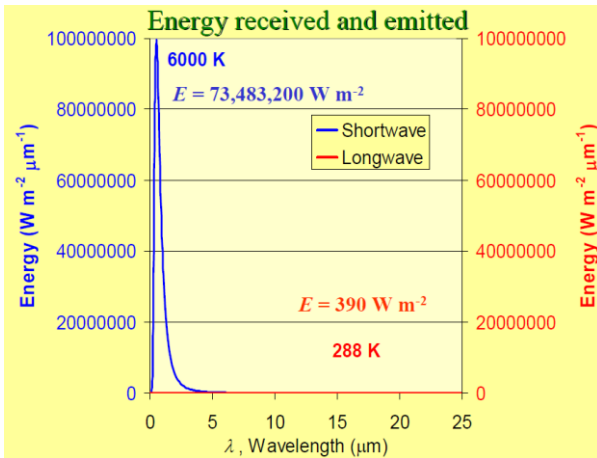
# Le forçage météorologique



En absence de données météo locales, vous serez amenés à utilisés les données du **réseau synoptique** de prévision météo pour lequel le vent est mesuré à **10m** et **le rayonnement solaire n'est pas disponible** (voir MSG SAF-LAND)



# Spectres solaire/tellurique

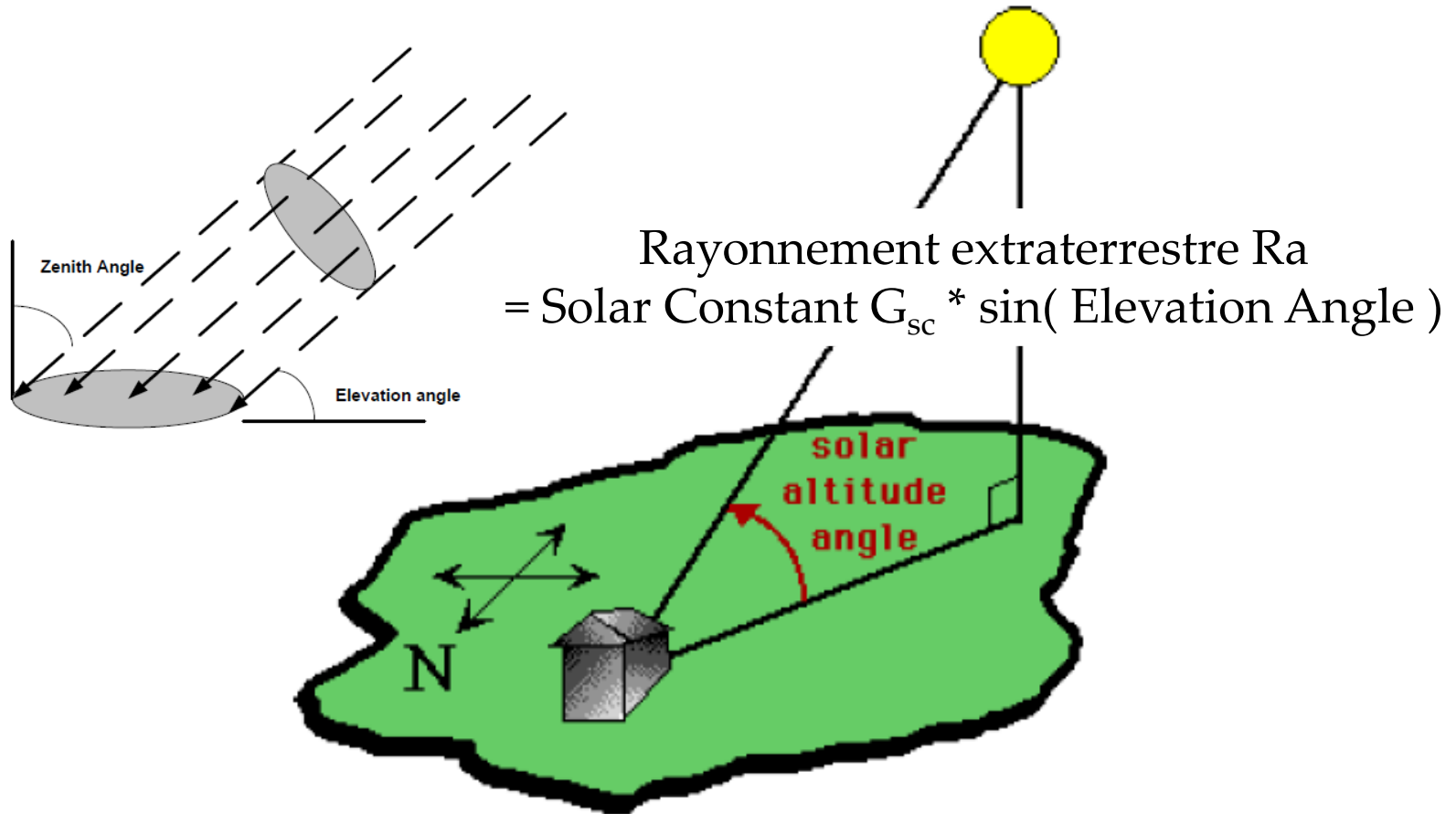


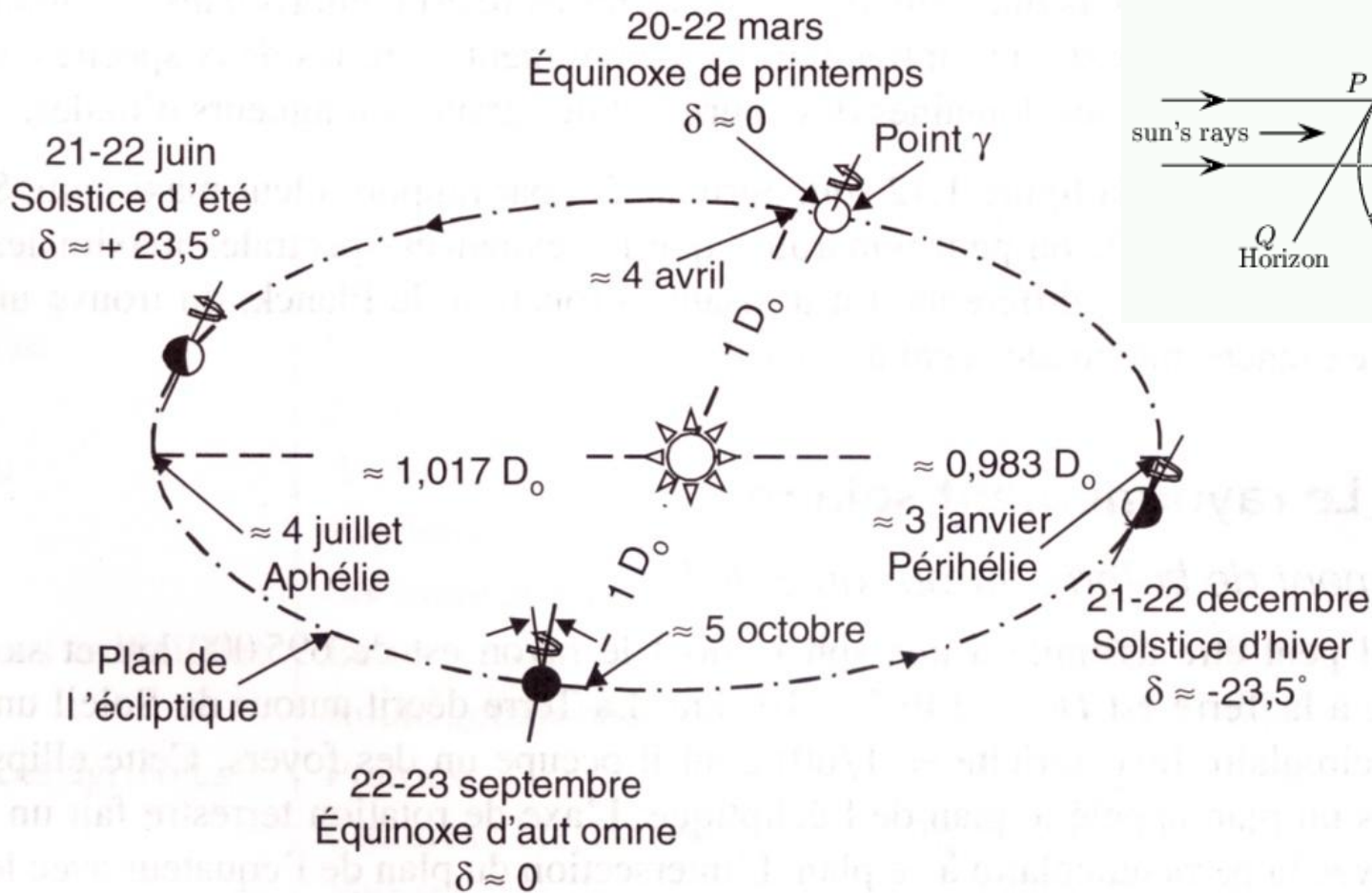
Loi de Stefan-Boltzman:

