

Bilans énergétiques et échanges végétation-atmosphère

Jean-François CASTELL – AgroParisTech - Département SIAFEE
jean_francois.castell@agroparistech.fr

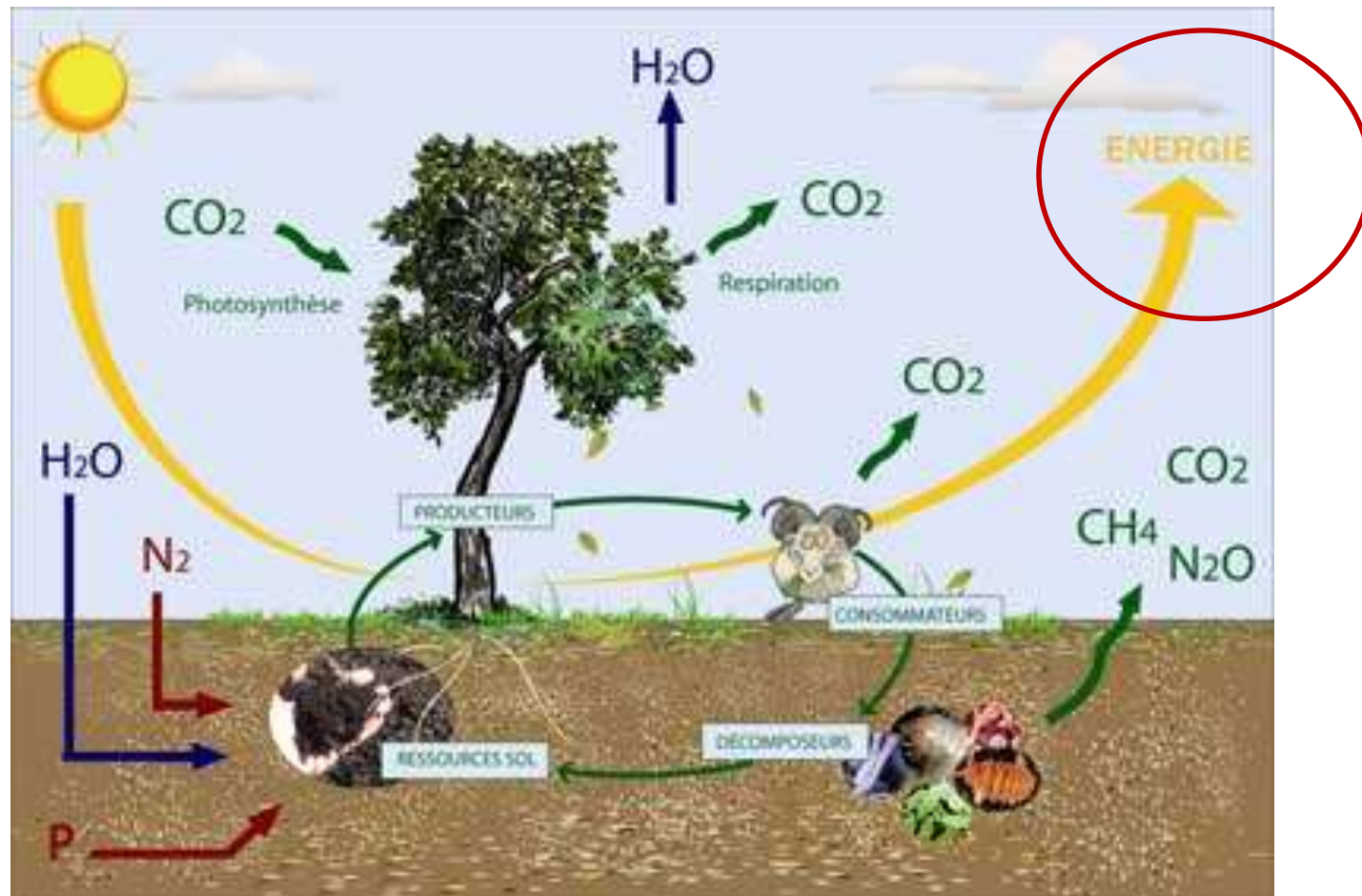
Bilans énergétiques et échanges végétation-atmosphère

Objectifs pédagogiques :

- 1. Comprendre les liens entre les processus physiques et biologiques qui régissent les échanges végétation-atmosphère**
- 2. Connaître les termes des bilans radiatif et énergétique d'une surface de végétation**
- 3. Comprendre les liens entre le bilan d'énergie et le bilan hydrique**
- 4. Comprendre le déterminisme de la température d'une surface de végétation**

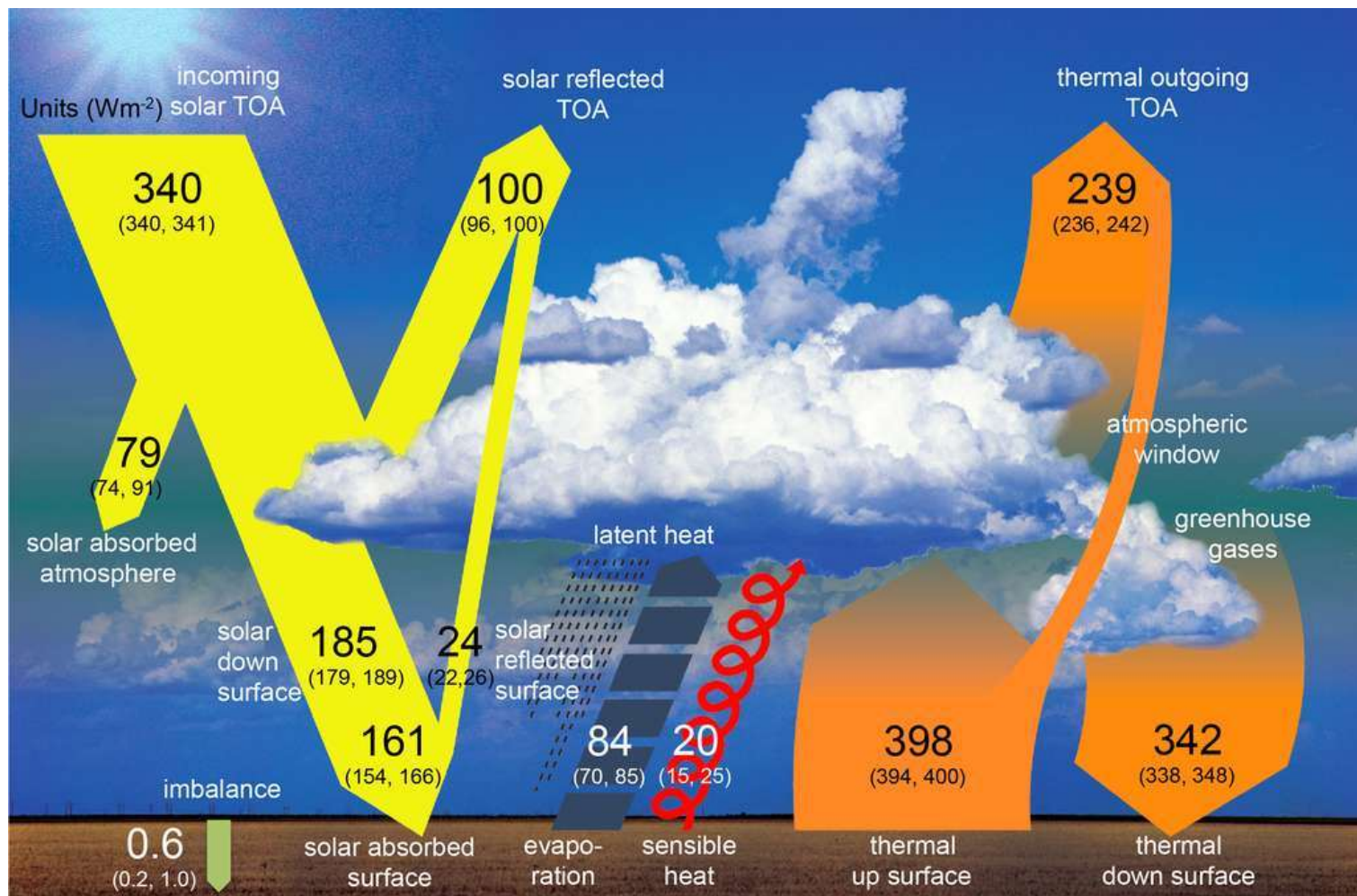
INTRODUCTION

Introduction : les échanges végétation-atmosphère



Flux de matière et d'énergie à l'échelle de l'écosystème

Introduction : les échanges végétation-atmosphère



Flux de matière et d'énergie à l'échelle globale

Y. Foucart, 2015. <http://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-tout-savoir-effet-serre-1954/page/6/>

Introduction : Des applications nombreuses

En agriculture :

- Gestion de l'eau
- Prévion de la production (quantité & qualité)
- Modélisation des épidémies
- Aménagement (brise-vent)
- Protection contre le gel

En écologie

Echanges de carbone et d'azote des écosystèmes

En météorologie & climatologie

Mesure et modélisation des flux d'énergie de surface
Echanges de gaz à effet de serre entre écosystèmes et atmosphère

