

# Les processus d'évapotranspiration

Marc Saudreau (INRAE, UMR PIAF)

Sophie Herpin (Institut Agro, EPHor,IRSTV)

Séminaire sur les rôles de l'évapotranspiration en Ville  
Champs sur Marne - 5 décembre 2023



# Enjeux liés à l'évapotranspiration

- rafraîchissement urbain
- gestion des eaux pluviales
- gestion de la ressource en eau (irrigation, agriculture urbaine)
- croissance des plantes
- résistance des plantes à la sécheresse
- contexte changement climatique (modification répartition annuelle pluviométrie et sécheresse des sols)
- ....

# Evapotranspiration : Processus physiques

## Evapotranspiration

Passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux

Réaction endothermique : consomme de l'énergie

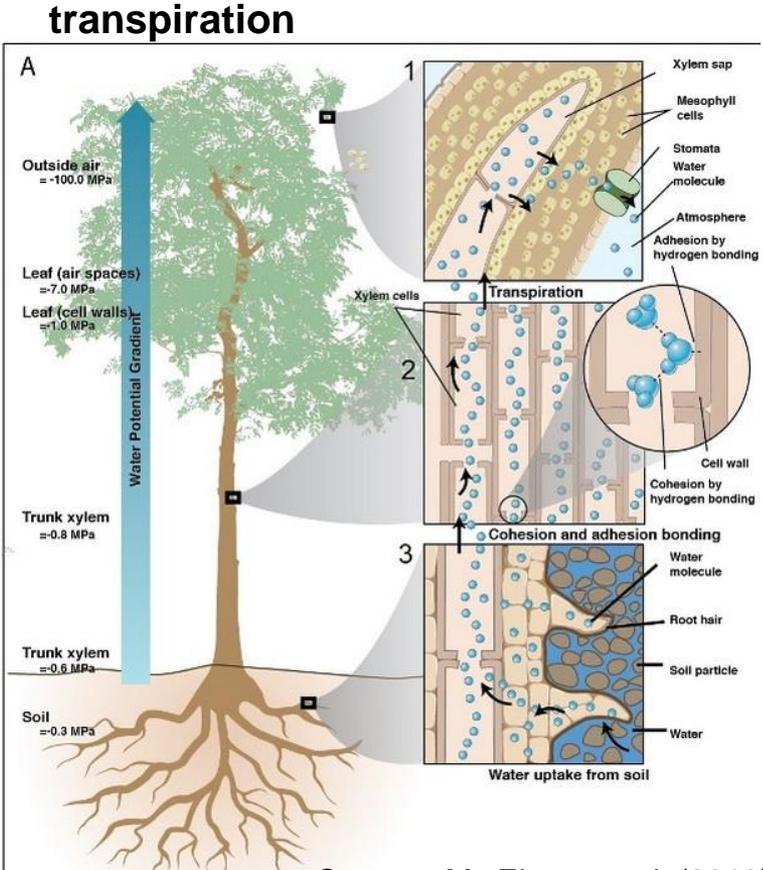
Chaleur latente de vaporisation de l'eau : 2,46 MJ/kg

Evapotranspiration\* = évaporation + transpiration

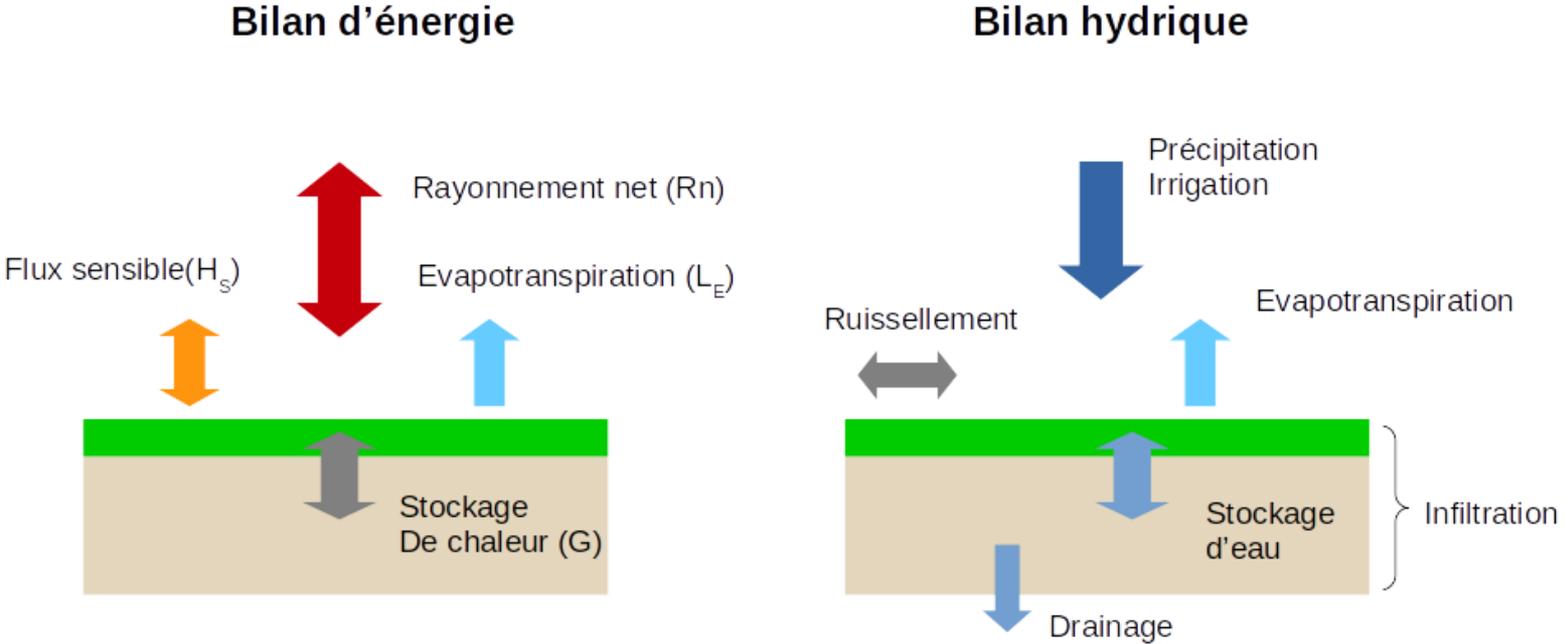
Eau libre continentale + sol nu : 10%  
Transfert vapeur d'eau depuis les océans : 40%