$$R_{\text{surface}} \uparrow = \varepsilon \sigma T_{\text{surface}}^4$$

Solar Constant  $G_{sc} = 1367 \text{ [Wm}^{-2}]$   $G_{sc} = 0.082 \text{ [MJm}^{-2}\text{min}^{-1}]$  5

The altitude angle (sometimes referred to as the "solar elevation angle") describes how high the sun appears in the sky. The angle is measured between an imaginary line between the observer and the sun and the horizontal plane the observer is standing on. The altitude angle is negative when the sun drops below the horizon. (In this graphic, replace "N" with "S" for observers in the Southern Hemisphere.)





**Figure 1.13** Mouvement de la Terre autour du Soleil (adapté de Iqbal, 1983).

$$d = 23.45 * \sin [360 / 365 * (284 + N)]$$

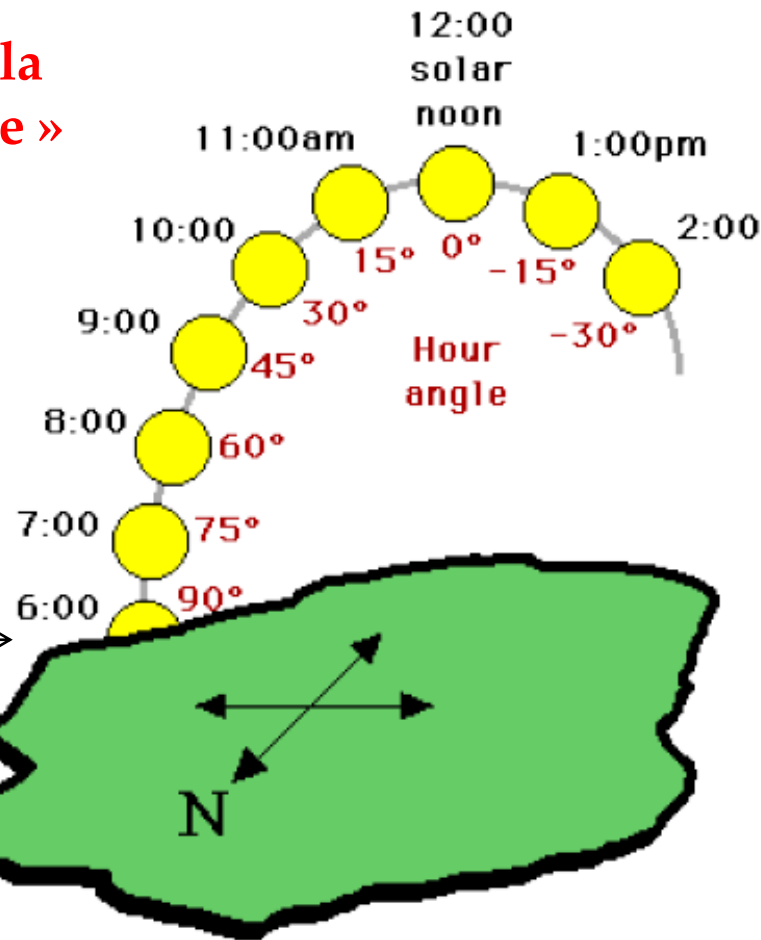
N = day number, January 1 = day 1

$\delta$  ou  $d$  déclinaison solaire

**Trigonométrie au midi solaire**

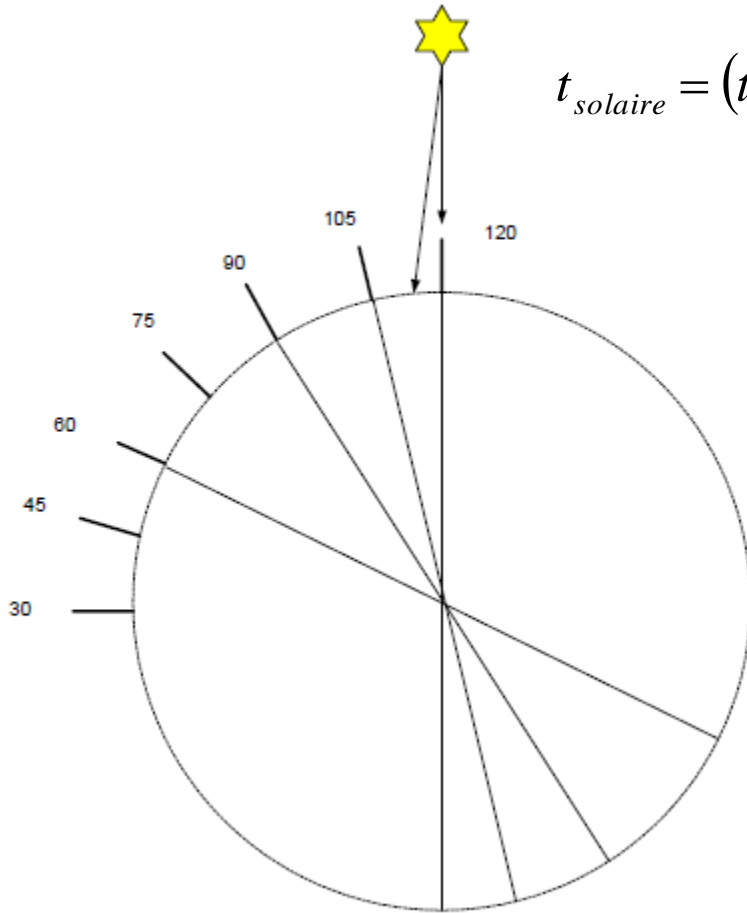
The hour angle measures time before solar noon in terms of one degree for every four minutes, or fifteen per hour. Time after solar noon is expressed using a negative hour angle. Therefore, at two hours before solar noon the hour angle is 30 degrees, and at two hours after solar noon it is -30 degrees. This chart depicts the relationship between the hour angle and local solar time ("N" represents North but would be South in the Southern Hemisphere).