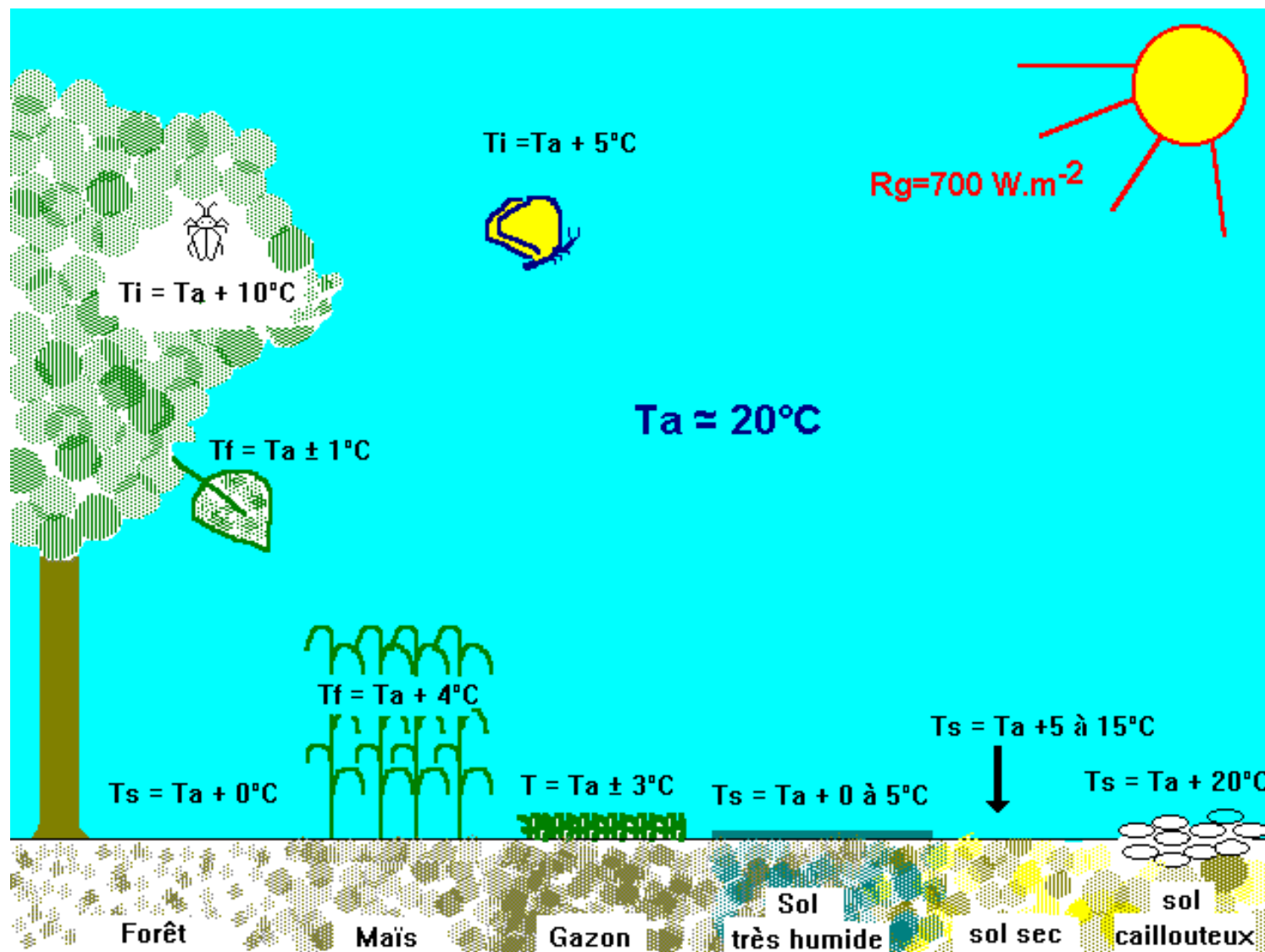
En chimie atmosphérique

Emissions biogéniques & dépôts de polluants

En hydrologie

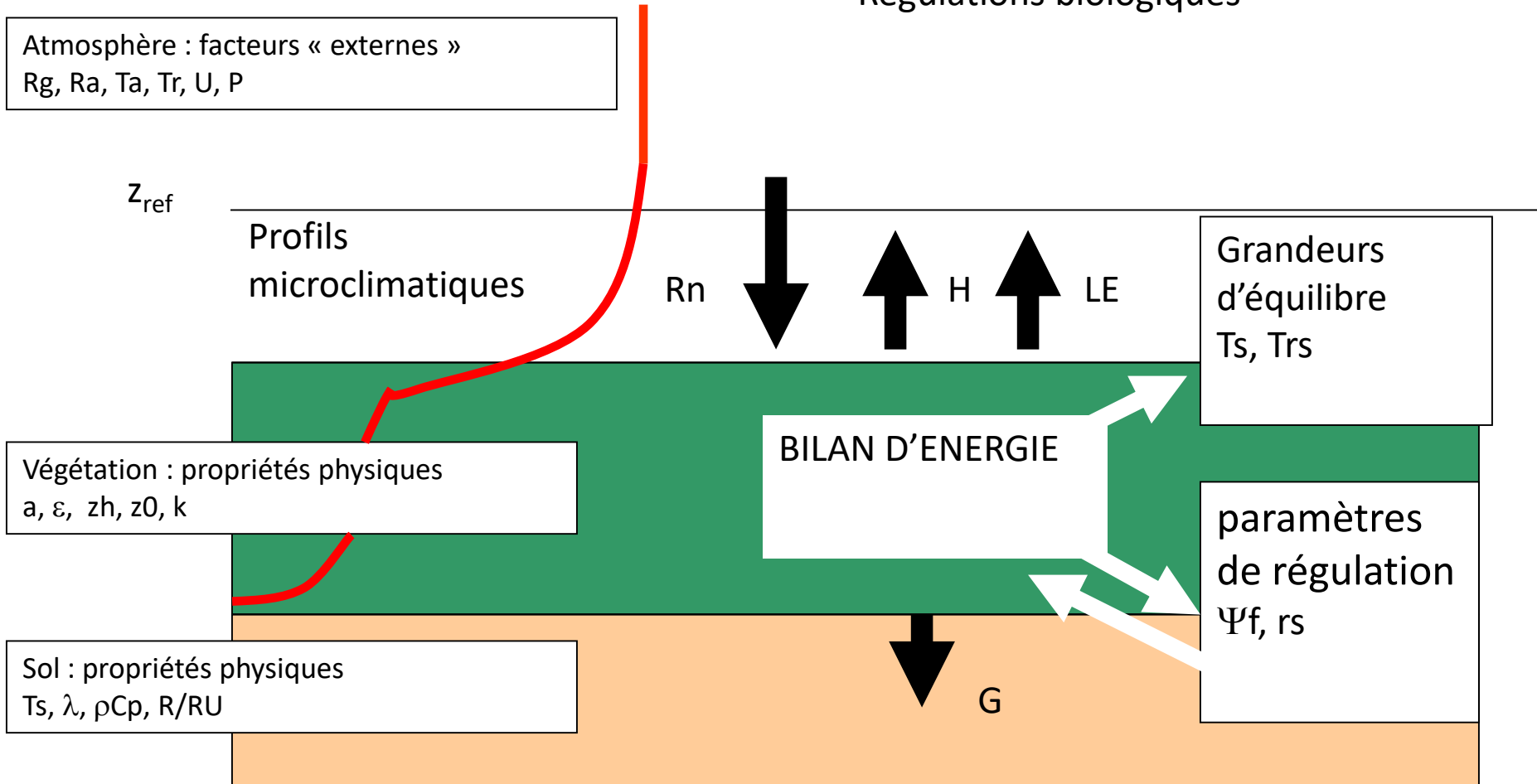
Evaporation et bilan hydrique

Introduction : Bilan énergétique



Introduction : Bilan énergétique

- Flux de masse et d'énergie
- Grandeurs d'équilibre
- Régulations biologiques



Introduction : Bilan énergétique d'une surface

$$\Sigma F_e - \Sigma F_s = \Delta S_t$$

Diagram illustrating the energy balance equation:

- ΣF_e : somme des flux entrants (sum of incoming fluxes)
- ΣF_s : somme des flux sortants (sum of outgoing fluxes)
- ΔS_t : variation du terme de stockage (variation of the storage term)

Peut s'appliquer à toutes les échelles d'espace et toutes les échelles de temps



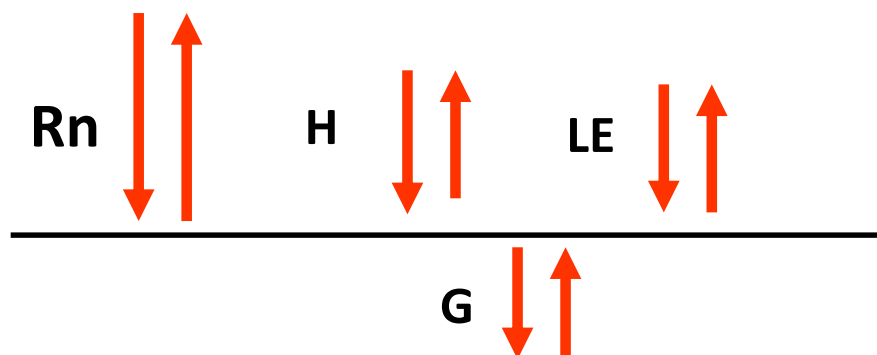
LES TERMES DU BILAN D'ENERGIE

Réaliser un bilan énergétique consiste à faire la somme des flux responsables du gain ou de la perte d'énergie d'une surface :

$$R_n + G + H + LE = 0$$

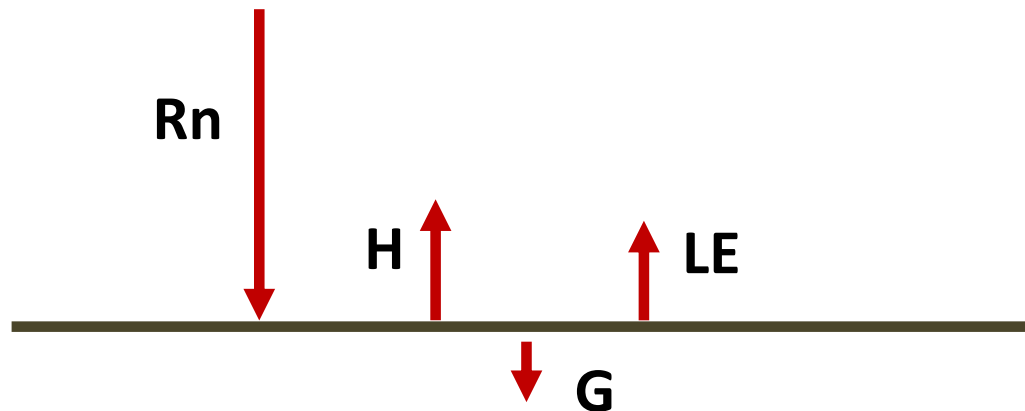
- Flux radiatifs (R_n)
- Flux convectifs (H , LE)
- Flux conductifs (G)

- La somme n'est pas toujours nulle (forêts)
- d'autres flux existent mais peuvent être négligés (photosynthèse)



De jour, quand la végétation est active et bien pourvue en eau :

$$R_n = H + LE + G$$



Les flux s'expriment en W.m^{-2}
($\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

Le terme radiatif : Rn

Quelques notions d'électromagnétisme (1) :

Tout corps à température > 0 absolu émet un rayonnement
(ondes/photons).

Energie des photons (loi de Planck):

$$E = h \nu = h c / \lambda$$

h : constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J s)

c : vitesse de la lumière ($\sim 300\,000$ km/s)

λ : longueur d'onde (m)

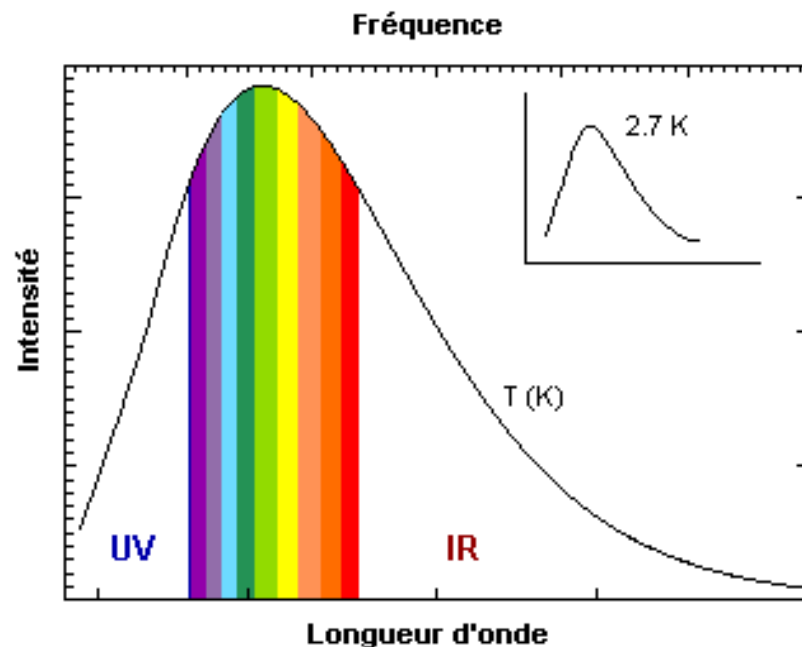
ν : fréquence (1/s ou Hz)

Le terme radiatif : Rn

Quelques notions d'électromagnétisme (2) :

Spectre (loi de Planck; corps noir)
$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)}$$