Plantes (>50%)

\*provenance de la vapeur d'eau à l'origine des précipitations continentales, en %



# Processus physiques : bilan d'énergie et bilan en eau

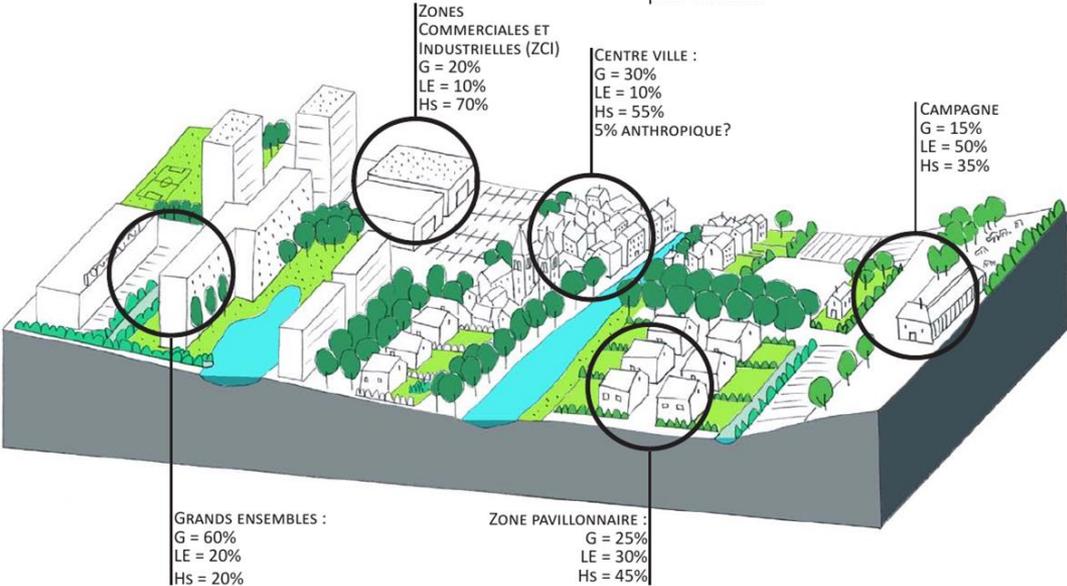


Couplage des deux bilans par le terme d'évapotranspiration

Comparaison des bilans en milieu urbain et en milieu rural ?

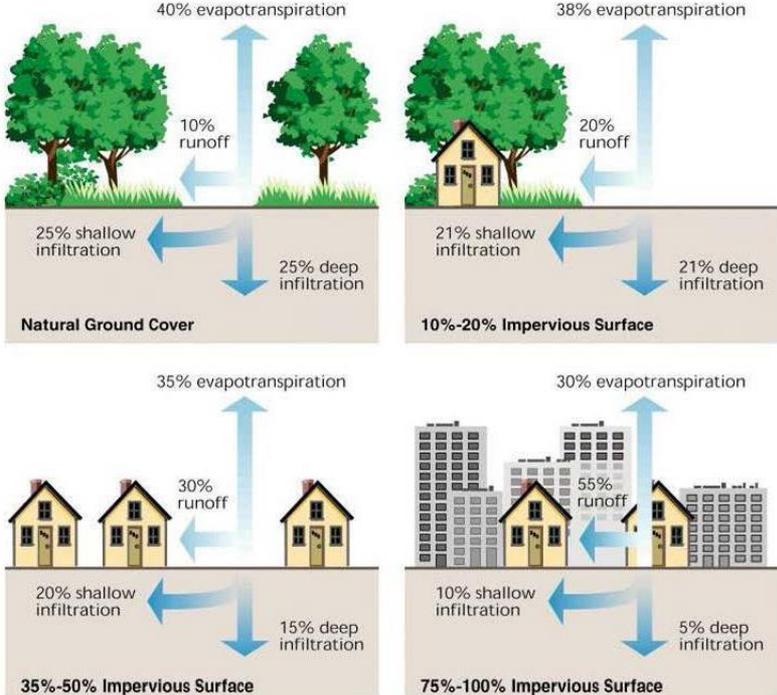
# Influence du milieu urbain

## Bilan d'énergie (% Rayonnement net)



Source : Plante et Cité, à partir de ANR Vegdud thèse Dupont

## Bilan Hydrique (% pluviométrie)



Source : EPA 2003

# Evapotranspiration

L'intensité de l'évapotranspiration (ET) dépend de plusieurs facteurs

## Le climat (ETP / ETréf)



Augmentation avec :