**Lien avec les autres heures de la Journée = « angle horaire solaire »**  
 $= (2\pi/24) * (12 - t_{\text{solaire}})$

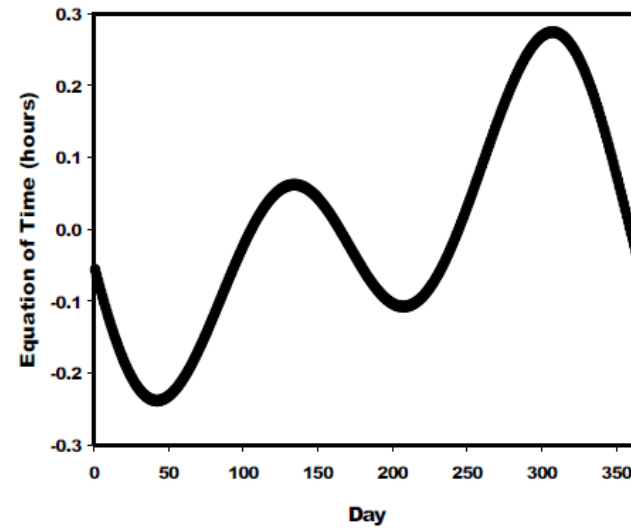


angle  $\omega_s$  de levé du soleil →  
 ici équinoxe /  $90^\circ$  mais  
 varie au cours de l'année  
 angle de couché de soleil  
 $= -\omega_s$





$$t_{\text{solaire}} = (t_{\text{local}} - 0.5p) - \frac{(L_m - L_z)}{15} - 12 + S_c \pm \Delta\text{heure}_{\text{hiver}}$$



**$S_c$**  = Equation of time: it arises because of the eccentricity of the Earth's orbit around the sun and the obliquity (tilt) of the ecliptic (the great circle that represents the Earth's path around the sun). The eccentricity of the earth orbit around the sun forces the angular rotation rate to be variable; this allows equal areas to be swept with time during the Earth's orbit.

# panoplie des paramètres orbitaux (suite)

$$\varphi = \frac{\pi L}{180}$$

Latitude [rad]

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right)$$

$\delta$  déclinaison solaire [rad]

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$$

$d_r$  correction d'excentricité [-]

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364}$$

$S_c$  différence entre temps solaire moyen et temps solaire vrai [hr]

$$S_c = 0.1645 \sin(2b) - 0.1255 \cos(b) - 0.025 \sin(b)$$

J jour de l'année [1-365]

**L latitude en ° !**

$$J = D_M - 32 + \text{Int}\left(275 \frac{M}{9}\right) + 2 \text{Int}\left(\frac{3}{M+1}\right) + \text{Int}\left(\frac{M}{100} - \frac{\text{Mod}(Y, 4)}{4} + 0.975\right)$$

where:

- $D_M$  = the day of the month (1-31),
- $M$  = the number of the month (1-12), and
- $Y$  = the number of the year (for example 1996 or 96).

# calcul du rayonnement extraterrestre $R_a$

$$R_a = \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} d_r \sin(\text{elevation\_angle})$$

*horaire*

$$= \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1))]$$

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad \textit{journalier}$$

$R_a$  rayonnement extraterrestre [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  ou  $\text{h}^{-1}$ ]

La longitude  $L_m$  [°] **>0 OUEST !!!**

$$\omega = \frac{\pi}{12} \left[ (t - 0.5p) - \frac{(L_m - L_z)}{15} - 12 + S_c \right] \quad \textit{horaire}$$

La longitude du milieu du fuseau  
horaire  $L_z$  [°] **>0 OUEST !!!**

$$\omega_s = \cos^{-1} [-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad \textit{journalier}$$

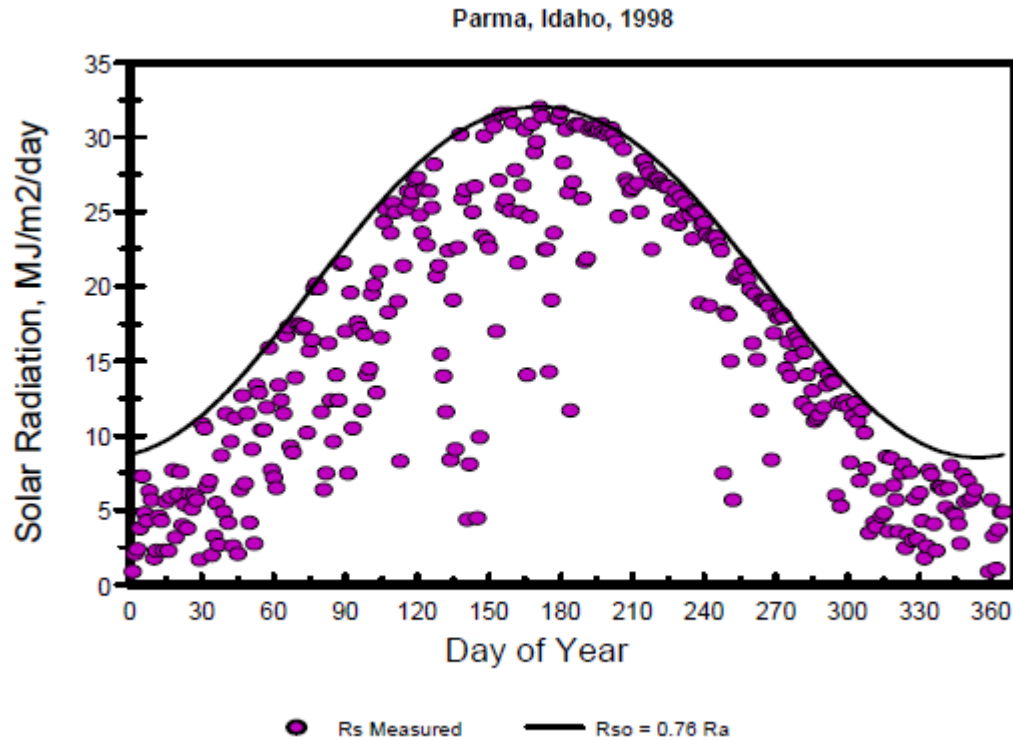
$p$  pas d'observation

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi p}{24} \quad \omega_2 = \omega + \frac{\pi p}{24}$$

$\omega$  angle horaire et  $\omega_s$  angle horaire de levé du soleil [rad]