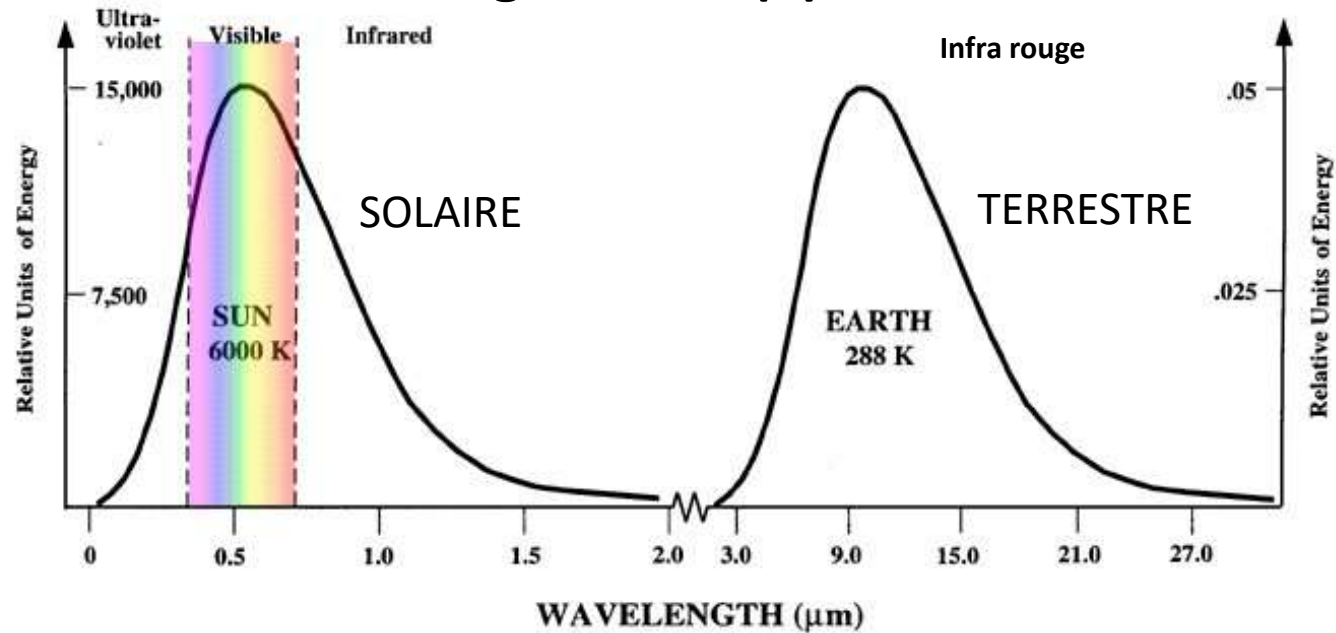
(k: constante de Boltzmann: $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)



Spectre théorique du soleil ($\sim 6000 \text{ K}$)

Le terme radiatif : Rn

Quelques notions d'électromagnétisme (3) :



Comparison of the emission spectra of the sun and the earth. Note the huge disparity in the amount of energy emitted by the sun (left-hand scale) and the earth (right-hand scale).

Loi de Wien pour le pic d'émission: $\lambda_{\max} = 2897 / T$ (μm)

Loi de Stefan-Boltzmann pour l'énergie totale émise (aire sous la courbe):

$E = \varepsilon \sigma T^4$ (W m⁻²); ε : émissivité (1 pour un corps noir)

σ : constante de Stefan-Boltzmann: $5,67 \cdot 10^{-8}$ W m⁻² K⁻⁴

Le terme radiatif : R_n

Rayonnement solaire (R_g):

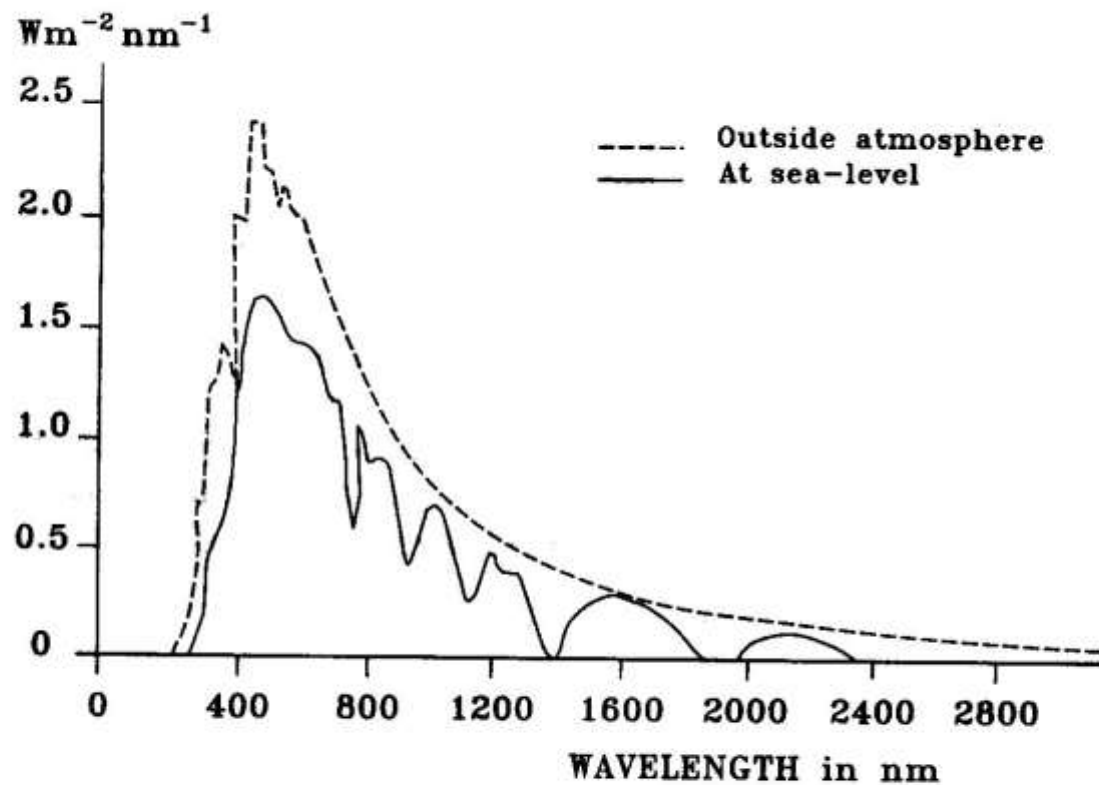


Figure 3. Spectral distribution of the extraterrestrial solar radiation and of the solar radiation at the sea-level (re-drawn from WMO, 1981).

Le terme radiatif : R_n

Rayonnement solaire (R_g):

À l'extérieur de l'atmosphère :

$$R_{g_0} = I_0 \sin h$$

I_0 = constante solaire ($\sim 1370 \text{ W.m}^{-2}$)

$$\sin h = \sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos t$$

λ = latitude (angle entre le plan de l'équateur et la verticale du lieu)

δ = déclinaison (angle entre la direction du soleil et le plan de l'équateur)

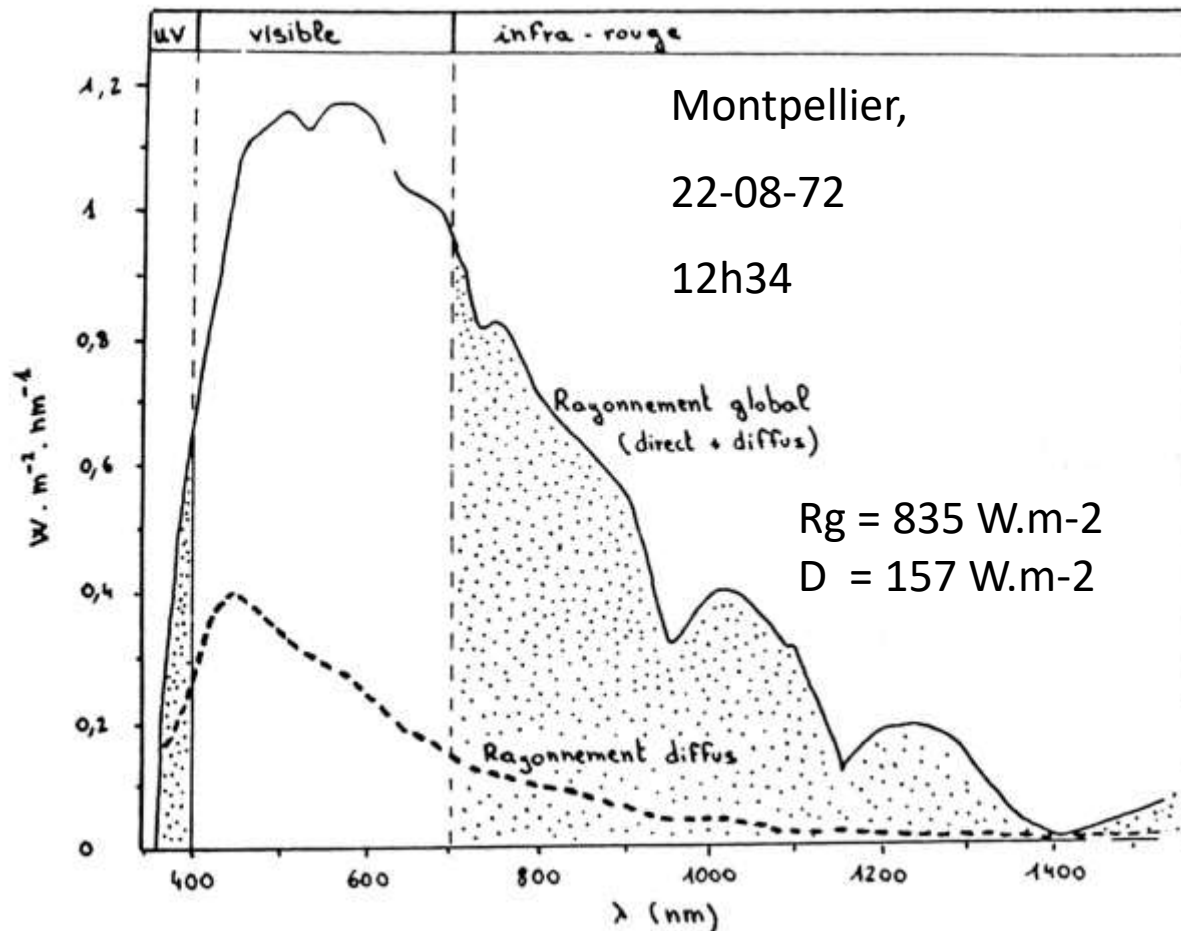
t = angle horaire

$$t = |h_s - 12| \cdot (360/24)$$

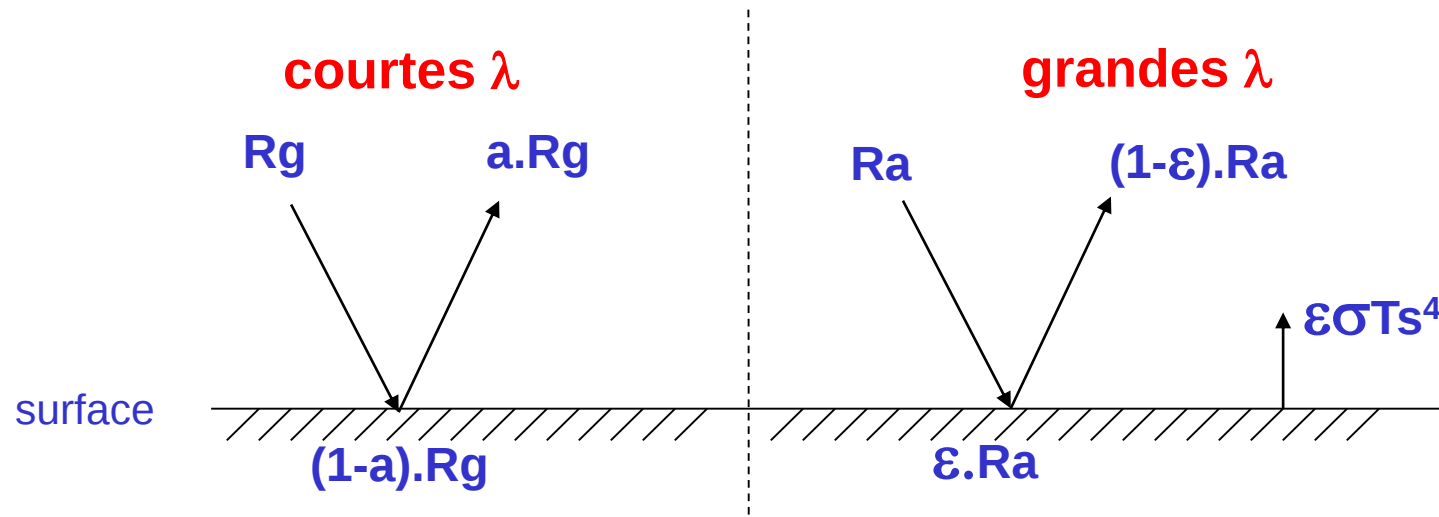
Le terme radiatif : R_n

Rayonnement solaire (R_g):

