

# *Les arbres – Fonctionnement et rafraîchissement urbain*

Marc Saudreau

[marc.saudreau@inrae.fr](mailto:marc.saudreau@inrae.fr)

**Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant**





Le PIAF Recherche Séminaires et Evénements Offres et formations Le PIAF pour tous Toutes les rubriques

**Physique et Physiologie de l'Arbre en environnement Fluctuant**

Un laboratoire sur la « Résistance et résilience des systèmes arborés face aux CC »



Sècheresses



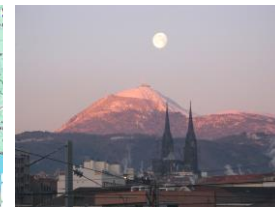
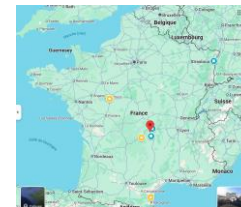
Tempêtes



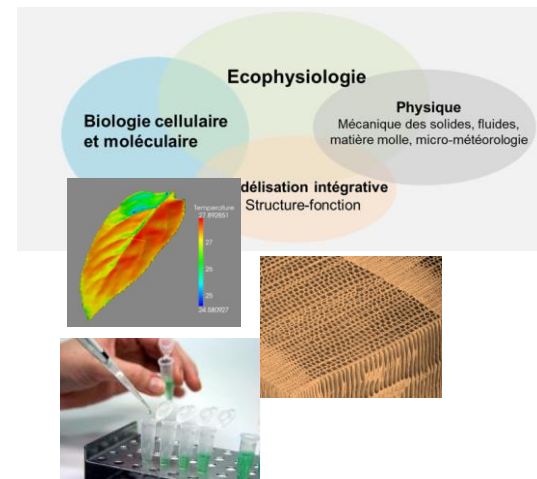
Fortes températures



Gelées tardives

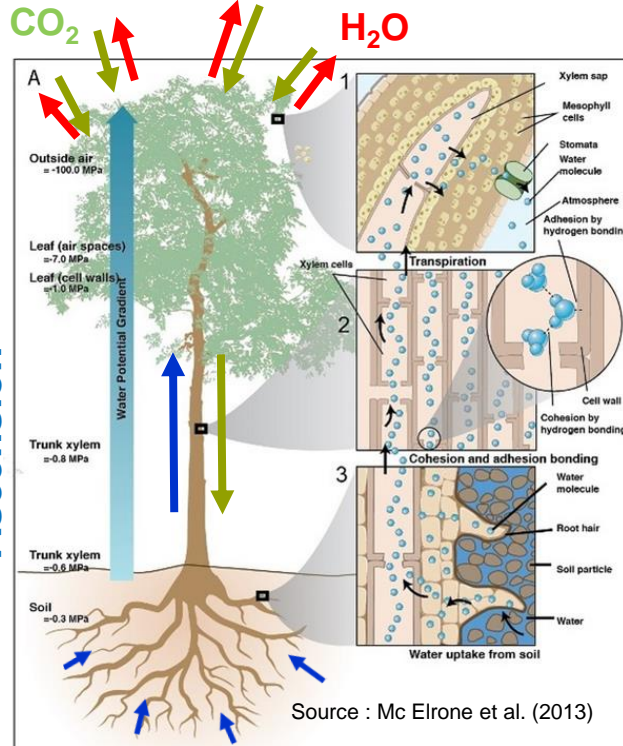


Unité Interdisciplinaire  
(~ 60 personnes)



# Le fonctionnement d'un arbre - Généralités

## Echanges Gazeux

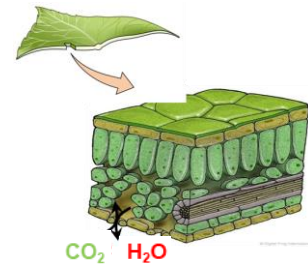


Ascension

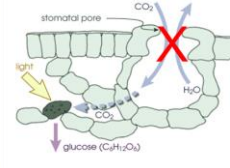
Absorption

Source : Mc Elrone et al. (2013)