**$\omega$  doit être nul au midi solaire =  $\max(R_s)$  = vérification 1**

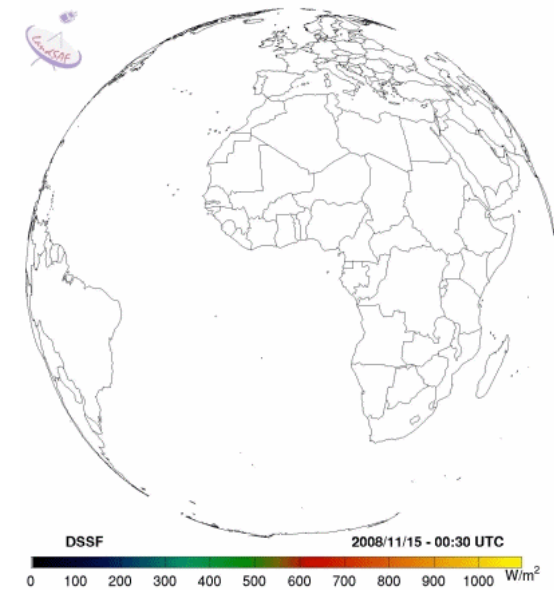
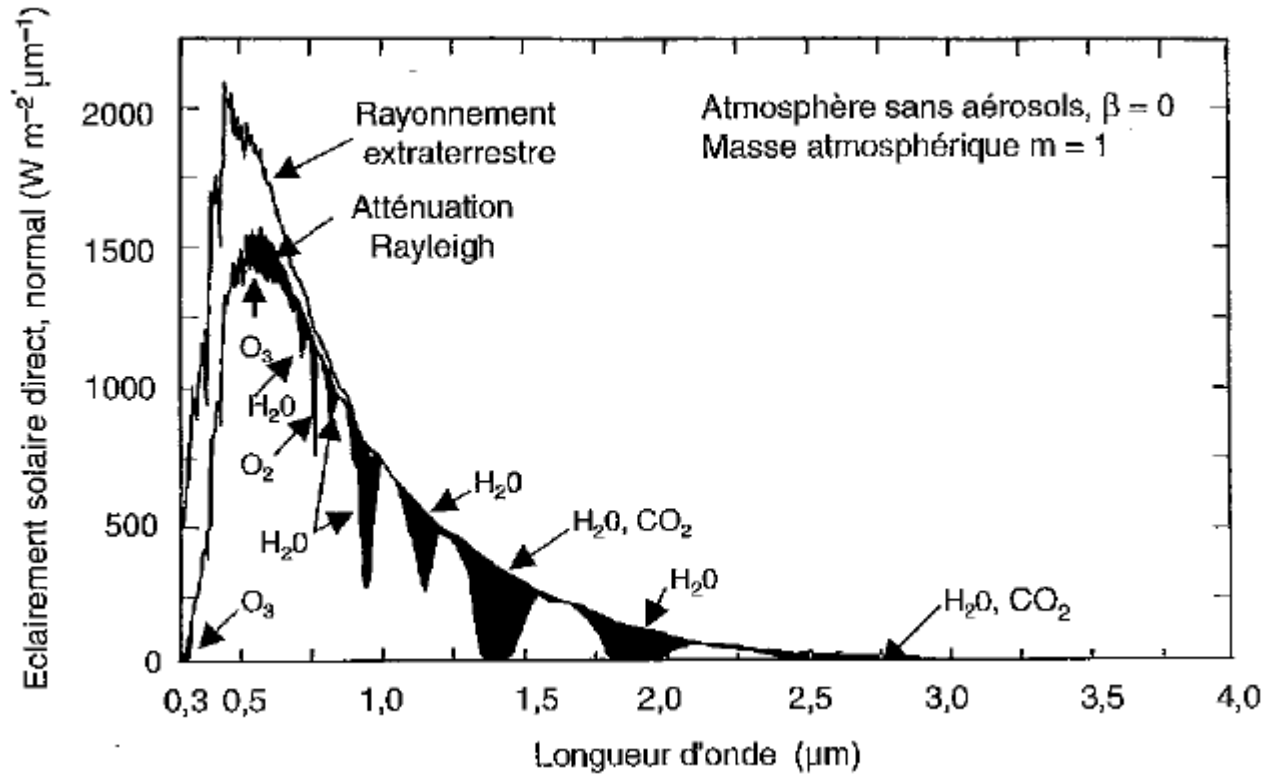
# calcul du rayonnement « ciel clair » $R_{so}$



$$R_{so} = R_a (0.75 + 2 * 10^{-5} z)$$

$R_{so}$  doit être une courbe quasi-enveloppe de  $R_s$  = vérification 2

# Rayonnement Solaire mesuré $R_s$





# bilan radiatif de la feuille

$$R_n = R_{s \downarrow} - R_{s \uparrow} + R_{l \downarrow} - R_{l \uparrow}$$

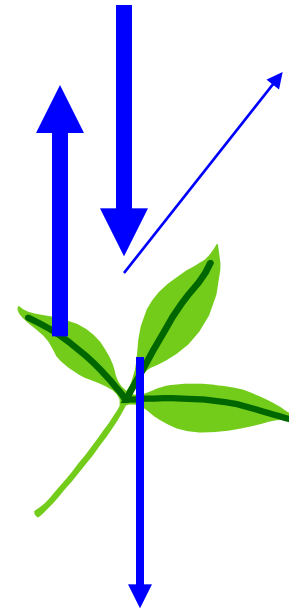
$R_{n_s}$

$R_{n_l}$



Spectre solaire

réflexion  
atténuation  
transmission



Spectre tellurique

# Bilan radiatif

$$Rn = R_s \downarrow - R_s \uparrow + R_l \downarrow - R_l \uparrow = Rn_s + Rn_l \quad [\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1} \text{ ou } \text{h}^{-1}]$$

- Rayonnement solaire réfléchi est une proportion constante (albédo) du rayonnement solaire incident
- On va considérer une surface bien alimentée en eau (cf. diapositive 26), on suppose donc que l'évaporation est suffisamment forte pour que sa température soit basse et proche de la température de l'air:

$$R_s \downarrow - R_s \uparrow = (1 - \alpha)R_s$$

$$\downarrow R_l \downarrow - R_l \uparrow = \varepsilon_s (\varepsilon_a \sigma T_a^4 - \sigma T_s^4) \cong \sigma \varepsilon_s (\varepsilon_a - 1) T_a^4$$

Où  $\varepsilon_s$  et  $\varepsilon_a$  sont les émissivités de la surface et de l'air [-]  
et  $\alpha$  l'albédo de la surface [-]

# évaluation du rayonnement net $R_n$

$$R_{nl} = -\sigma \left[ \frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] \begin{matrix} \text{journalier} \\ T_a^4 \text{ horaire} \end{matrix} \left( (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \right)$$

Négatif = en général, l'atmosphère émet moins que la surface

Dépend de la quantité de vapeur (émetteur près du sol)

Dépend des nuages (émetteurs loin du sol)

$= \varepsilon_s (\varepsilon_a - 1)$

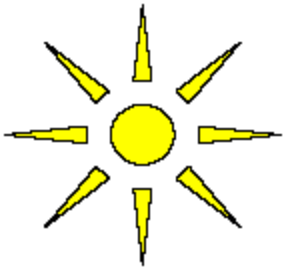
$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

$$R_n = R_{ns} + R_{nl}$$

Où  $e_a$  est la pression partielle de vapeur d'eau (cf. transparent 16)