R_g = Rayonnement solaire direct + rayonnement diffus



Le terme radiatif : R_n

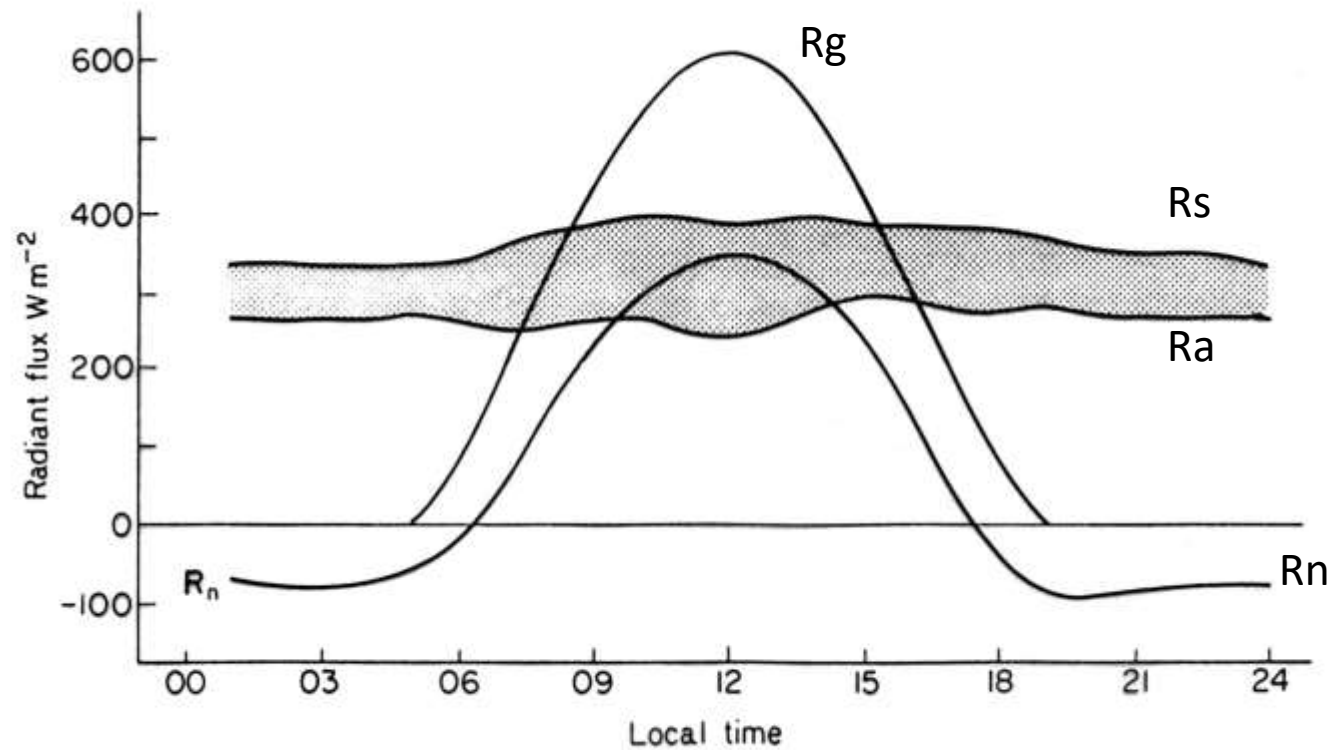


Rayonnement net :

$$R_n = (1-a).R_g + \epsilon (R_a - \sigma T_s^4)$$

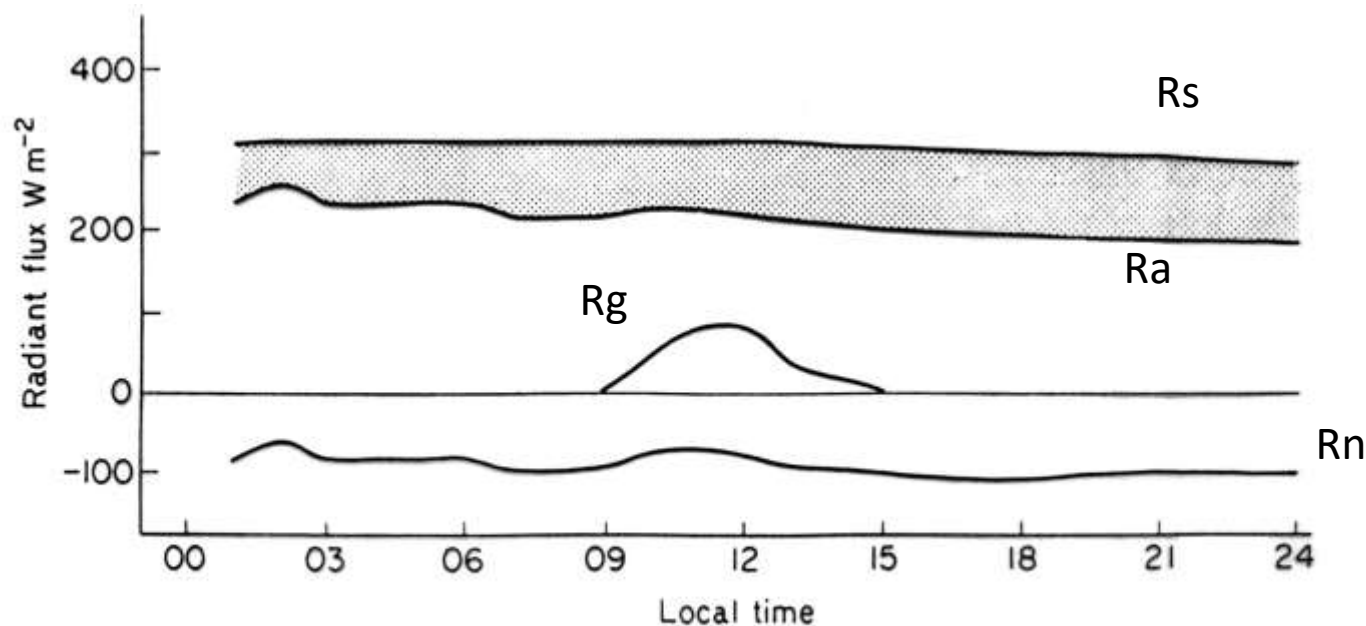
ϵ : émissivité du sol (proche de 1)

Le terme radiatif : R_n



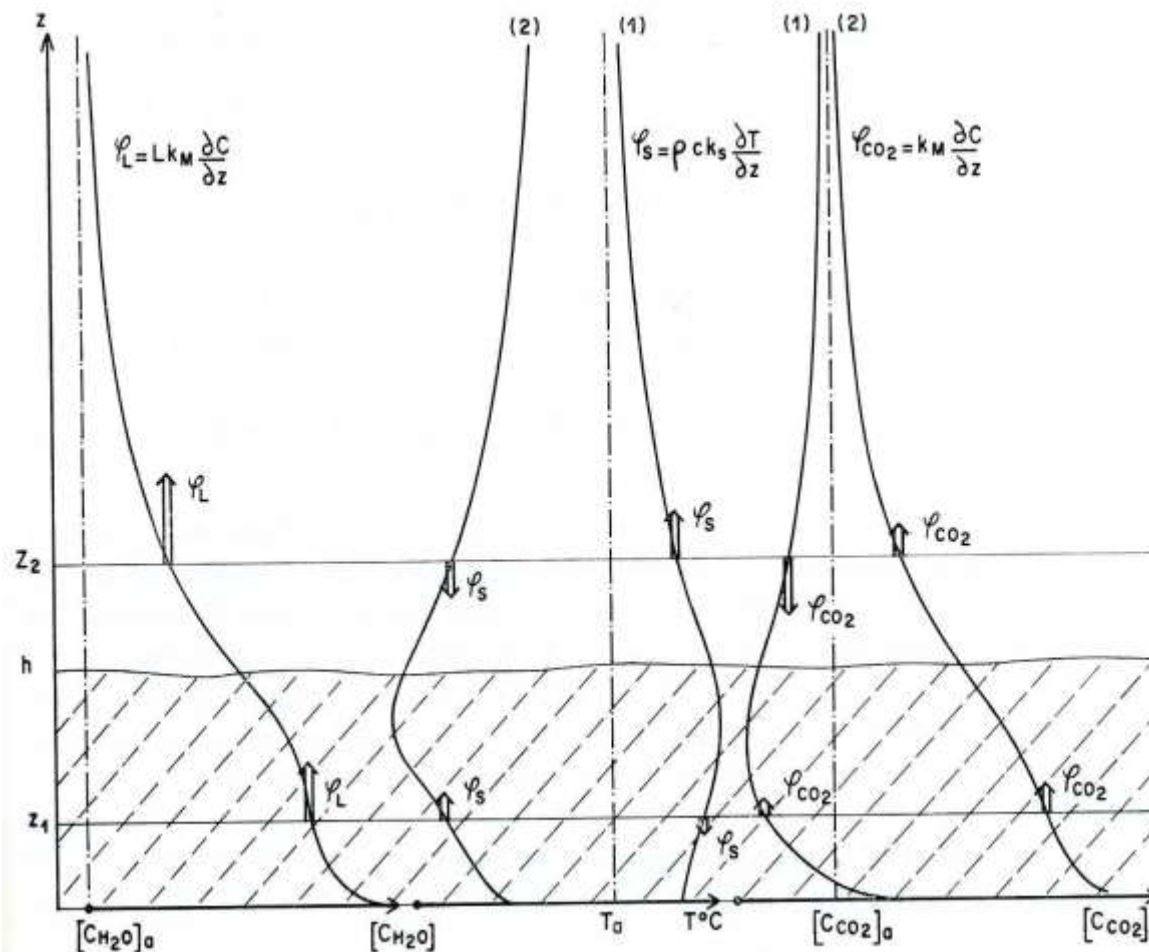
Mesures du rayonnement net et de ses composantes à
Bergen, Norvège – 13 avril 1968 (Monteith & Unsworth, 1990)

Les termes convectifs : H et LE



Mesures du rayonnement net et de ses composantes à
Bergen, Norvège – 11 janvier 1968 (Monteith & Unsworth, 1990)

Les termes convectifs : H et LE



Profils de température, concentrations en CO_2 et vapeur d'eau au-dessus d'un couvert végétal de hauteur h (Hallaire et al., 1970).

Le terme 'convection' recouvre en fait des phénomènes de **diffusion** (liée à un gradient de concentration) et de **transport** par un fluide en mouvement (l'air qui s'écoule au-dessus du couvert).