- Sites échanges gazeux = chambres sous stomatiques



Stomates ouverts



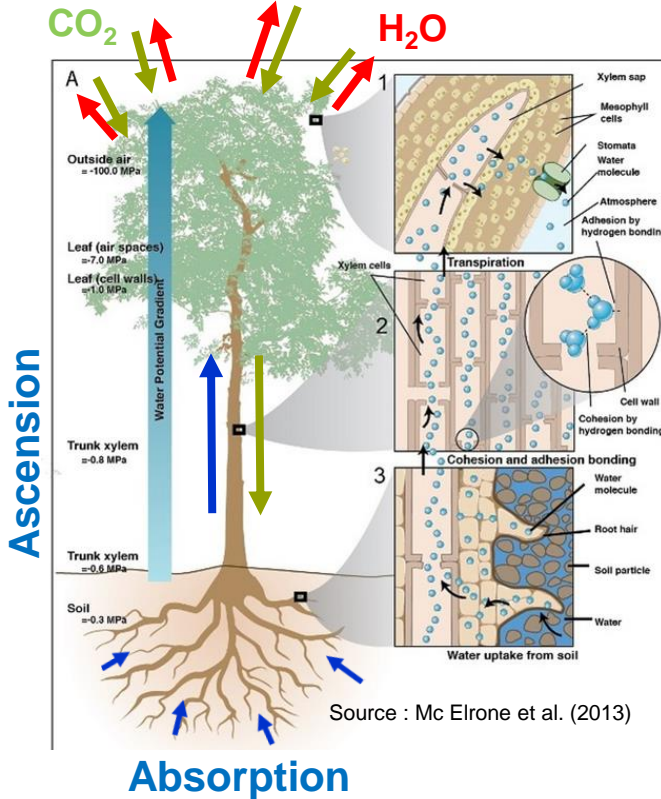
Stomates fermés



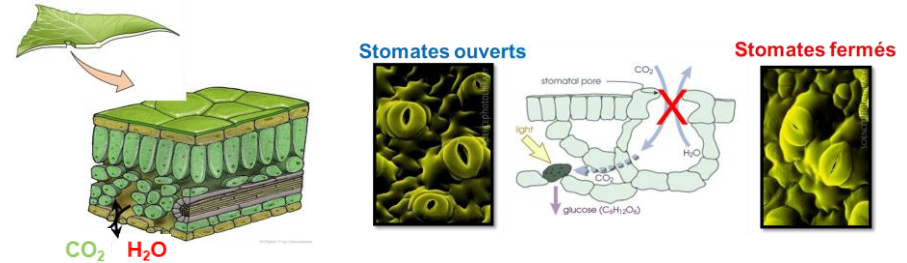
Sève montante (brute – Xylème)  
Sève descendante (élaborée – Phloème)

# Le fonctionnement d'un arbre - Généralités

## Echanges Gazeux



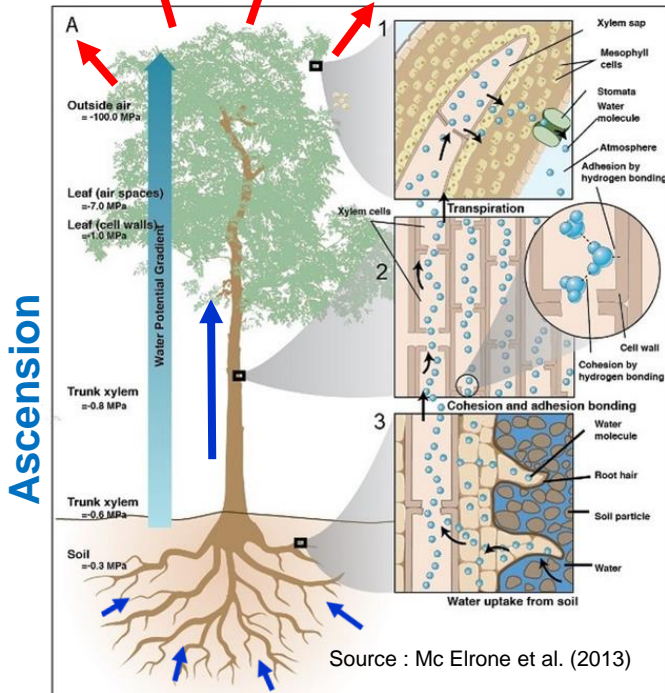
- Sites échanges gazeux = chambres sous stomatiques



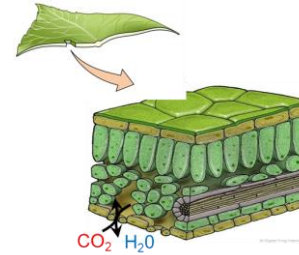
- Acquisition de carbone (CO<sub>2</sub>) => Croissance, production de graines, fruits, feuilles, etc ...
- Perte en eau (H<sub>2</sub>O) => Gradients d'eau - Mouvements d'eau et distribution solutés
- Flux d'eau et de carbone sont **indissociables**

# La transpiration - Principe

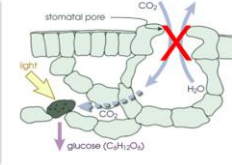
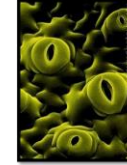
## Evaporation/Transpiration



- Sites échanges gazeux = chambres sous stomatiques = site évaporation de l'eau



Stomates ouverts



Stomates fermés

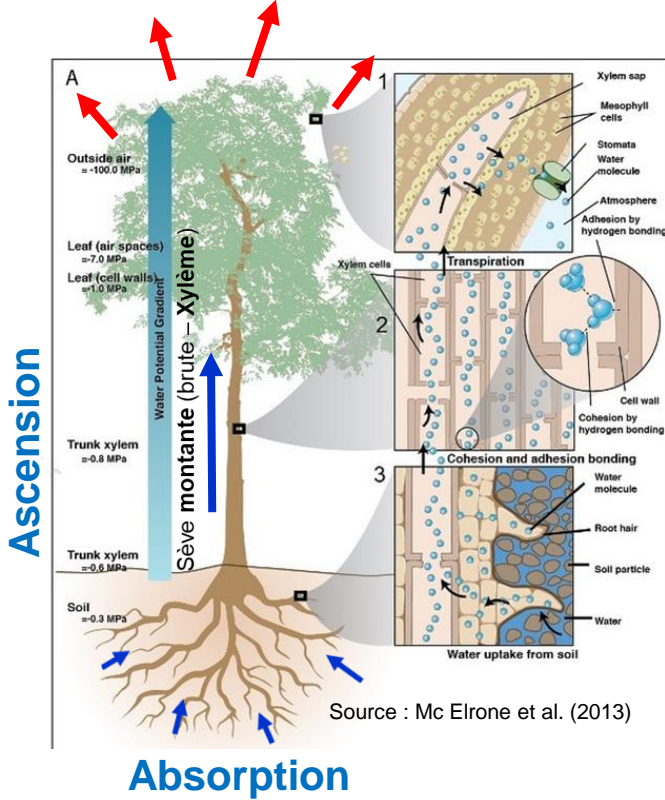


- Gradient d'humidité (intérieur > extérieur) = Diffusion de la vapeur d'eau – **Transpiration**