**Attention dans la méthode FAO conventions de signe**

**différentes pour  $R_{ns}$  et  $R_{nl}$ :  $R_{nl} > 0$  et  $R_n = R_{ns} - R_{nl}$**



$$R_n = H + LE + G$$

Sun  
(Shortwave)  
Radiation

Thermal  
(Longwave)  
Radiation

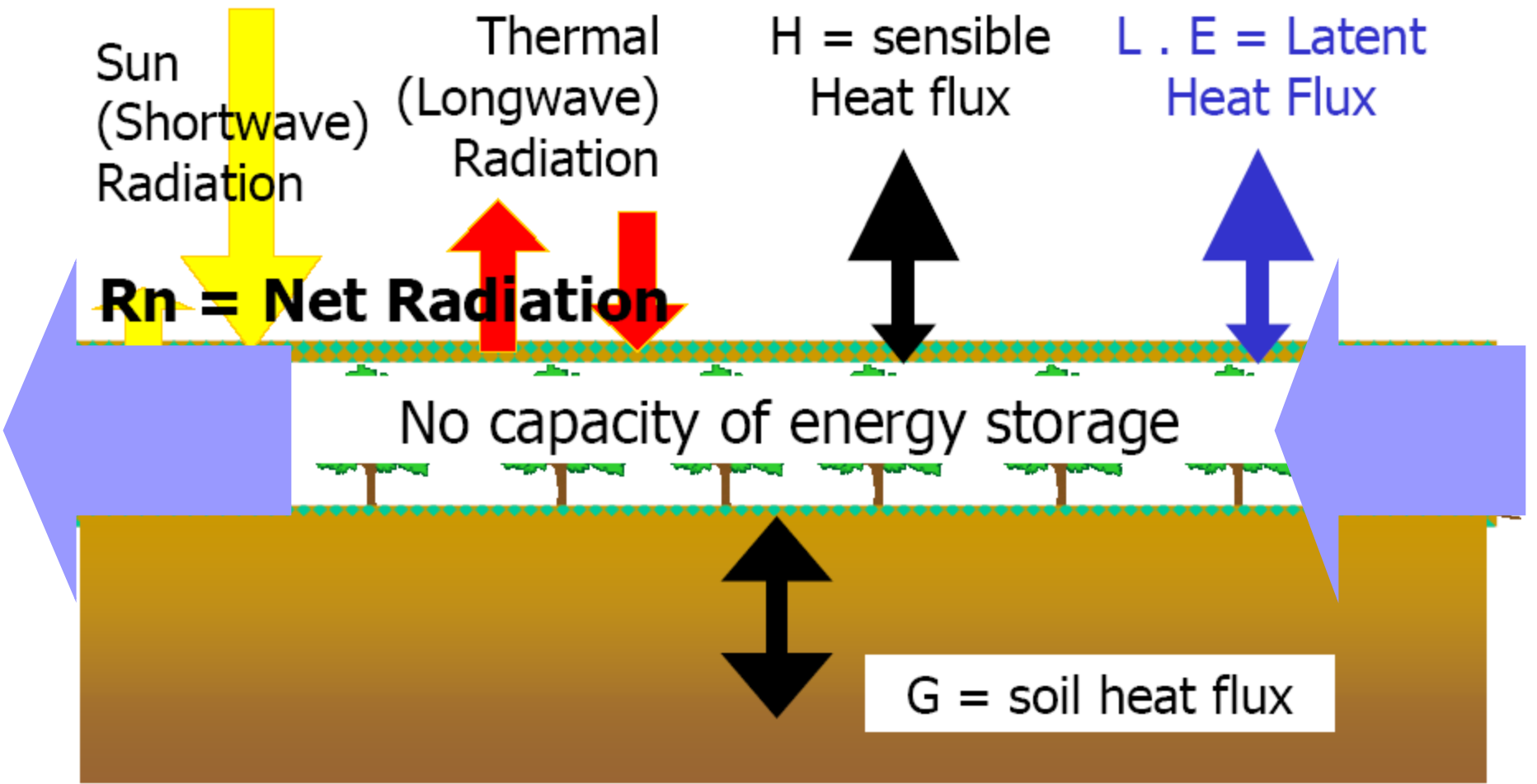
H = sensible  
Heat flux

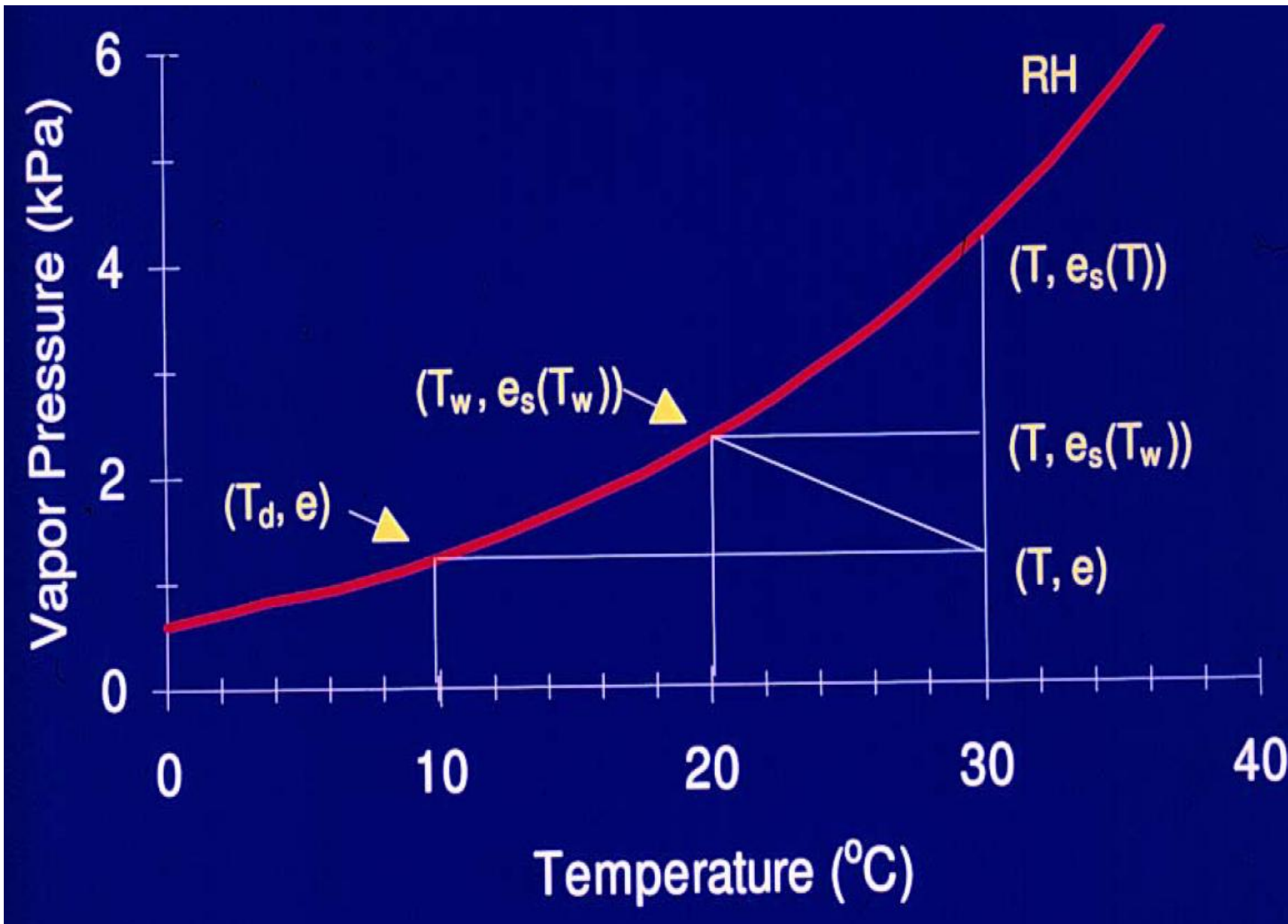
L . E = Latent  
Heat Flux

**$R_n = \text{Net Radiation}$**

No capacity of energy storage

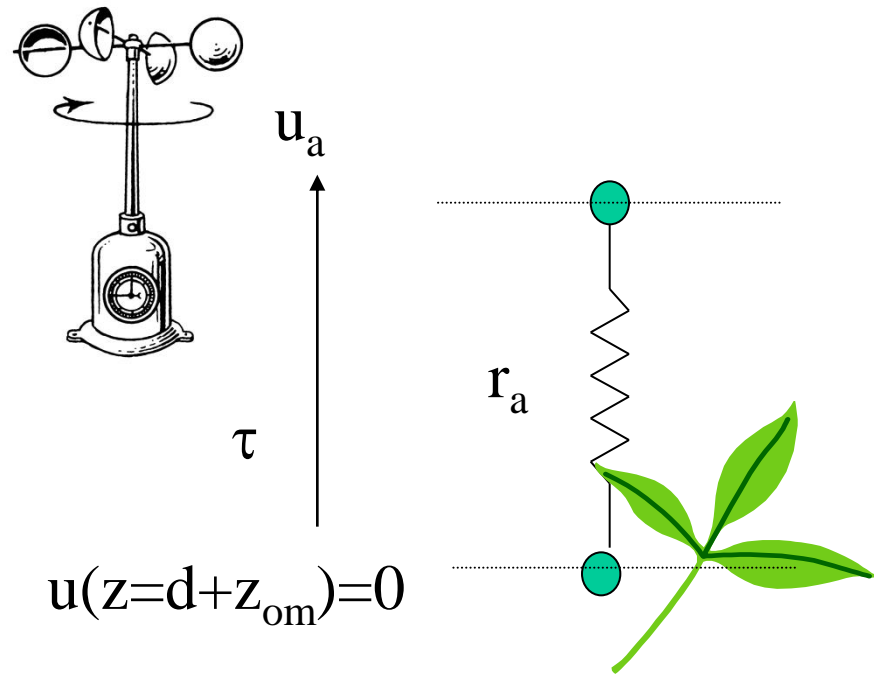
G = soil heat flux





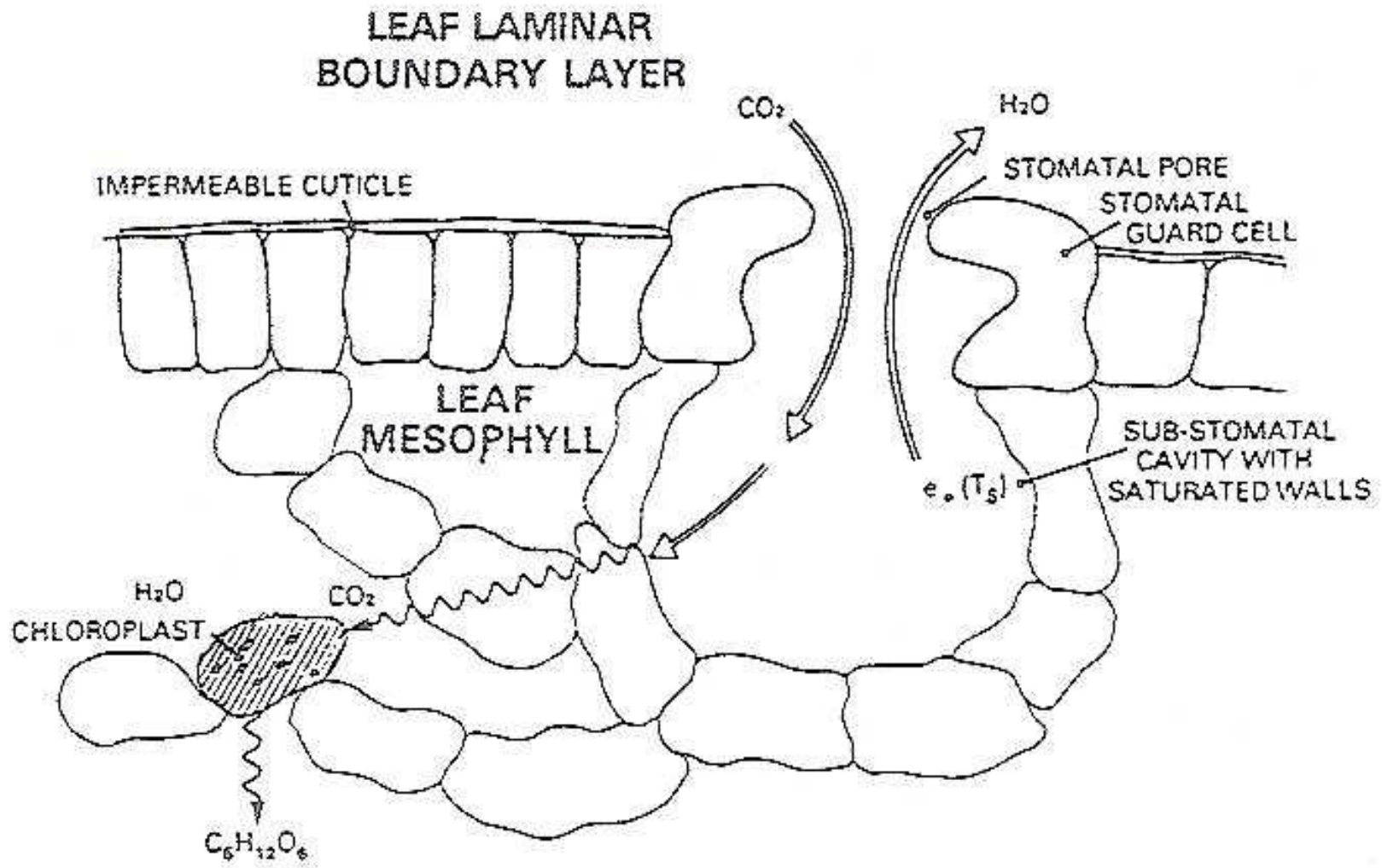


# Analogie électrique: résistance aérodynamique



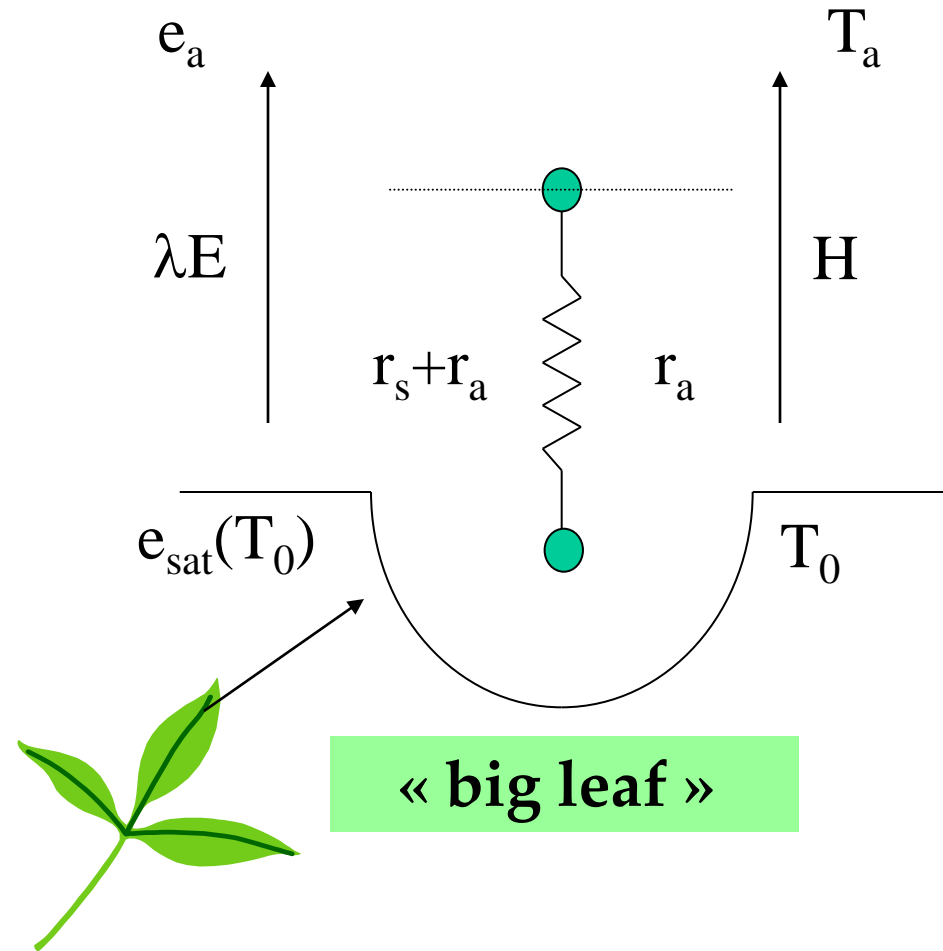
$$i = \frac{U}{R} \Rightarrow \tau = \rho \frac{u_a - u_{z=d+z_{om}}}{r_a} = \rho \frac{u_a}{r_a}$$

# Fonctionnement du stomate



# analogie électrique « big leaf » pour la surface

$$\left\{ \begin{array}{l} i = \frac{U}{R} \Rightarrow \\ H = \rho c_p \frac{T_0 - T_a}{r_a} \\ \lambda E = \frac{\rho c_p}{\gamma} \frac{e_{sat}(T_0) - e_a}{r_a + r_s} \end{array} \right.$$



# Résistances aérodynamique et de surface

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right]}{k^2 u_z}$$

$$r_s = \frac{r_{\text{feuille}}}{0.5LAI}$$

$$d = 2/3 h$$

$$z_{om} = 0.123h$$