Les termes convectifs : H et LE

Expression de H et L E

$$H = - \rho C_p D \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$L E = - L D \frac{\partial \rho_w}{\partial z}$$

H: flux de chaleur sensible en $W m^{-2}$

ρ : masse volumique de l'air ($1,16 kg m^{-3}$ à $20 ^\circ C$)

C_p : capacité calorifique à pression constante ($1005 J kg^{-1} K^{-1}$ à 1 atm)

L: chaleur latente de vaporisation de l'eau ($2,5 MJ kg^{-1}$ à $0^\circ C$)

ρ_w : concentration en vapeur d'eau dans l'air ($kg eau m^{-3} air$)

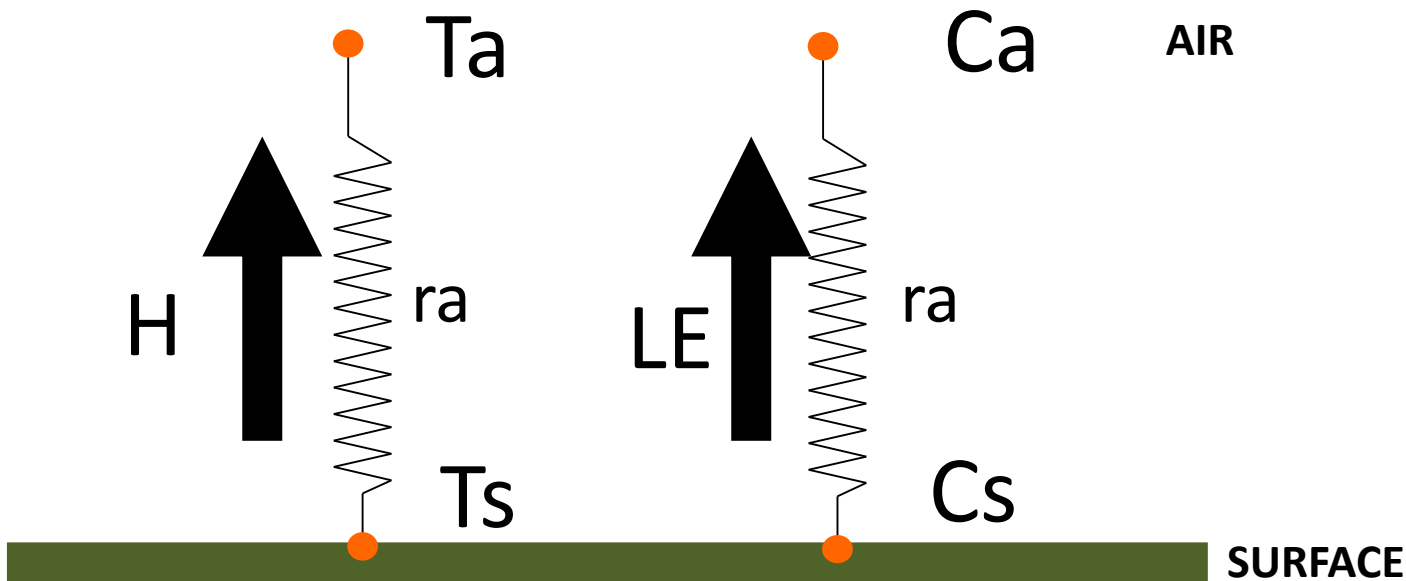
D: coefficient de diffusion ($m^2 s^{-1}$)

E : flux d'évaporation de l'eau ($kg eau m^{-2} s^{-1}$)

Les termes convectifs : H et LE

Expression de H et L E

Relation flux-gradient (hypothèse d'un flux constant dans la couche limite) :



$$H = \frac{\rho C_p (T_a - T_s)}{r_a}$$

$$LE = \frac{L (C_a - C_s)}{r_a}$$

Expression du flux de chaleur latente :

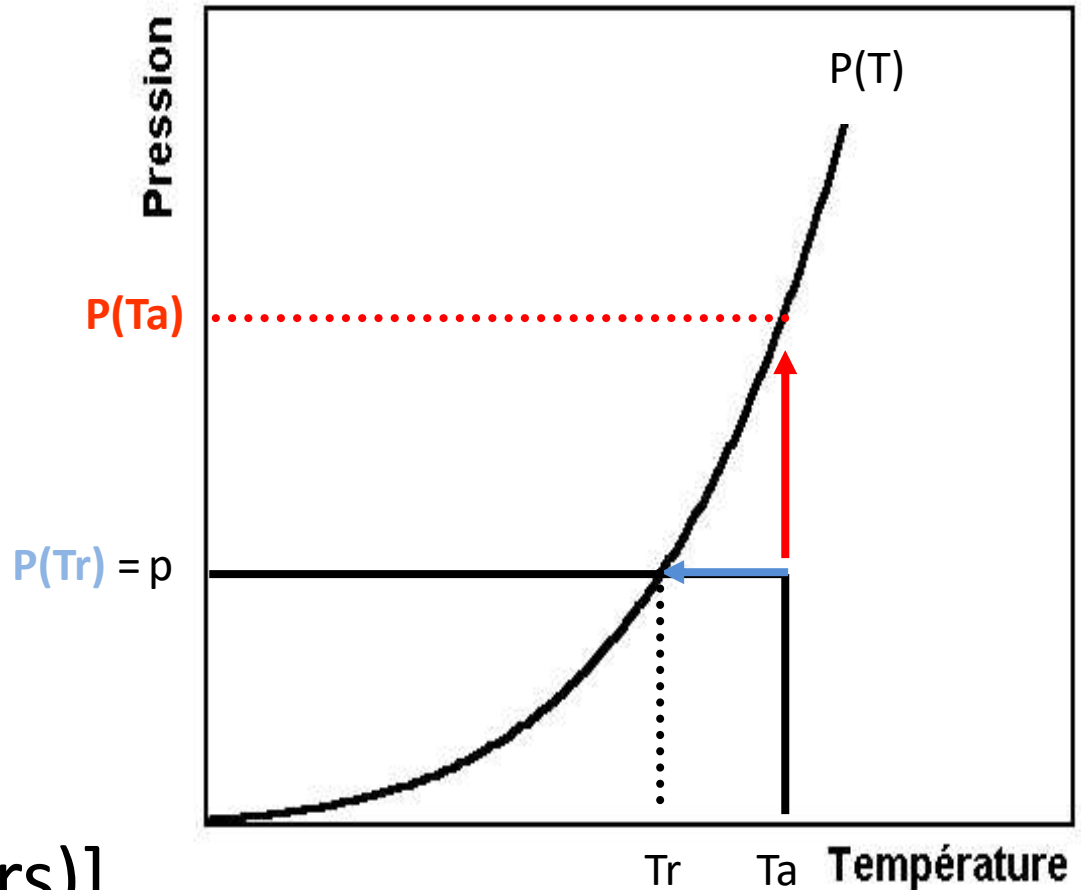
$$LE = \frac{L (Ca - Cs)}{ra}$$

$$Hr = \frac{P(Tr)}{P(Ta)}$$

$$Da = P(Ta) - P(Tr)$$

$$Ca = \frac{M}{RT} P(Tr)$$

$$LE = \frac{L M}{RT} \frac{[P(Tr_a) - P(Tr_s)]}{ra}$$



Le flux de chaleur dans le sol (G)

$$G = \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right)_0$$

Terme souvent faible par rapport aux autres à l'échelle du cycle quotidien. Important pour l'analyse des phénomènes nocturnes

G représente 5 à 10% du rayonnement net sous couvert, et 10 à 40% en sol nu.

APPLICATIONS DU BILAN D'ENERGIE

Application : le rapport de Bowen

$$R_n + G + H + LE = 0$$

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{\frac{\rho C_p (T_a - T_s)}{r_a}}{\frac{L M}{RT} \frac{[P(T_{ra}) - P(T_{rs})]}{r_a}}$$

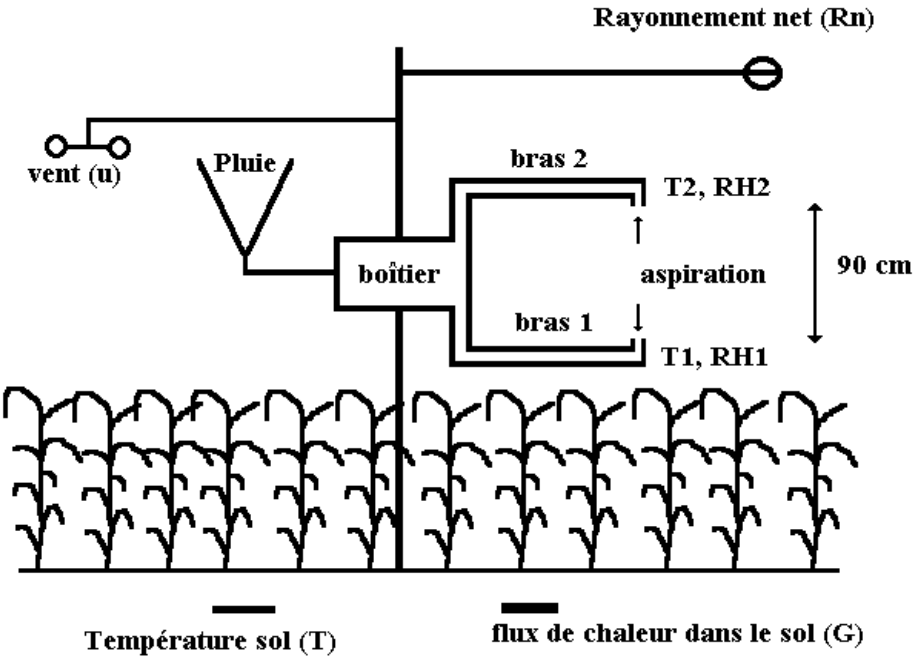
$$\beta = \gamma \frac{(T_a - T_s)}{[P(T_{ra}) - P(T_{rs})]}$$

γ = constante psychrométrique :

$$LE = \frac{-(R_n + G)}{(1 + \beta)}$$

$$\gamma = \frac{\rho C_p}{\frac{L M}{RT}} = 66 \text{ Pa.K}^{-1} \text{ à } 20^\circ\text{C}$$

Application : le rapport de Bowen



Station « AgroClim »



Système BEARN

Application : le psychromètre

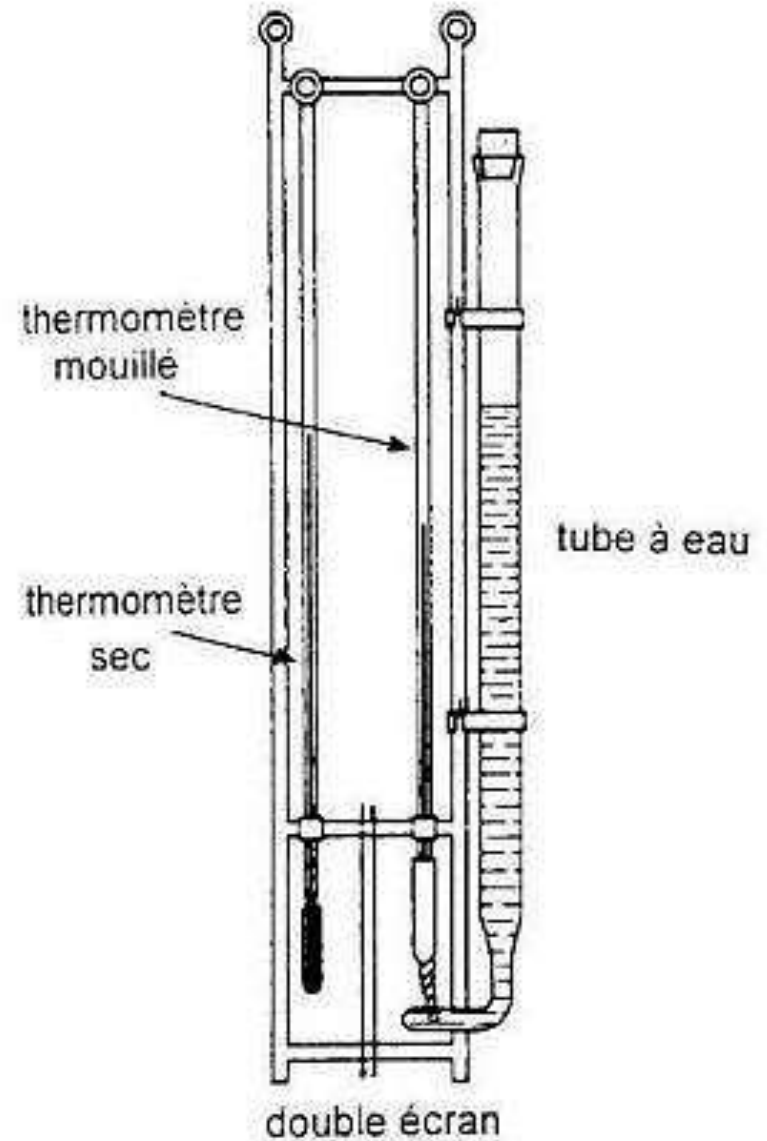
Mesure de deux températures :