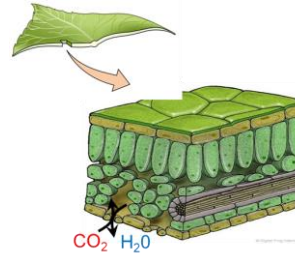
## Absorption

# La transpiration - Principe

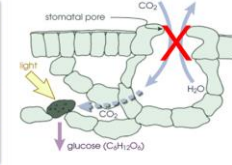
## Evaporation/Transpiration



- Sites échanges gazeux = chambres sous stomatiques = site évaporation de l'eau



Stomates ouverts



Stomates fermés

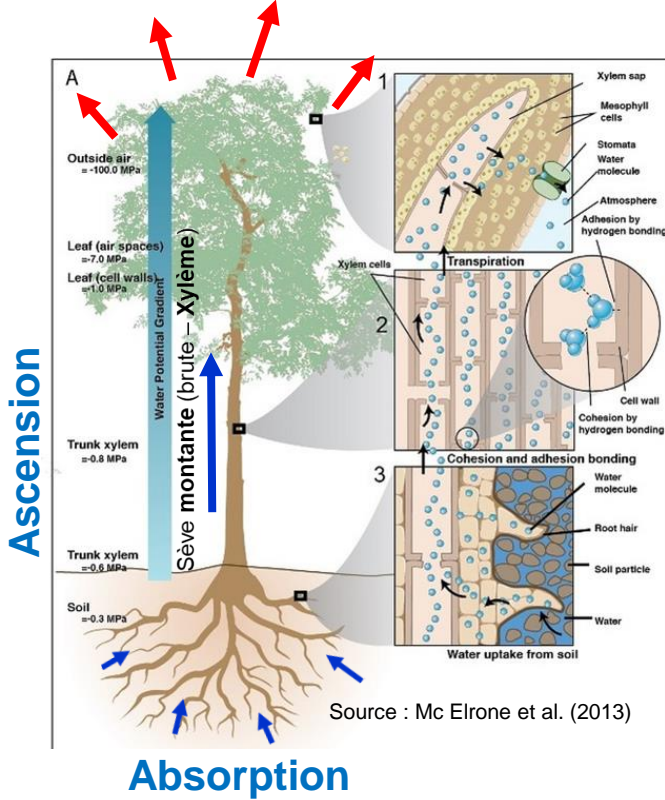


- Gradient d'humidité (intérieur > extérieur) = Diffusion de la vapeur d'eau – **Transpiration**
- Le **moteur** du mouvement = la colonne d'eau est « tirée » vers le haut – **Flux d'eau** est piloté par le **gradient de potentiel de l'eau (Pa)**

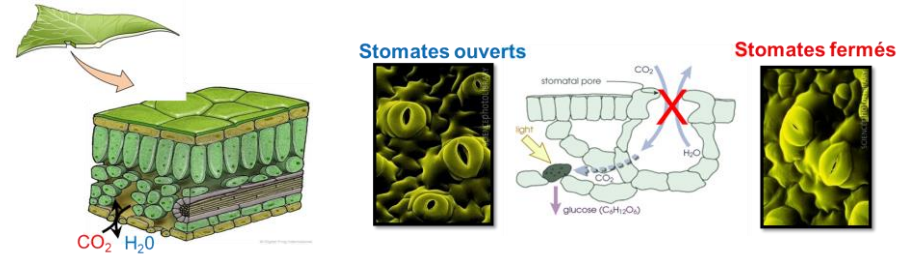
$$\Psi_{\text{Air}} < \Psi_{\text{Sol}}$$

# La transpiration - Principe

## Evaporation/Transpiration

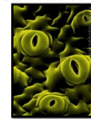


- Sites échanges gazeux = chambres sous stomatiques = site évaporation de l'eau



- Le **moteur** du mouvement = la colonne d'eau est « tirée » vers le haut – **Flux d'eau** est piloté par le **gradient de potentiel de l'eau (Pa)**

Flux chaleur latente (W/m<sup>2</sup>)  $\Leftrightarrow \lambda_E = a \cdot g_w \cdot (e_{sat}(T) - e_{vap}(T_a))$