- le rayonnement
- le pouvoir asséchant de l'air (DPV)
- le vent

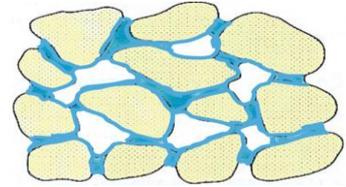
## L'espèce végétale Capacité évapotranspirer (ET Maximale)



Augmentation avec :

- la surface foliaire (LAI)
- la finesse du cuticule
- la densité de stomates

## La disponibilité en eau du sol : (ET Réelle)



Augmentation avec :

- les précipitations
- la réserve utile du sol
- la profondeur racines

## REGULATION STOMATIQUE (rs, gs)

Fermeture des stomates en cas de sécheresse combinée à forte chaleur

# Demande climatique : Evapotranspiration de Référence

Formule de Penman Monteith pour un surface de référence (gazon bien irrigué)

$$ET_{ref} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 DPV}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

en mm/jour

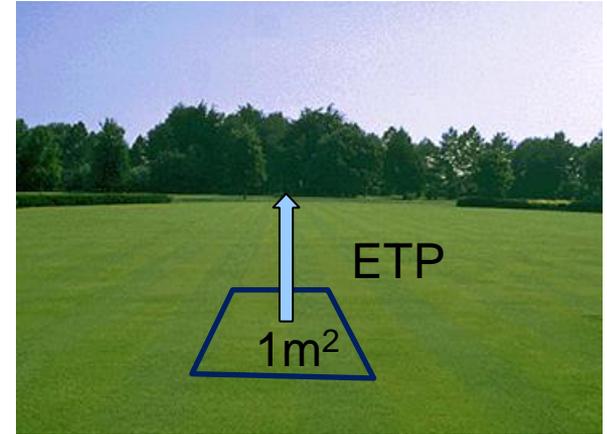
**R<sub>n</sub>** et **G** : rayonnement net et stockage en MJ/m<sup>2</sup>/jour

**U<sub>2</sub>** : vitesse moyenne sur la journée en m/s, à 2m du sol

**T** : température moyenne de l'air en °C

**DPV** : Déficit en pression de vapeur d'eau en kPa (pouvoir asséchant air)

$\Delta$  et  $\gamma$  en kPa/°C

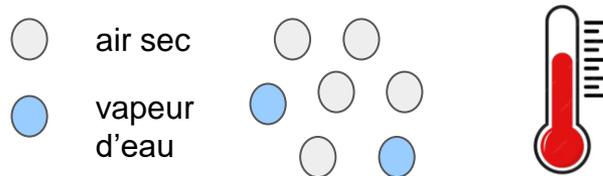


L'évapotranspiration de référence augmente avec :

**Le rayonnement**



**La sécheresse et la température de l'air**



**Le vent**



# Demande climatique : Evapotranspiration de Référence

## Moyenne mensuelle (mm/mois) pour quelques villes : normales saisonnières Météo France

		Janv,	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil,	Aout	Sept,	Oct,	Nov,	Déc,	Année
Biarritz	Pluvio	139,6	110,4	102,8	117,7	116,1	99,2	77,3	87,5	118,2	147,3	206,9	150,6	1473,6
	ETP	23,1	33,8	66,2	87,9	115,2	129,3	138,2	124,8	87,5	55,4	27,4	22,6	911,4
Bordeaux	Pluvio	86,9	66,9	63,3	75,6	71,1	70,4	48,6	56,7	81,2	83,3	114,5	106,4	924,9
	ETP	16,9	32,6	67,4	98,6	130,5	153,5	162	140,6	95,2	53,3	22,1	14	986,7
Brest	Pluvio	142,6	118,7	82,2	91,8	74,6	64,6	70,7	75,3	78,6	129,4	146,7	154,6	1229,8
	ETP	15	24,4	51	79,8	107,4	119,4	121,8	100,3	70,1	38,4	18	14,9	760,5
Dijon	Pluvio	56,8	42,9	48,2	57,5	76,1	65,8	64,9	62	56,4	73,6	77,6	61,6	743,4
	ETP	10,6	23,7	56,7	89,4	117,2	147,2	158,2	128,4	83,3	37,9	13,2	8,8	874,6
Marignan e	Pluvio	47,1	29,8	29,5	51,6	37,7	27,9	10,8	25,8	82	73,3	75,9	40,9	532,3
	ETP	32,2	45,9	86,8	125,8	172,7	208	230,3	195,3	128,2	76	39,2	28,3	1368,7
Paris	Pluvio	47,6	41,8	45,2	45,8	69	51,3	59,4	58	44,7	55,2	54,3	62	634,3
	ETP	16	25,8	56,1	94,2	121,6	142,3	153,1	126,2	81	40,8	17,8	15,6	890,5