Ta (Thermomètre sec)

Th (thermomètre mouillé)

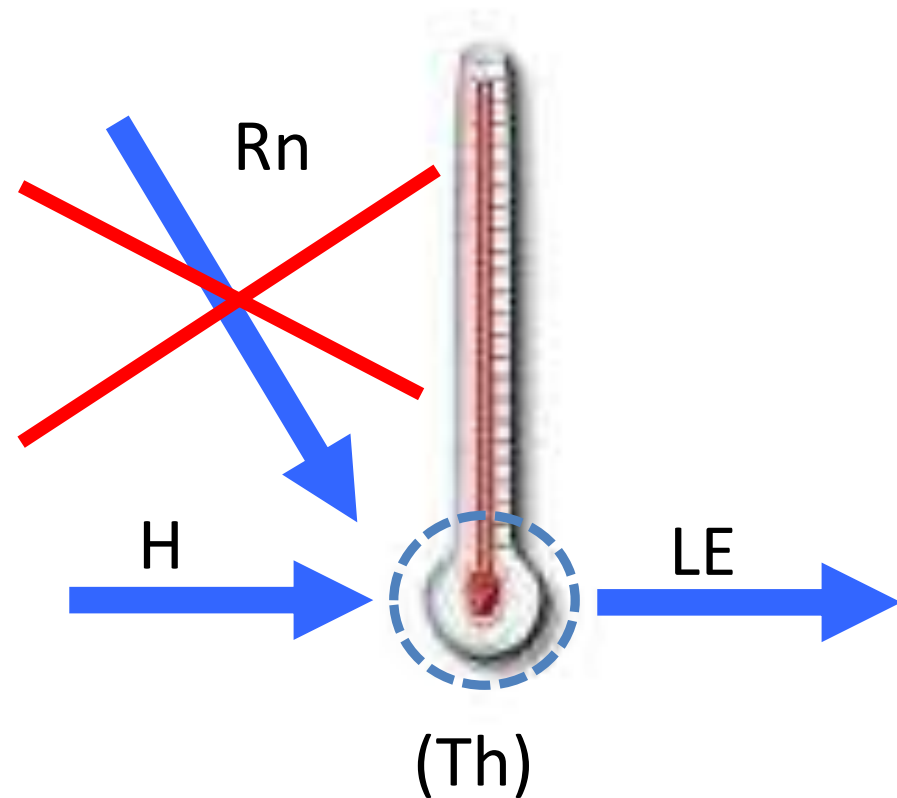


Météo France



Application : le psychromètre

Bilan d'énergie du thermomètre mouillé :



$$H + LE = 0$$

$$\frac{\rho C_p (T_a - T_h)}{r_a} = (LM/RT) \frac{[P(T_{r_a}) - P(T_h)]}{r_a}$$

$$\gamma (T_a - T_h) = P(T_{r_a}) - P(T_h)$$

$$P(T_{r_a}) = P(T_h) + \gamma (T_a - T_h)$$

DETERMINISME DE LA TEMPERATURE DE SURFACE

Le déterminisme de la température de surface :

Quelles valeurs peuvent prendre l'humidité et la température d'une surface de végétation dans un environnement climatique donné ?

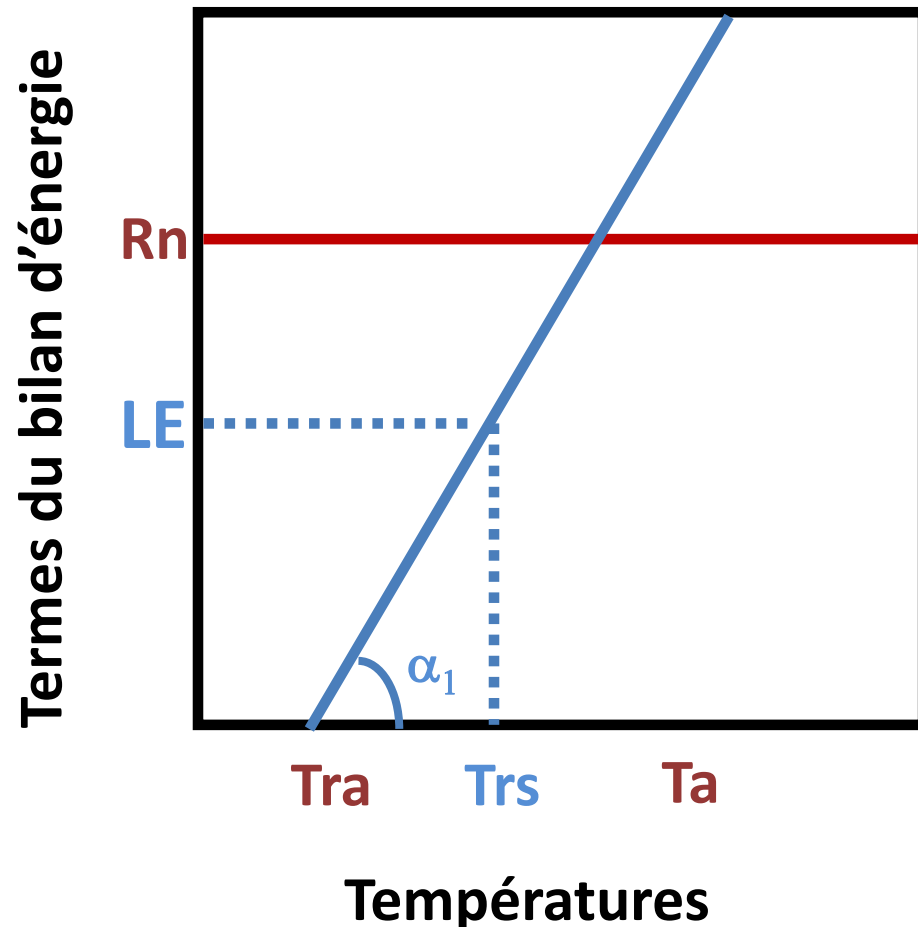
Grandeurs imposées par le climat :

- Rayonnement net : R_n
- Température et Humidité de l'air (T_a , T_{ra})
- Vitesse du vent (v_a)

Dans ces conditions, quelle sont les gammes de variation de la température et de l'humidité de la surface (T_s et T_{rs}) ?

Le déterminisme de la température de surface :

1. Expression de l'évaporation en fonction de **Tra** et **Trs** :



$$LE = \frac{(LM/RT)}{ra} [P(Tr_a)-P(Tr_s)]$$

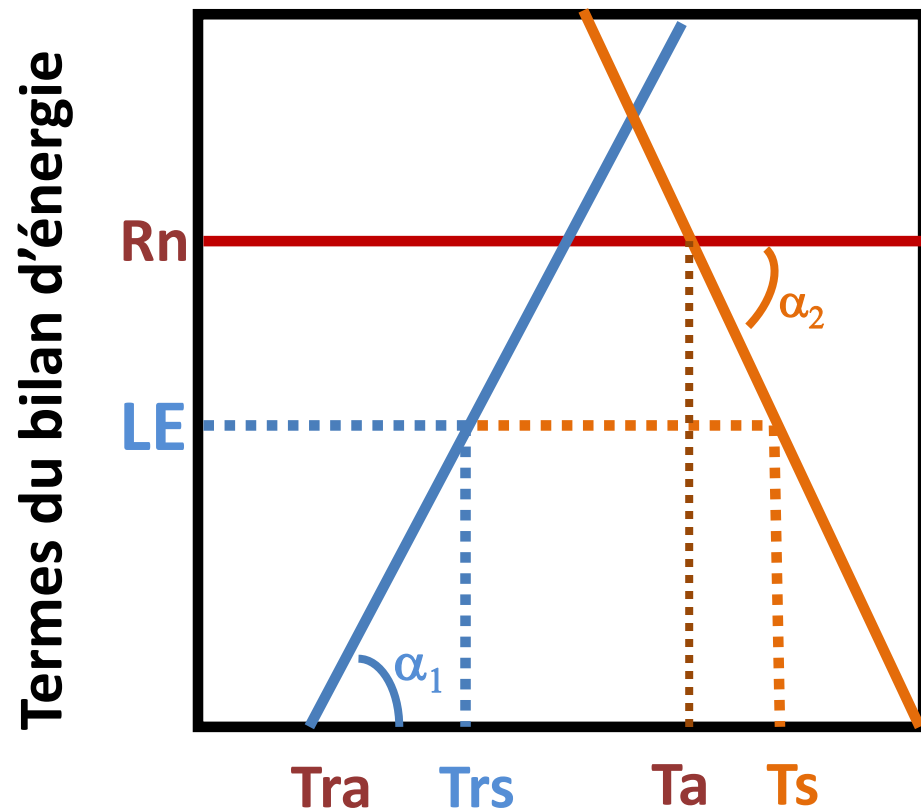
$$LE = \frac{(LM/RT)}{ra} P'(Tra-Trs)$$

$$LE \sim \alpha_1 (Tra-Trs)$$

- L'humidité de la surface ne peut pas être inférieure à celle de l'air
- Plus l'évaporation est forte, plus l'humidité de la surface est importante

Le déterminisme de la température de surface :