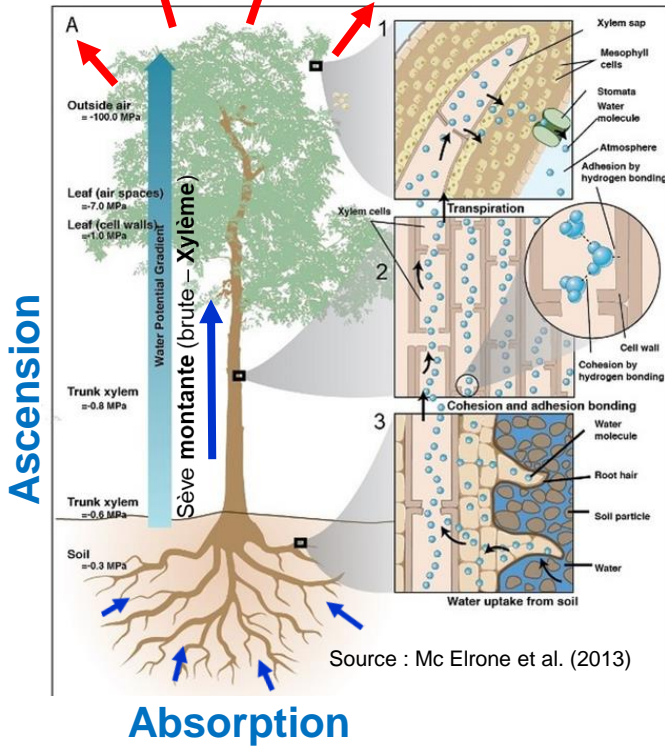


Réponse Physiologique ( $g_s$ )  
Couche limite ( $h$ )

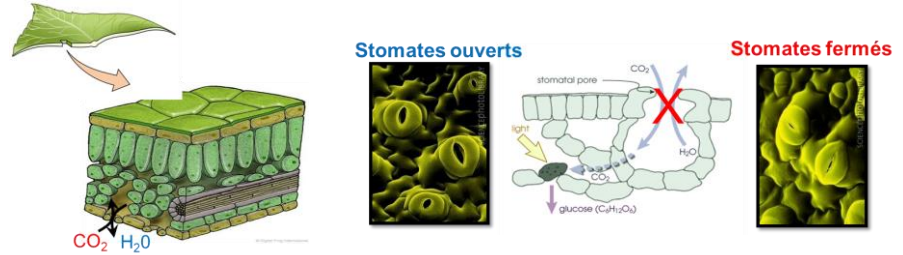
Demande climatique  
(HR, Température air)

# La transpiration - Principe

## Evaporation/Transpiration



- Sites échanges gazeux = chambres sous stomatiques = site évaporation de l'eau



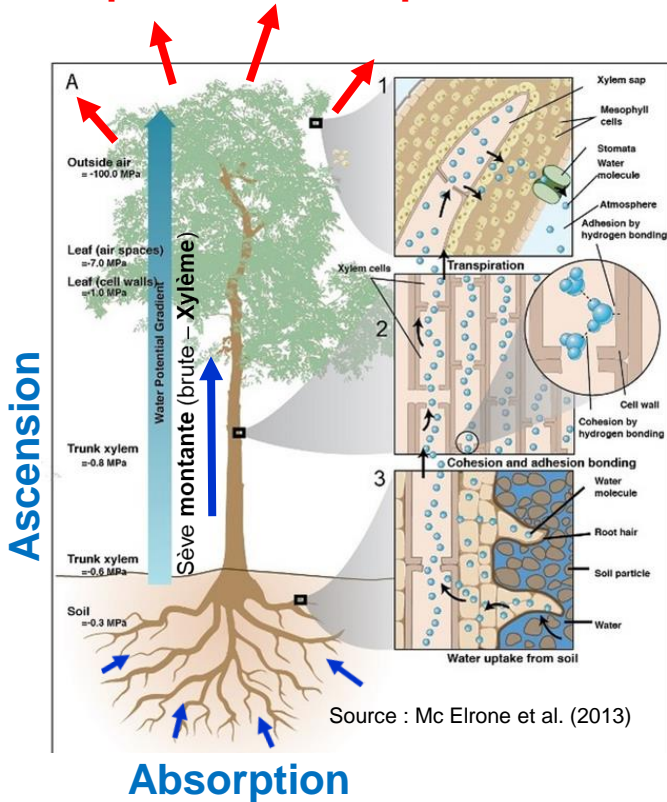
- Le **moteur** du mouvement = la colonne d'eau est « tirée » vers le haut – **Flux d'eau** est piloté par le **gradient de potentiel de l'eau (Pa)**

$$\text{Flux chaleur latente (W/m}^2\text{)} \iff \lambda_E = a \cdot g_w \cdot (e_{sat}(T) - e_{vap}(T_a))$$

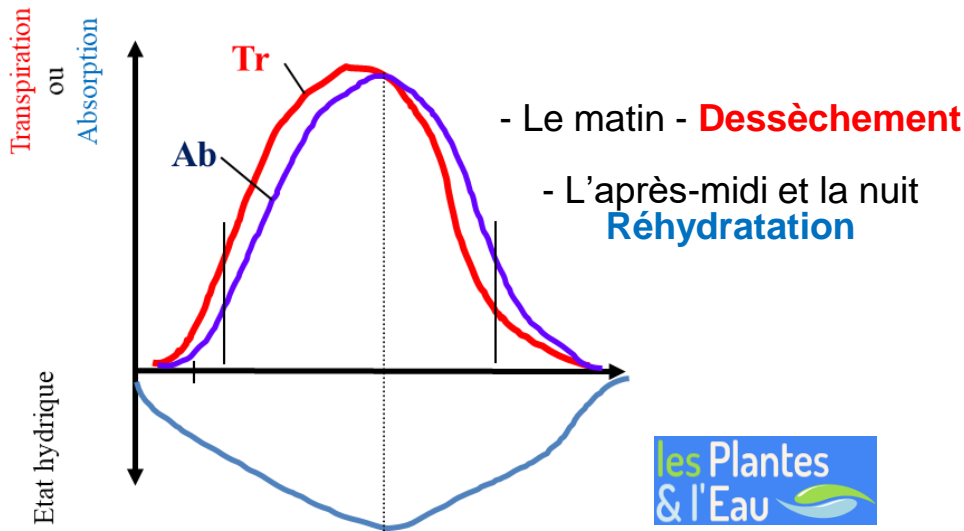
- Processus **endothermique** = **régulation thermique** des feuilles – éviter une surchauffe