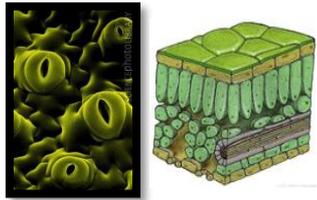
# Les végétaux - Evapotranspirations Maximale et Réelle

Effet surface d'échange - LAI de la plante  $\Rightarrow ET_{max} \neq ET_{ref}$

Régulation de la transpiration par la plante via ses stomates

Transpiration  $\approx g_s \cdot$  Potentiel Evaporation

Réponse Espèce



Demande Climatique

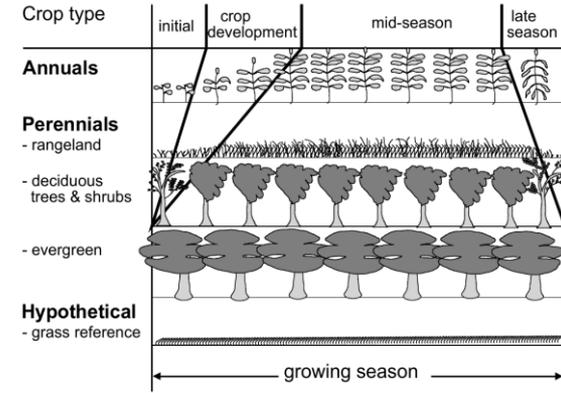
HR (%)  
T (°C)

$g_a$  = conductance couche limite foliaire ( $m \cdot s^{-1}$ )  
 $g_s$  = conductance stomatique ( $m \cdot s^{-1}$ )

Penman Monteith pour le cas général :  
végétaux  $\neq$  gazon bien irrigué

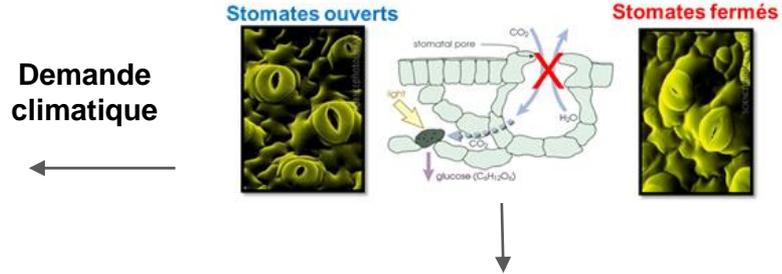
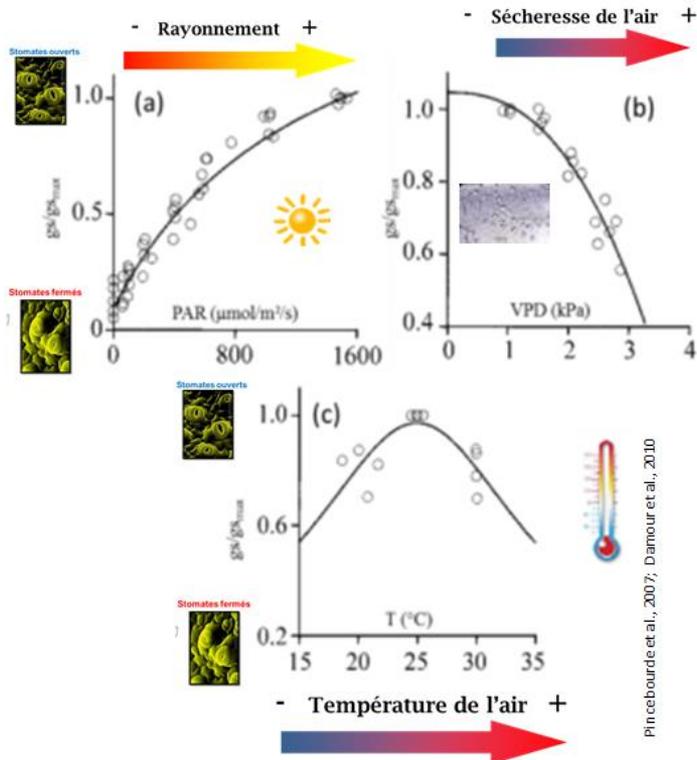
$ET_{réelle} \neq ET_{ref}$

$$ET_{réelle} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + 2 \frac{\rho_{air} C_{p air}}{\lambda} g_a DPV}{\Delta + \gamma \left( \frac{g_a}{g_s} + 1 \right)}$$

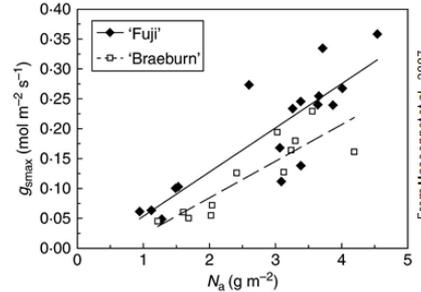


# Les végétaux - Evapotranspirations Maximale et Réelle

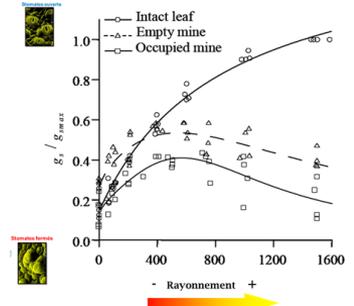
Régulation de la transpiration par la plante via ses stomates:  $ET_{Max} \neq ET_{Réf}$