2. Expression de l'évaporation en fonction de T_a et T_s



$$LE = R_n - H \quad (\text{on néglige } G)$$

$$LE = R_n - \frac{\rho C_p}{r_a} (T_a - T_s)$$

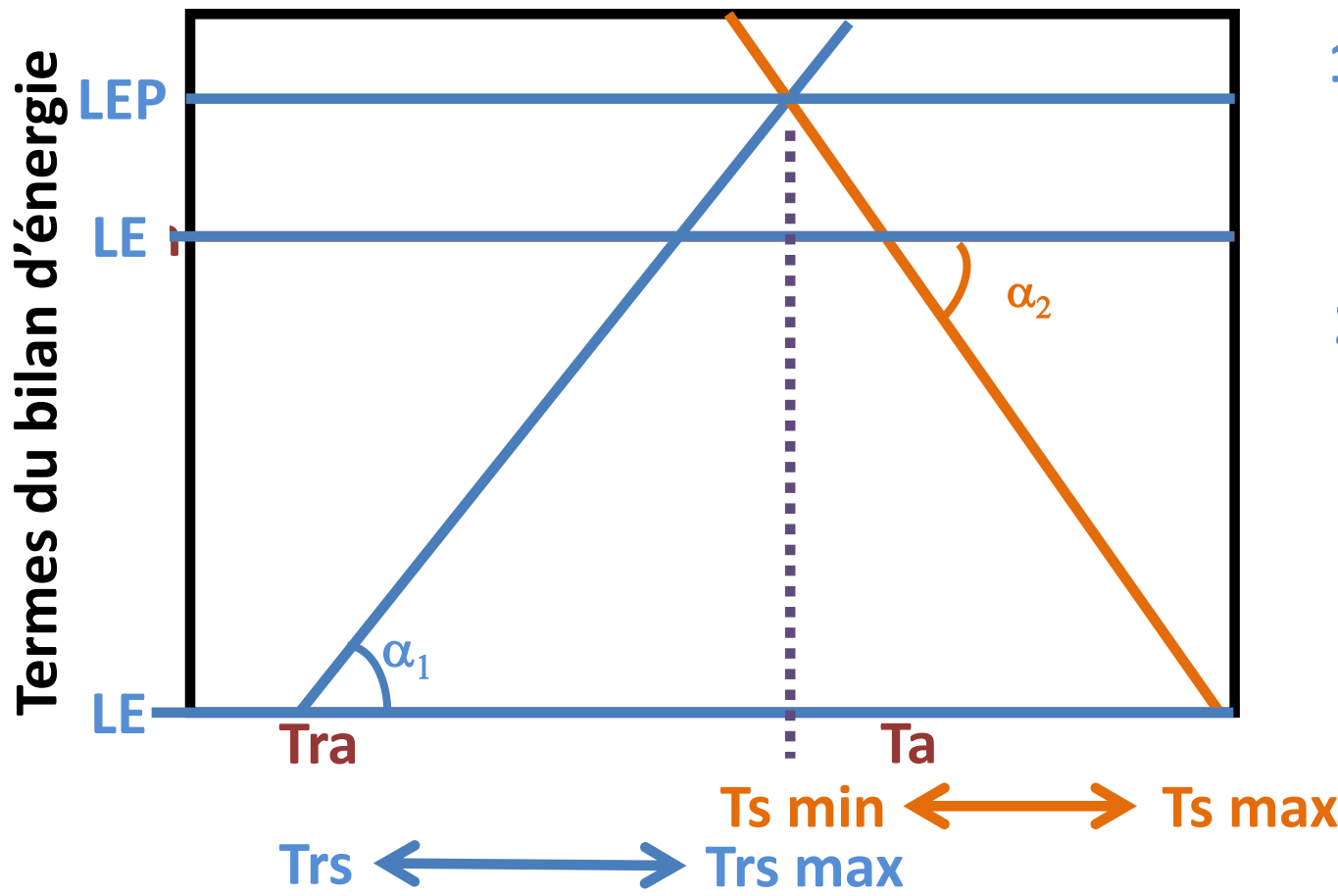
$$LE \sim R_n - \alpha_2 (T_a - T_s)$$

- La température de la surface est maximale quand l'évaporation est nulle
- La température de la surface peut être inférieure à celle de l'air
- Dans ce cas, $LE > R_n$

Températures

Le déterminisme de la température de surface :

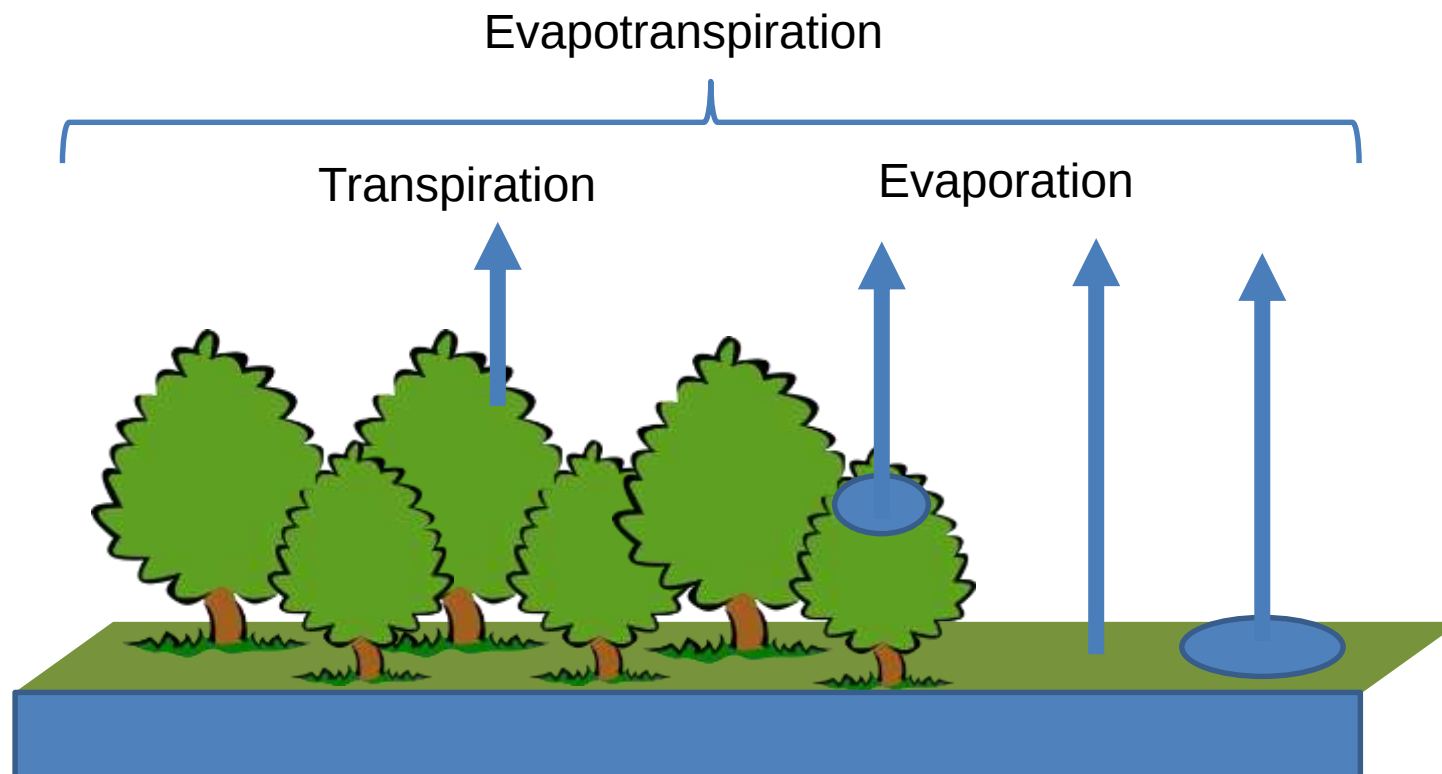
Bilan



1. Quand $LE = 0$:
 $Trs = Tra$
 $Ts = Ts \text{ max}$
2. Quand $LE = Rn$:
 $Ts = Ta \text{ (H=0)}$
3. Quand $LE = LEP$
 $Trs = Trs \text{ max}$
 $Ts = Ts \text{ min}$
 $EP > Rn : H < 0$

EVAPOTRANSPIRATIONS

Evapotranspirations



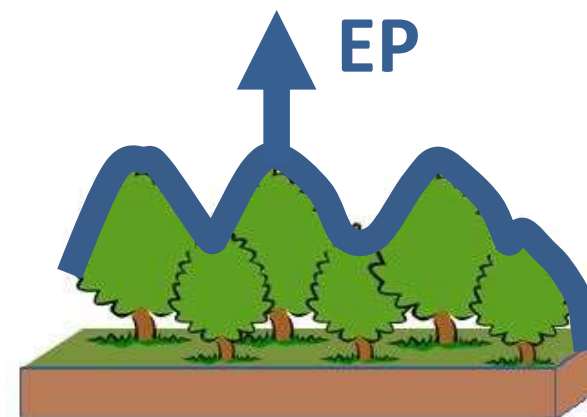
L'évapotranspiration est le flux de vapeur d'eau émis par l'ensemble sol - végétation vers l'atmosphère.

Elle correspond à la transpiration des plantes et à l'évaporation directe de l'eau au niveau du sol et des surfaces d'eau libre.

En fonction de la **disponibilité de l'eau**, on distingue :

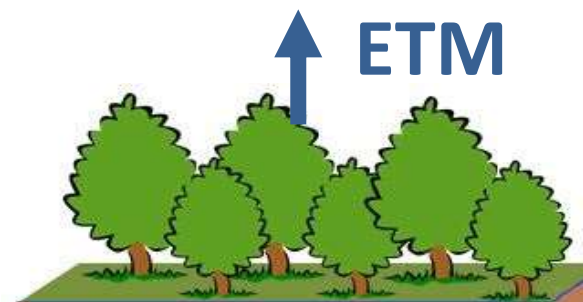
- **L' évaporation potentielle** (EP)

Demande climatique :
Quantité maximale d'eau que le **climat** permet d'évaporer dans l'atmosphère.



- **L' évapotranspiration maximale** (ETM)

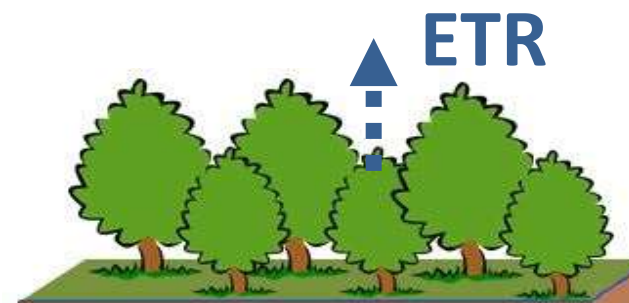
Quantité maximale d'eau que la **végétation** peut évapotranspirer pour un climat donné (pas de limitation par la disponibilité en eau du sol).



Eau du sol totalement disponible

- **L' évapotranspiration réelle** (ETR)

Quantité maximale d'eau que le **stock d'eau du sol** permet d'évapotranspirer à une végétation donnée pour un climat donné (régulation stomatique).



Eau du sol limitante

L'ETP (Evapotranspiration potentielle) est une **grandeur agrométéorologique** qui se calcule au moyen de formules qui prennent en compte **uniquement des variables météorologiques** (rayonnement, température, humidité de l'air, vent)

L'ETP donne une valeur approchée de l'ETM d'un couvert bas de type gazon.