# La transpiration - Principe

## Evaporation/Transpiration



- **Système dynamique** - En absence de sécheresse du sol, la **transpiration ( $Tr$ )** et l'**absorption ( $Ab$ )** ne sont pas tout à fait concomitantes à quelques %



<https://plantes-et-eau.fr/>

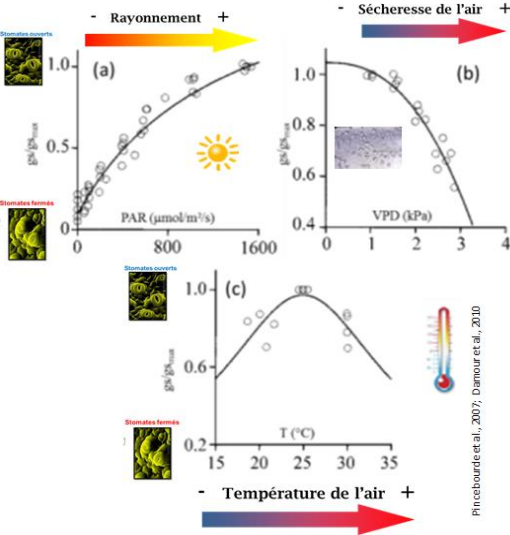
# La transpiration - Principe

- Régulation par la « plante » - Conductance stomatique  $g_s$

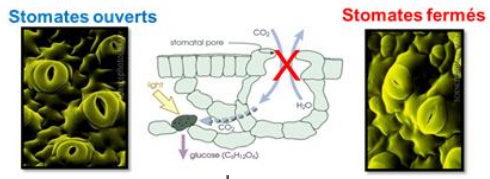
$$\lambda_E = a \cdot g_w \cdot (e_{sat}(T) - e_{vap}(T_a))$$

(m.s<sup>-1</sup>)

Réponse Physiologique ( $g_s$ )



Demande climatique

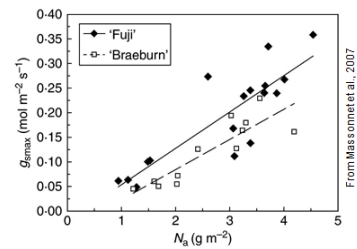
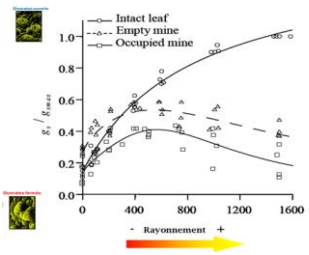


Etat hydrique

Stress hydrique  
 $g_s \rightarrow 0$



Etat Sanitaire / Physiologique



Lien fort avec le sol et le système racinaire

Maladies - Ravageurs  
 $g_s \downarrow$

Azote foliaire  
 $g_s \uparrow$  avec N

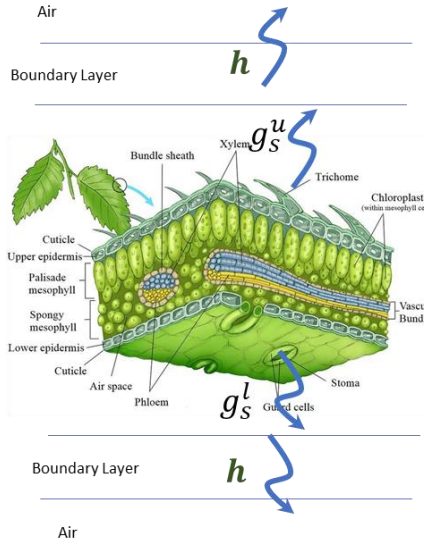


# La transpiration - Principe

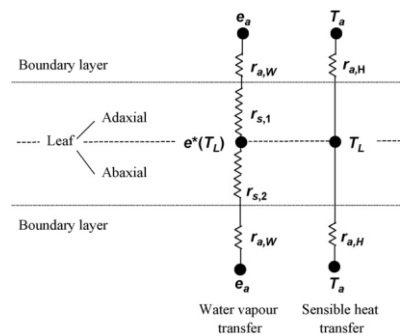
- Régulée par la « plante » - Conductance stomatique  $g_s$   $\lambda_E = a \cdot g_w \cdot (e_{sat}(T) - e_{vap}(T_a))$

Réponse Physiologique ( $g_s$ )

... et physique : couche limite foliaire ( $h$ )



From Coelho, L., J. Silva, et al. (2018)



Analogie Electrique

$$g_w = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{1}{g_s^u}} + \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{1}{g_s^l}}$$

Face supérieure      Face inférieure

Guilioni, L., H. G. Jones, et al. (2008). "On the relationships between stomatal resistance and leaf temperatures in thermography." *Agricultural and Forest Meteorology* **148**(11): 1908-1912.