Etat Physiologique / Etat Sanitaire



**Azote foliaire**  
 $g_s \uparrow$  avec N



**Maladies - Ravageurs**  
 $g_s \downarrow$

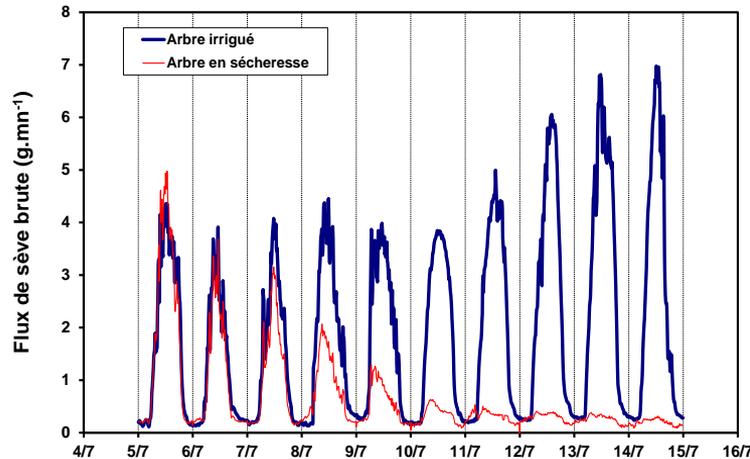
# Les végétaux - Evapotranspirations Maximale et Réelle

Régulation de la transpiration par la plante via ses stomates:  $ET_{\text{Réelle}} \neq ET_{\text{Max}}$

Sécheresse du sol : **Fermeture stomatique** → Transpiration ↓

Stress hydrique  
 $g_s \rightarrow 0$

- Economise l'eau du sol
- Mais diminue l'entrée de  $CO_2$  : diminue la production de sucres (photosynthèse).
- Stoppe la régulation thermique! (les feuilles grillent au soleil)



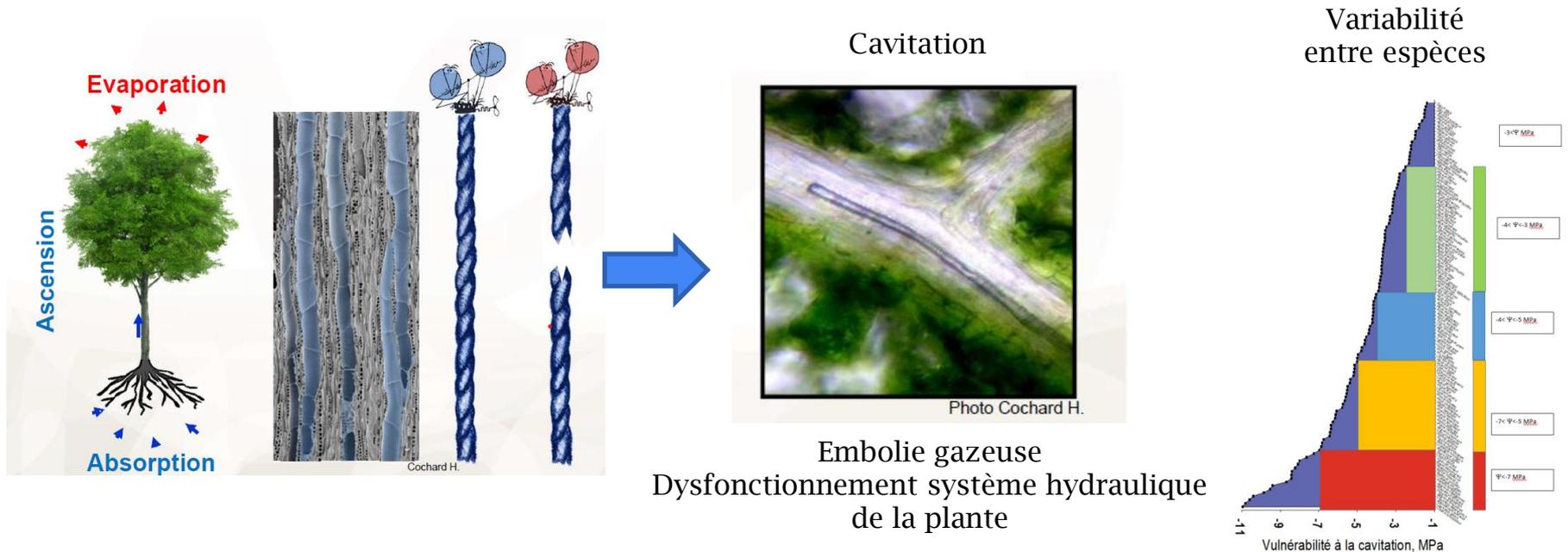
Améglio *et al.* (1993)