$$z_{oh} = z_{om}/10$$

**h hauteur du couvert [m]**

- L'indice de couverture foliaire (Leaf Area Index LAI [ $\text{m}^2\text{m}^{-2}$ ]=[-]) représente la surface foliaire rapportée à la surface de sol unitaire qu'elle recouvre
- Les feuilles actives sont directement soumises au rayonnement solaire (hypothèse FAO = 50% des feuilles)

# évaluation du flux de chaleur G

G horaire simplement exprimé comme une fraction du rayonnement net  $R_n$  dont la valeur dépend de deux périodes jour/nuit:

$$\begin{cases} G = 0.5R_n & R_n \leq 0 & \text{horaire} \\ G = 0.1R_n & R_n > 0 & \text{horaire} \end{cases}$$

$$G \cong 0 \quad \text{journalier}$$

$$G = 0.07(T_{a\_mois\_i+1} - T_{a\_mois\_i-1}) \quad \text{mensuel}$$



$$Rn - G = H + \lambda E$$

$$H = \rho c_p \frac{T_0 - T_a}{r_a}$$

$$\lambda E = \frac{\rho c_p}{\gamma} \frac{e_{sat}(T_0) - e_a}{r_a + r_s}$$

$$e_{sat}(T_0) \cong e_{sat}(T_a) + \Delta(T_0 - T_a)$$

$$\lambda E \cong \frac{\rho c_p}{\gamma} \frac{e_{sat}(T_a) - e_a + \Delta(T_0 - T_a)}{r_a + r_s}$$

$$T_0 - T_a = \frac{H}{\rho c_p} r_a = \frac{Rn - G - \lambda E}{\rho c_p} r_a$$

$$\Rightarrow \lambda E \cong \frac{\rho c_p}{\gamma} \frac{e_{sat}(T_a) - e_a + \Delta \frac{Rn - G - \lambda E}{\rho c_p} r_a}{r_a + r_s}$$