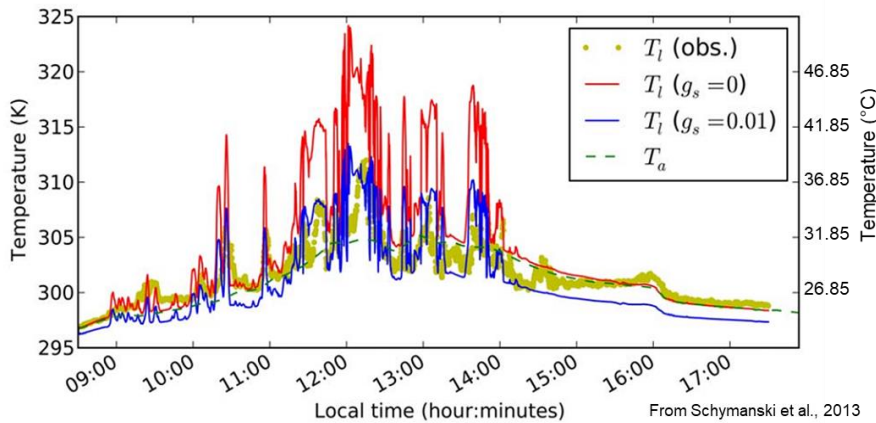


# La transpiration – Rôles chez l'arbre

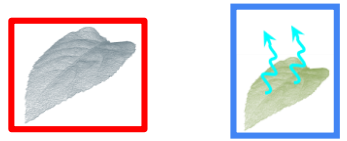
1. Concomitant à l'acquisition de carbone (photosynthèse) – Croissance et maintenance
2. **Régulation essentielle de la température foliaire – Echelle feuille**

Capable de la modéliser via bilan énergie

$$\Delta E = Rn + M + G + C + J + \lambda_E$$

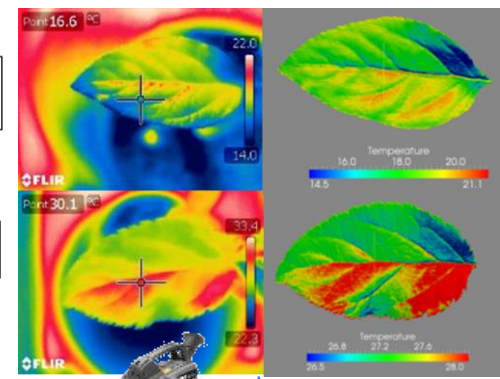
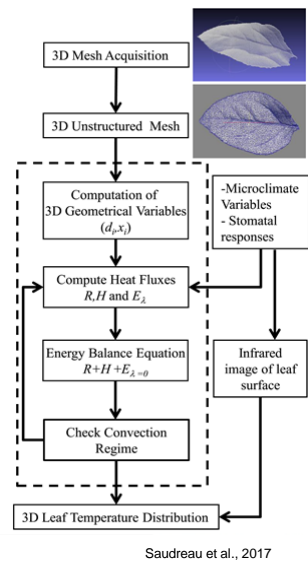


$$T_{\text{sans } Tr} - T_{\text{avec } Tr} \sim 10^{\circ}\text{C}$$



Flux chaleur latente ( $\text{W/m}^2$ )  $\Leftrightarrow \lambda_E = a \cdot g_w \cdot (e_{\text{sat}}(T) - e_{\text{vap}}(T_a))$