# Les végétaux - Evapotranspirations Maximale et Réelle

Régulation de la transpiration par la plante via ses stomates:  $ET_{Réelle} \neq ET_{Max}$

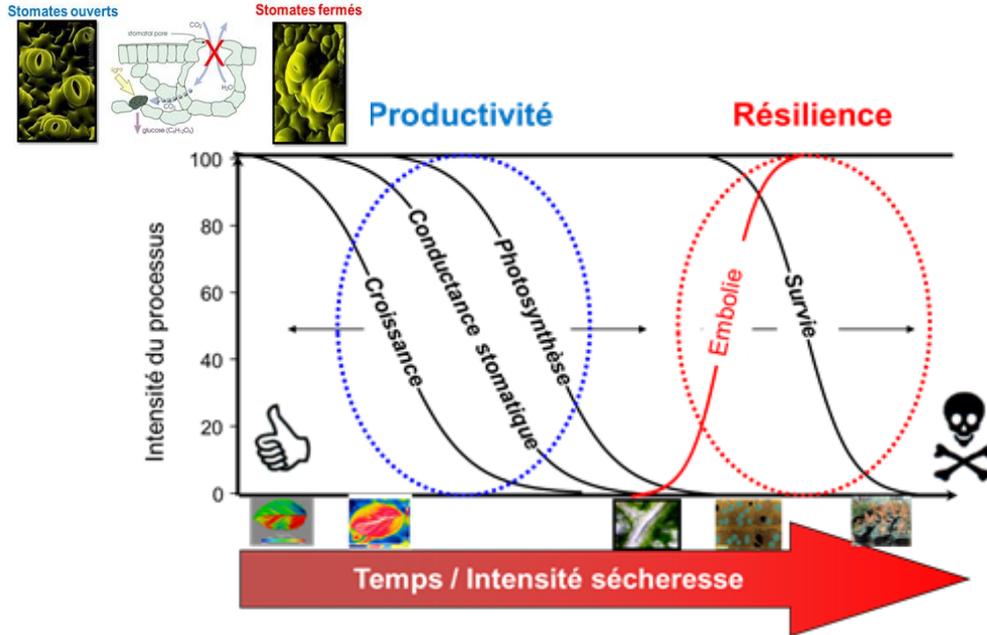
Sécheresse du sol - Plantes vulnérables aux sècheresses



# Les végétaux - Evapotranspirations Maximale et Réelle

Régulation de la transpiration par la plante via ses stomates:  $ET_{Réelle} \neq ET_{Max}$

Sécheresse du sol - Plantes vulnérables aux sècheresses



Réponses fonctionnelles sont complexes

Variabilité temporelle  
Variabilité Inter-spécifique

Durabilité des plantes

⇒ Lien fort avec le sol et le système racinaire

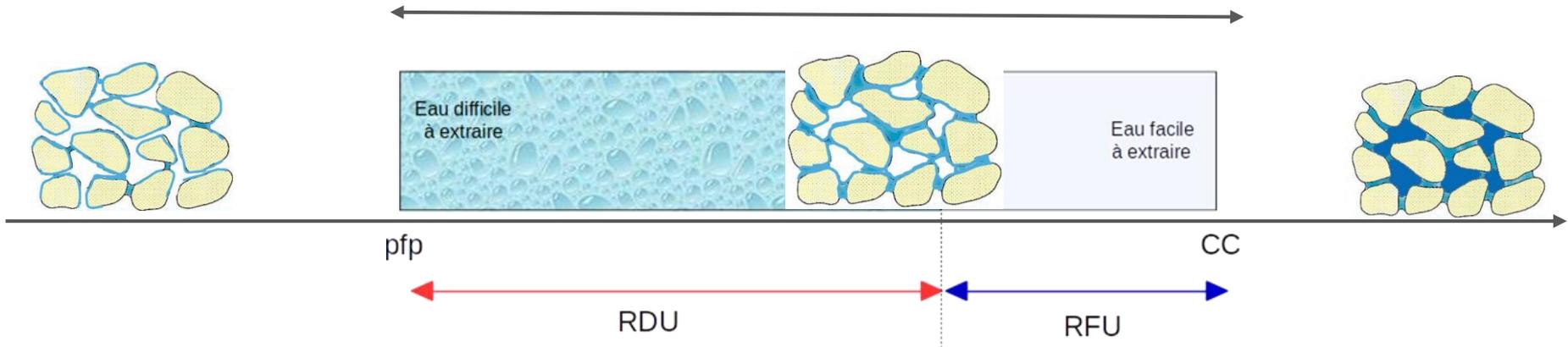


# Influence Disponibilité de l'eau dans le sol : ET réelle

en dessous du point  
de flétrissement permanent :

Eau disponible dans la sol :  
Réserve Utile (RU)

au dessus de la capacité  
au champs :



pfp

CC

RDU

RFU

$ET_{\text{Réelle}} \cong 0$   
risque de mort de la  
plante

$ET_{\text{Réelle}} < ET_{\text{Max}}$   
Réduction de l'évapotranspiration  
=> stress hydrique