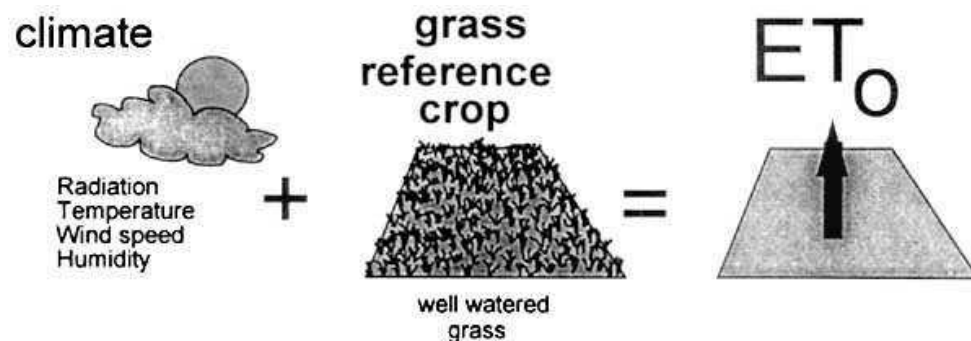
# La formulation de Penman-Monteith

- si l'on linéarise le bilan d'énergie selon la température de la surface, et après résolution, on obtient une formule simple (Penman-Monteith):

$$\lambda E = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho c_p (e_{sat}(T_a) - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s / r_a)}$$

# Qu'est-ce que l'évapotranspiration de référence ?

- L'évapotranspiration de référence est l'évapotranspiration d'une surface de référence, bien alimentée en eau
- Le couvert de référence est exempt de maladie, cultivé dans des champs de large superficie, dans des conditions de sol optimales, possédant un rendement maximal dans les conditions climatiques existantes
- Elle permet d'éviter de définir une évapotranspiration pour chaque culture, chaque état phénologique, chaque état de stress
- Elle rassemble en fait tous les contrôles climatiques de l'évapotranspiration; c'est **un paramètre climatique**



# Qu'est-ce qu'un couvert de référence ?

« une culture de référence hypothétique avec une hauteur de couvert supposée de 0.12m, une résistance de surface fixe de 70 s/m et un albedo de 0.23 »