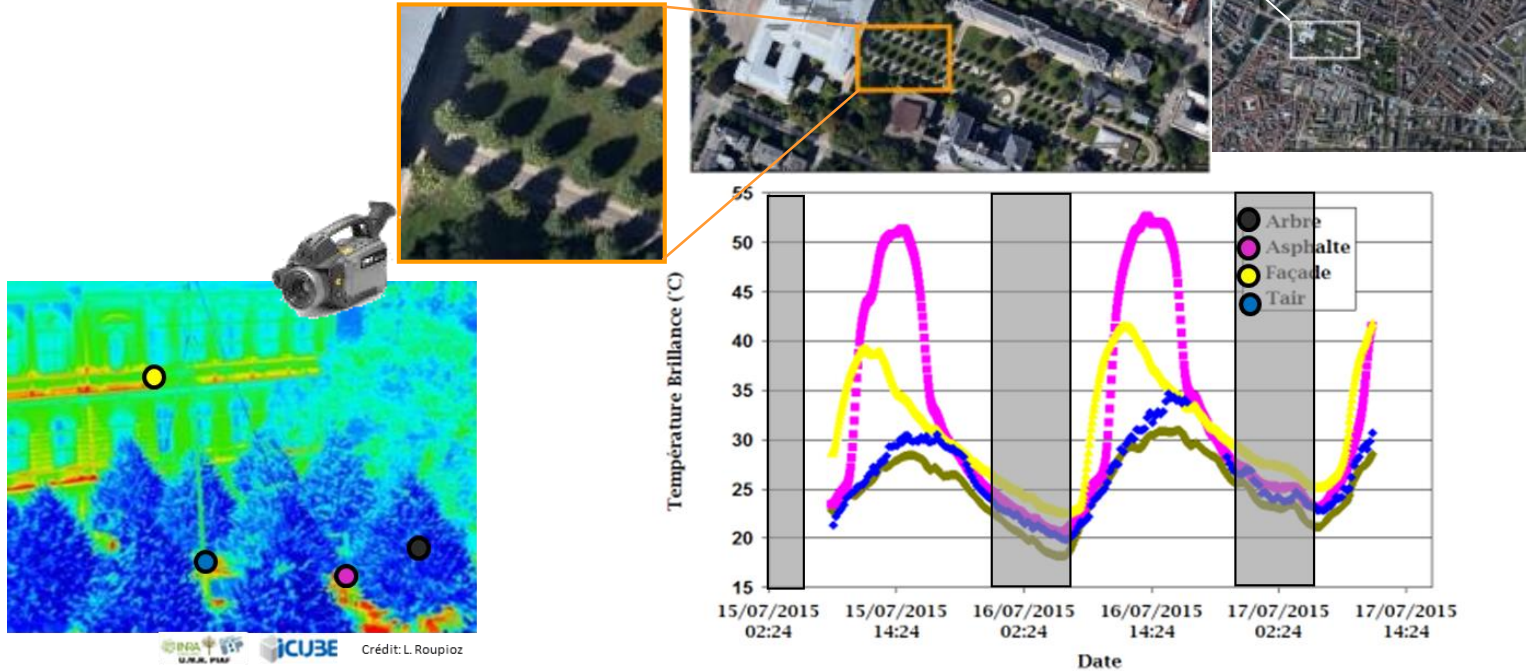
$$T = \text{Température Foliaire}$$



# La transpiration – Rôles chez l'arbre

1. Concomitant à l'acquisition de carbone (photosynthèse) – Croissance et maintenance
2. **Régulation essentielle de la température foliaire**  
– Echelle Canopée

Strasbourg (67)

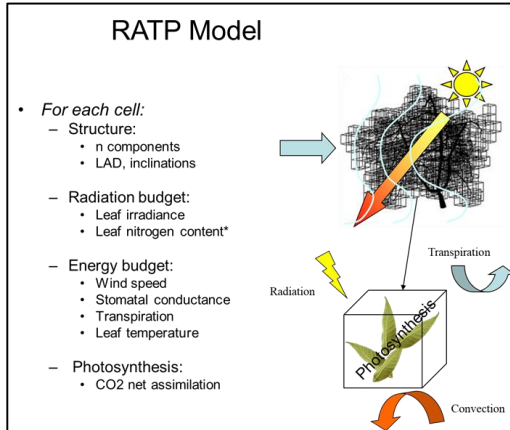


# La transpiration – Rôles chez l'arbre

1. Concomitant à l'acquisition de carbone (photosynthèse) – Croissance et maintenance
  2. Régulation essentielle de la température foliaire
- Echelle Canopée

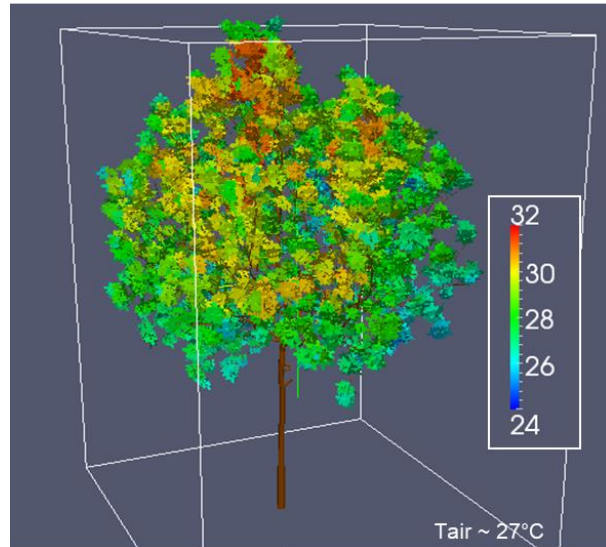
Capable de la modéliser  
via bilan énergie

$$\Delta E = Rn + M + G + C + J + \lambda E$$

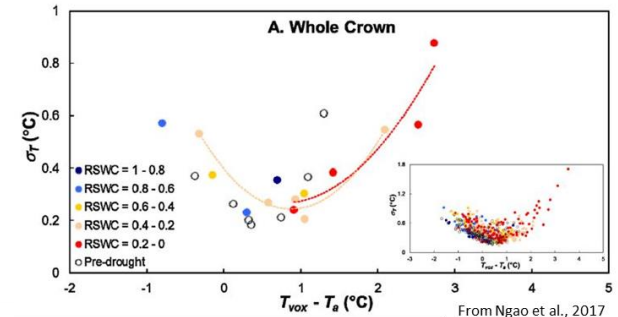
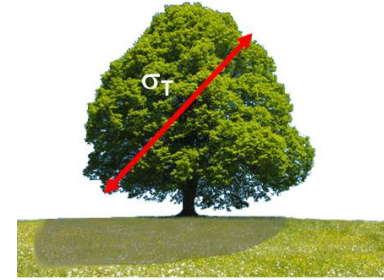


Sinoquet et al. (2001)

Température Foliaire  
Noyer - 147 m<sup>2</sup>

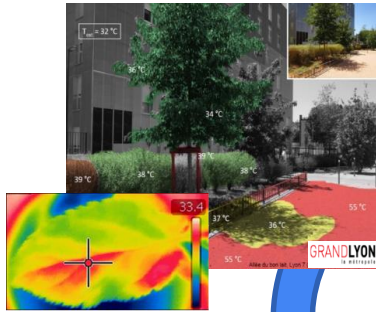


Modèle RATP - Saudreau, pers. comm.