$ET_{\text{réelle}} = ET_{\text{Max}}$   
besoins en eau  
satisfaits

$ET_{\text{Réelle}} = ET_{\text{Max}}$   
drainage  
recharge nappes

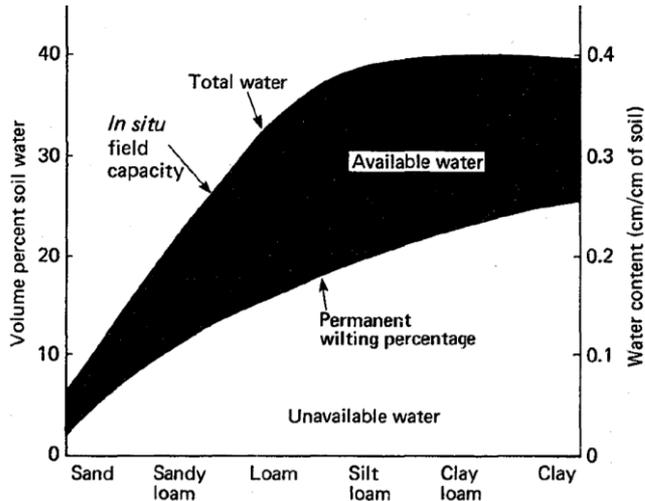
# Influence Disponibilité de l'eau : Evapotranspiration réelle

Réserve Utile du sol (RU, mm)

$$RU = z \cdot (\theta_{v,CC} - \theta_{v,pFp}) \cdot \frac{V_{total} - V_{pierre}}{V_{total}}$$

$\theta$  : teneur en eau volumique du sol

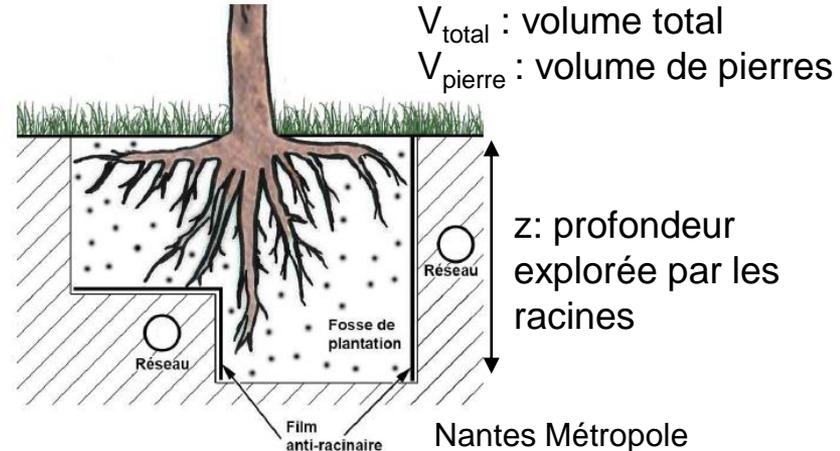
## Influence de la texture du sol



$\theta_{CC}$  : capacité au champs

$\theta_{pFp}$  : point de flétrissement permanent

## Mise en oeuvre Plantation : Fosse d'arbre...



$V_{total}$  : volume total

$V_{pierre}$  : volume de pierres

$z$  : profondeur explorée par les racines

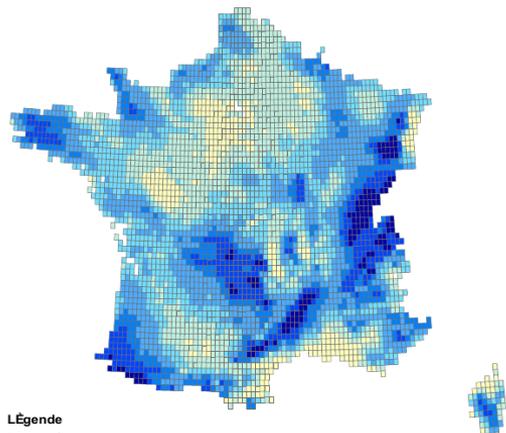
Cassel et Kramer (1983)

# Evapotranspiration : Données France

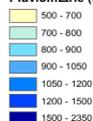
Données climatiques et précipitations : Météo France ; Cartographie des sols en France : INRAE Orléans  
Modèle de culture STICS-prairie

## Pluviométrie

Pluviométrie annuelle moyenne  
de 1993 à 2004



Légende  
Pluviométrie (mm)