Elle correspond à un gazon homogène en phase active de croissance, bien alimenté en eau et couvrant totalement le sol



# Vent à 2 m en fonction de vitesse à z m

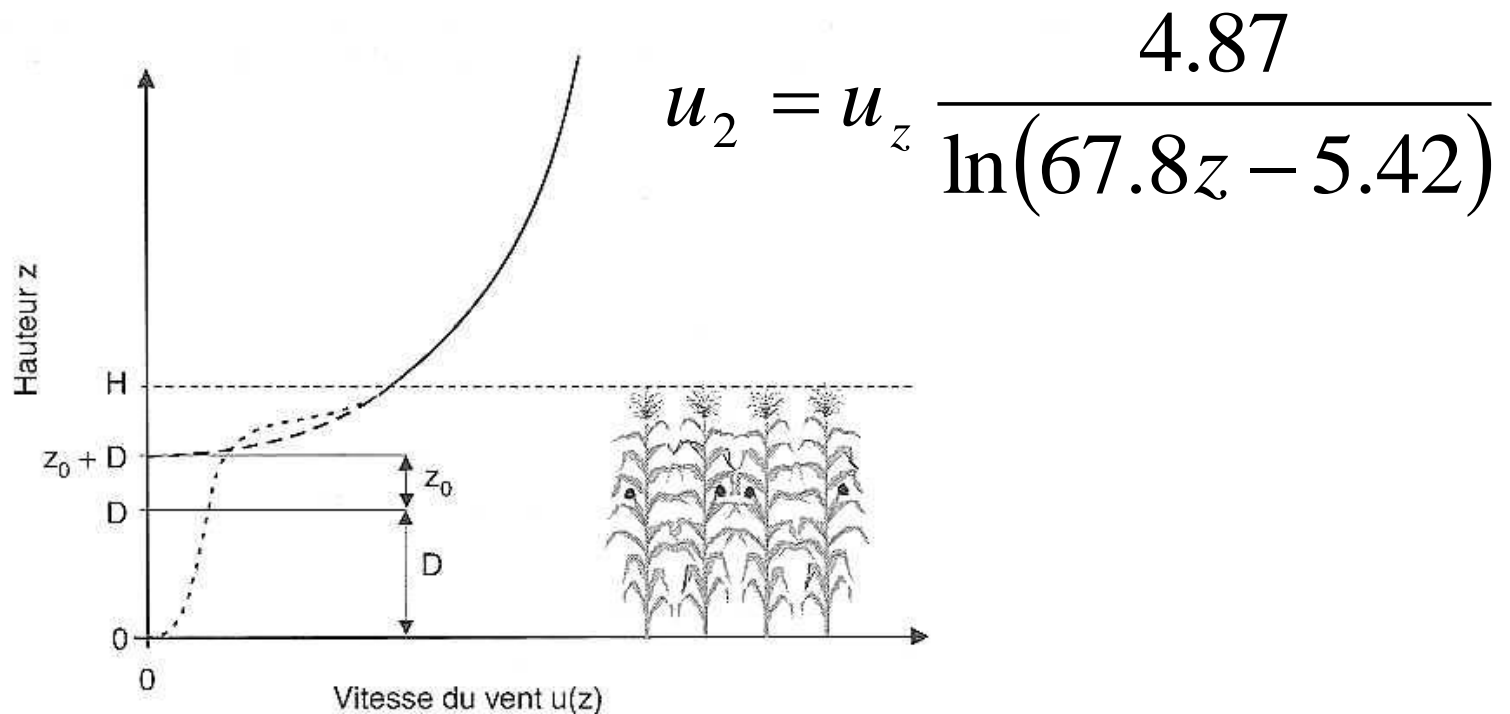


Figure 2.14 Profil vertical de vitesse du vent au-dessus d'un couvert végétal élevé.

# Résistances aérodynamique et de surface

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right]}{k^2 u_z}$$

$$r_s = \frac{r_{feuille}}{0.5LAI}$$

$$d = 2/3 h$$

$$z_{om} = 0.123h$$

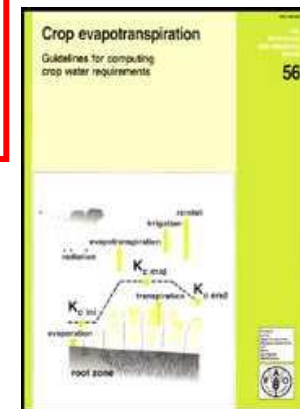
$$z_{oh} = z_{om}/10$$

$$LAI = 24h$$

$$r_{feuille} = 100 \text{ s/m}$$

Si  $h=0.12$  m, et puisque  $k=0.41$ :

$$r_s = 70 \text{ et } r_a = \frac{208}{u_2} \text{ [s/m]}$$



Soit la FORMULE d'ET0 suivante

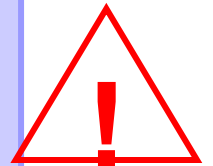
$$ET0 = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{Cste1}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + Cste2 u_2)} \quad \begin{array}{l} [\text{mm d}^{-1}] \\ \text{ou} \\ [\text{mm h}^{-1}] \end{array}$$

Rn et G en [MJm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> ou h<sup>-1</sup>]  
 T en [°C] et u<sub>2</sub> en [ms<sup>-1</sup>]  
 e<sub>s</sub> et e<sub>a</sub> en [kPa]  
 Δ en [kPa°C<sup>-1</sup>]  
 γ en [kPa°C<sup>-1</sup>]

**Forçage météorologique**

dérivées du forçage atmosphérique

Cste1=900 *journalier*  
 Cste1=37 *horaire*  
 Cste2=0.34 *journalier*  
 Cste2=0.24 *horaire*



# ET<sub>0</sub> [mm/j] à Marrakech en 2003

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
<b>2</b>	<b>2.8</b>	<b>3.8</b>	<b>4.5</b>	<b>5.3</b>	<b>5.9</b>
Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
<b>7</b>	<b>6.8</b>	<b>5.3</b>	<b>3.8</b>	<b>2.4</b>	<b>1.9</b>





# Application !



# Calcul des facteurs météorologiques

$$\gamma \cong 0.665 * 10^{-3} P$$

$$\Delta = \frac{4098e_{sat}(T)}{(T + 237.3)^2}$$

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26}$$

$$e_{sat}(T) = 0.6108e^{\left( \frac{17.27T}{T+237.3} \right)}$$

P pression atmosphérique [kPa]  
z altitude [m]

# facteurs météorologiques suite

$$e_s = \frac{e_{sat}(T_{\max}) + e_{sat}(T_{\min})}{2} \quad \textit{journalier}$$

$$e_s = e_{sat}(T_a) \quad \textit{horaire}$$

$$e_a = \frac{\frac{RH_{\min}}{100} e_{sat}(T_{\max}) + \frac{RH_{\max}}{100} e_{sat}(T_{\min})}{2} \quad \textit{journalier}$$

$$e_a = \frac{RH}{100} e_{sat}(T_a) \quad \textit{horaire}$$

$$\Delta = \Delta(T_{a,moy}) \quad \textit{journalier}$$

$$\Delta = \Delta(T_a) \quad \textit{horaire}$$