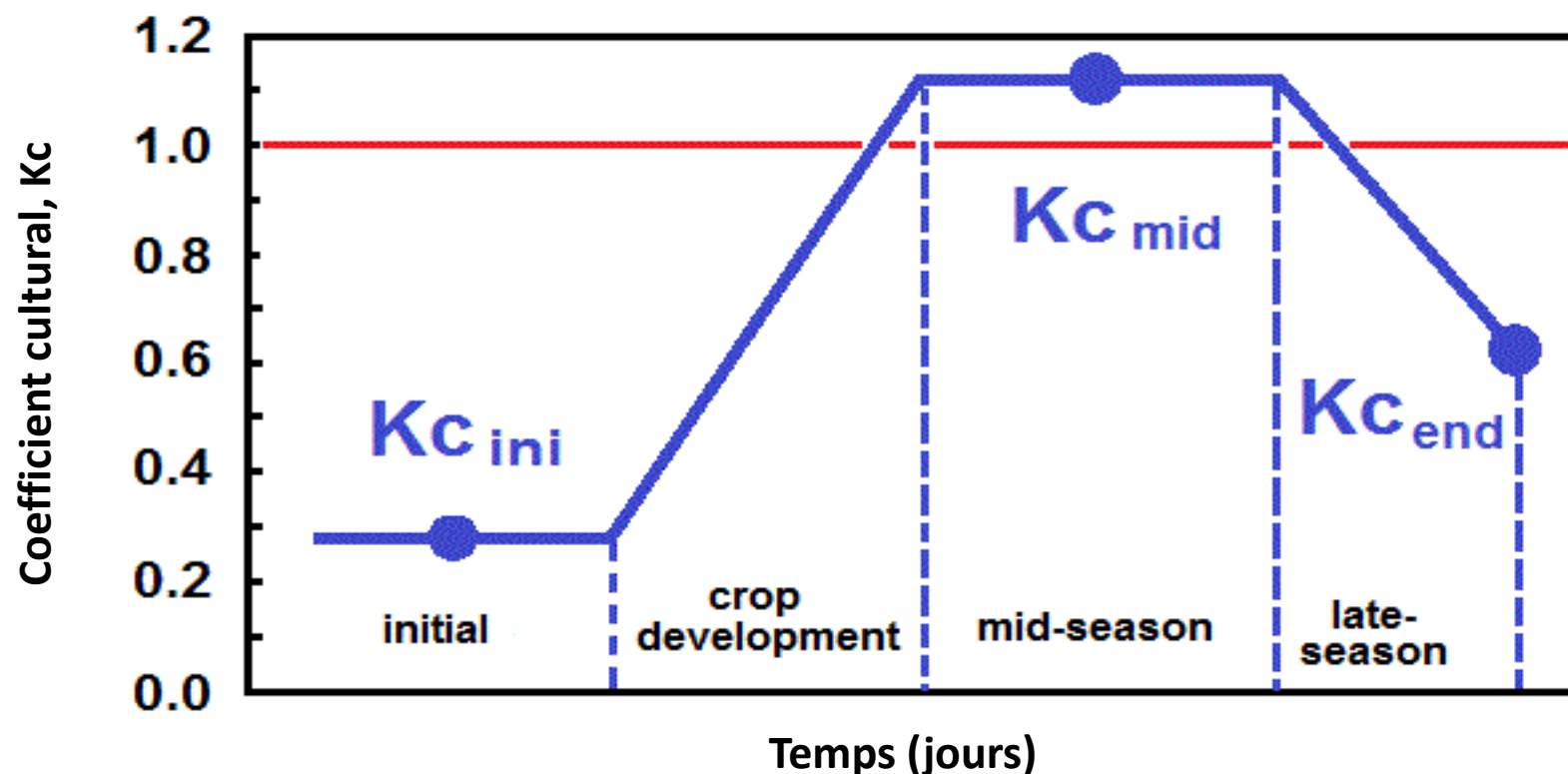
$$\text{ETP} = \text{ETM de référence}$$

- Humidité du sol non limitante (ETM)
- Caractéristiques de la végétation constantes

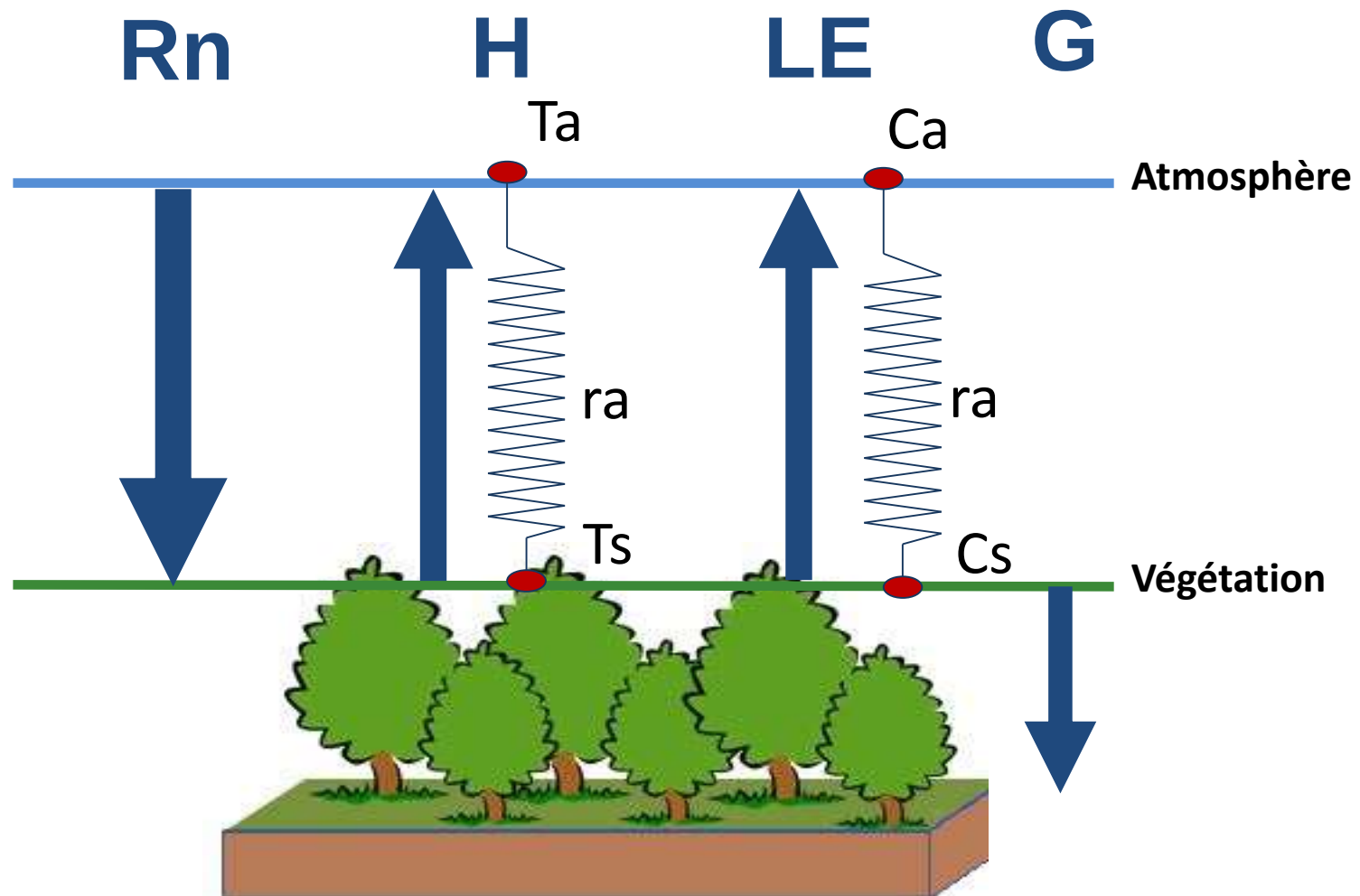
L'ETP ne dépend que du climat

Le coefficient cultural : le rapport ETM/ETP

Exemple d'une culture de maïs



In : R.G. Allen et al. (1998) *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*.
FAO Irrigation and drainage paper n°56
<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm#Contents>



Bilan d'énergie :

$$R_n + G + H + LE = 0$$

Expression du flux de vapeur d'eau au-dessus de la végétation

$$LE = \frac{P'}{P' + \gamma} \left[\underbrace{R_n - G}_{\text{« Terme radiatif »}} + \underbrace{\rho C_p / r_a \frac{(D_a - D_s)}{P'}}_{\text{« Terme convectif »}} \right]$$

L'évapotranspiration dépend :

- de l'énergie radiative disponible,
- du gradient d'humidité surface-air,
- de la vitesse du vent
- de la structure du couvert végétal

Le calcul de l'ETP par l'expression de Penman-Monteith :

$$LE = \frac{P'}{P' + \gamma} \left[\cancel{R_n - G} + \rho C_p / r_a \frac{(\cancel{D_a - D_s})}{P'} \right]$$

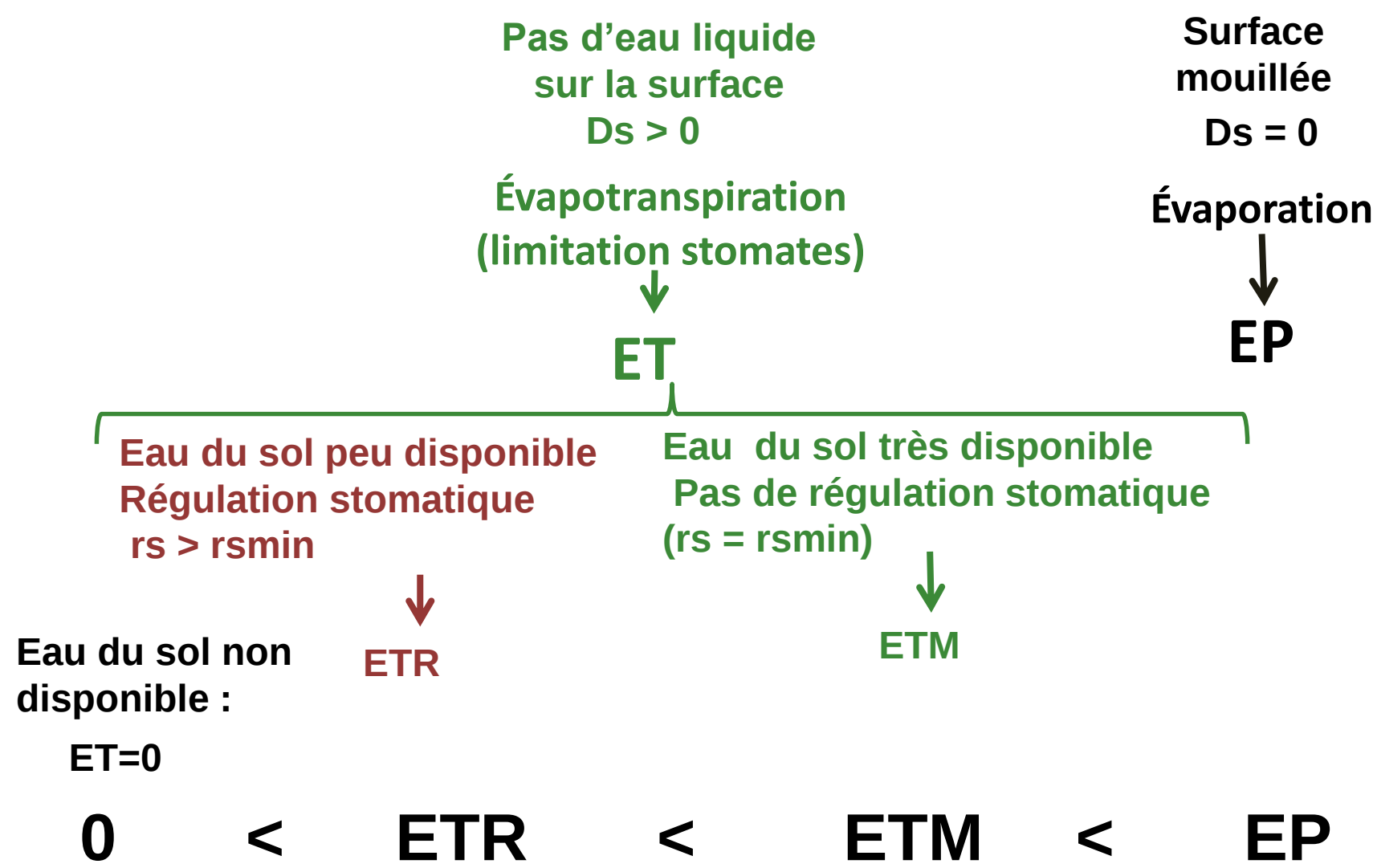
Comment calculer l'ETM d'une culture de référence à partir de cette relation, en n'utilisant que des données météo ?

4 « adaptations » de l'expression analytique :

1. $R_n = R_n^*$
2. $G = 0$
3. $\rho C_p / r_a = a + b.u$
4. $D_s = 0$

$$L.ETP = \frac{P'}{P' + \gamma} \left[R_n^* + (a + b.u) \cdot \frac{D_a}{P'} \right]$$

Récapitulation :



Données nécessaires pour l'estimation des différentes grandeurs

	ETP	EP	ETM	ETR
Données météo (Rg, Ta, Tr, u)	X	X	X	X
Caractéristiques de la végétation: ra	-	X	X	X
Résistance stomatique minimale (rs min)	(a + b.u)	-	X	X
	-	(Ds=0)		
Résistance stomatique (rs)	-	-	-	X
			(rs = rsmin)	



The end