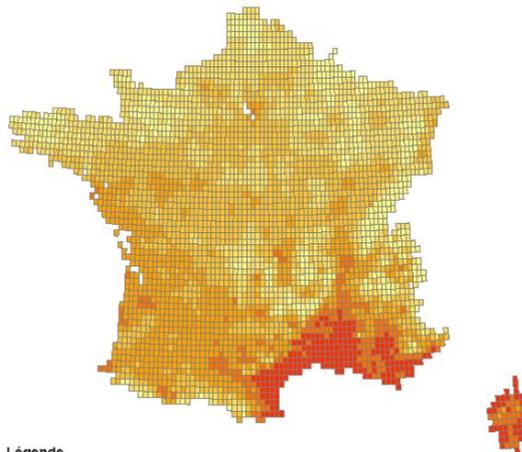


fi

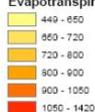


## ET<sub>Max</sub>

Evapotranspiration maximale moyenne annuelle  
de 1993 à 2004

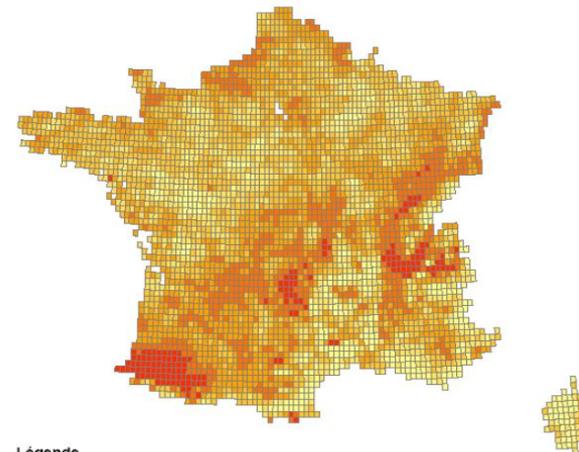


Légende  
Evapotranspiration maximale (mm)

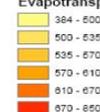


## ET<sub>Réelle</sub>

Evapotranspiration réelle moyenne annuelle  
entre 1993 et 2004



Légende  
Evapotranspiration réelle (mm)



# Estimation / Mesure de l'évapotranspiration

Méthode d'estimation :  $E_{Tréf}$ , coefficients culturaux ( $K_c$ ) et de satisfaction en eau ( $k_s$ )

$$ETR = (k_s \cdot k_c) \cdot ET_{ref}$$

Bases de données de coefficients culturaux par espèce :  
FAO-56 (alimentaire), WUCOLS (ornemental), BRF

## Méthodes de mesures (+ précis)

Echanges gazeux  
sur feuille



Feuille (cm)

Chambre à transpiration



Carré pelouse (m)

Flux de sève  
Microdendrométrie



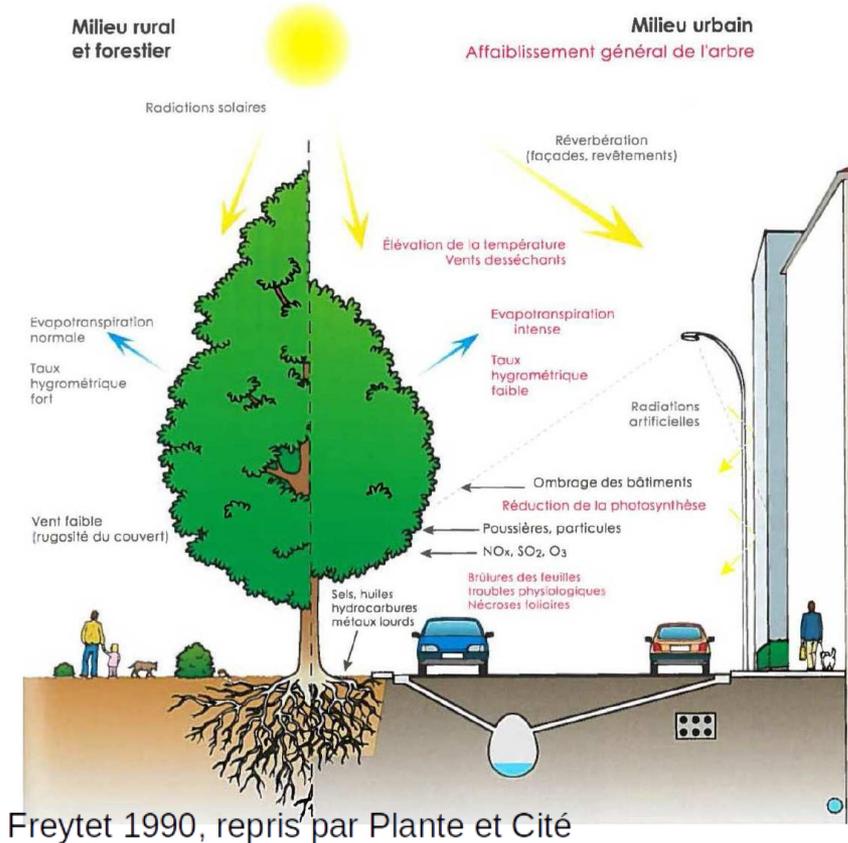
Arbre

Méthode Aéro (eddy cov.)  
Scintillométrie



100m - 1km

# Influence Milieu urbain



## Diminution de la réserve en eau dans le sol (RU) :

- imperméabilisation des surfaces : moins d'infiltration
- peu de connaissance sur les sols urbains
- influence des réseaux dans le sol
- système racinaire contraint

## Modification demande climatique (ET<sub>réf</sub>):

- ombrage / réflexion bâtiment
- diminution ou augmentation vitesse du vent (effet brise-vent des bâtiments, TTV)
- effet îlot de surface et îlot de chaleur urbain

## Compartiment végétal

- espèces moins documentées
- influence pratique de gestions (taille...)

- ⇒ **EVT en milieu urbain : complexe**
- ⇒ **stress hydrique pour les végétaux : quel impact sur les services associés : intensité et pérenité?**

Merci pour votre attention

Questions ?