# La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

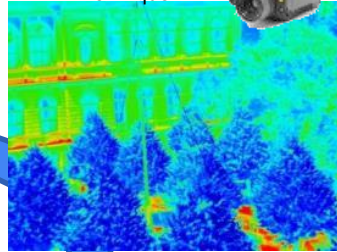
Température de **surface**



Saudreau, Conf. Heteroclim 2014

Température **Radiante**

Caméra InfraRouge Thermique



Crédit: L. Roupioz

Température **Ressentie**

Indices Confort Thermique

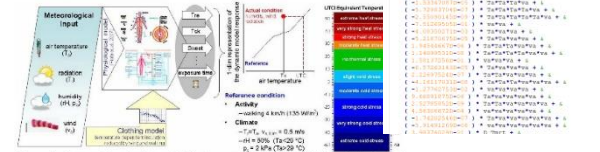


Figure 1: Concept for calculating UTCI of an actual condition, which is defined as air temperature of the reference condition yielding the same dynamic physiological response.

From Bröde, 2010

$$UTCI(T_a, T_r, v_a, p_a) = T_a + \text{Offset}(T_a, T_r, v_a, p_a)$$

+ Rayonnement  
+ Vent  
+ Hygrométrie



Température d'**air**

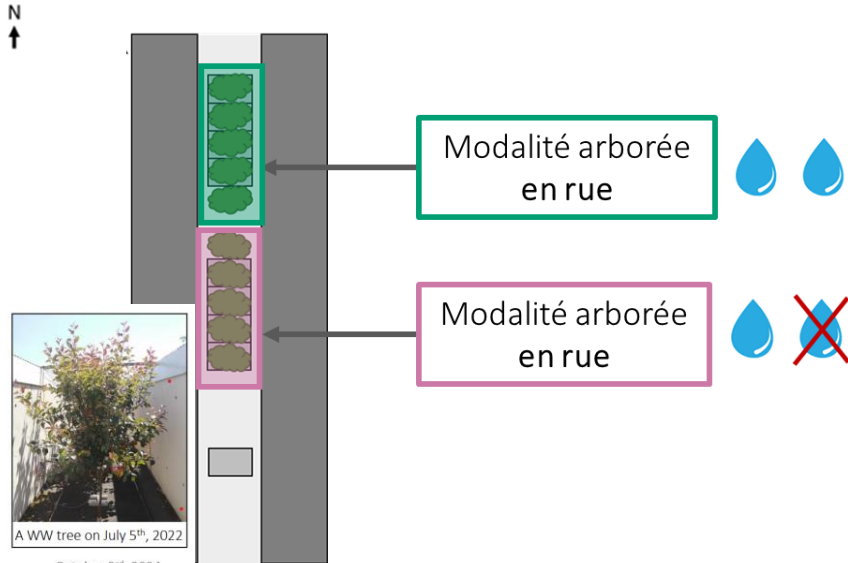


- (1) Ces températures sont corrélées
- (2) Les aménagements arborés vont agir à des degrés divers sur ces températures
- (3) Transpiration arbre rôle sur les températures **radiante** (IRT), **air**, et **ressentie** (IRT, T<sub>air</sub>, HR)

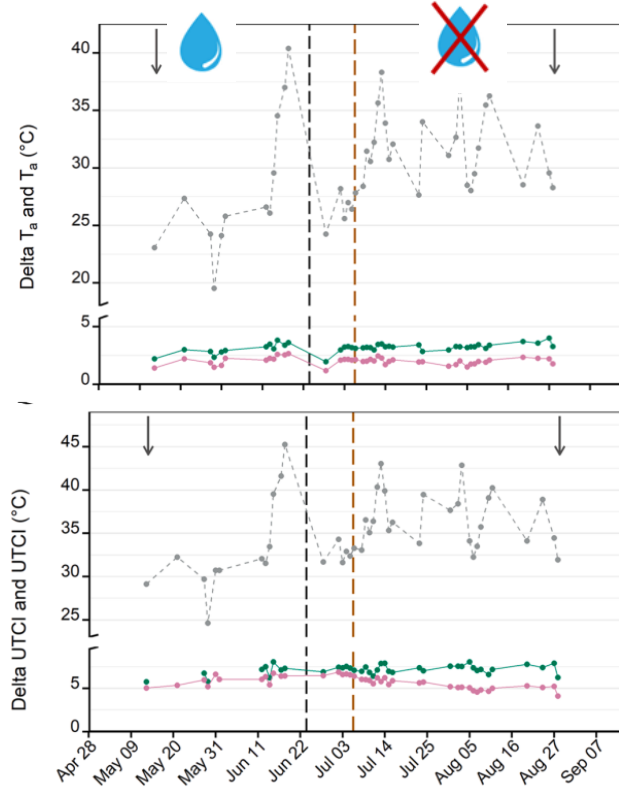
# La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

- Quantification difficile de l'effet direct

Comparaison avec/sans transpiration



Thèse Dorine Canonne, Canonne et al, 2025



Température d'air



Température Ressentie

Indices Confort Thermique

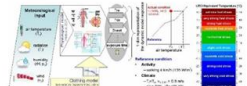


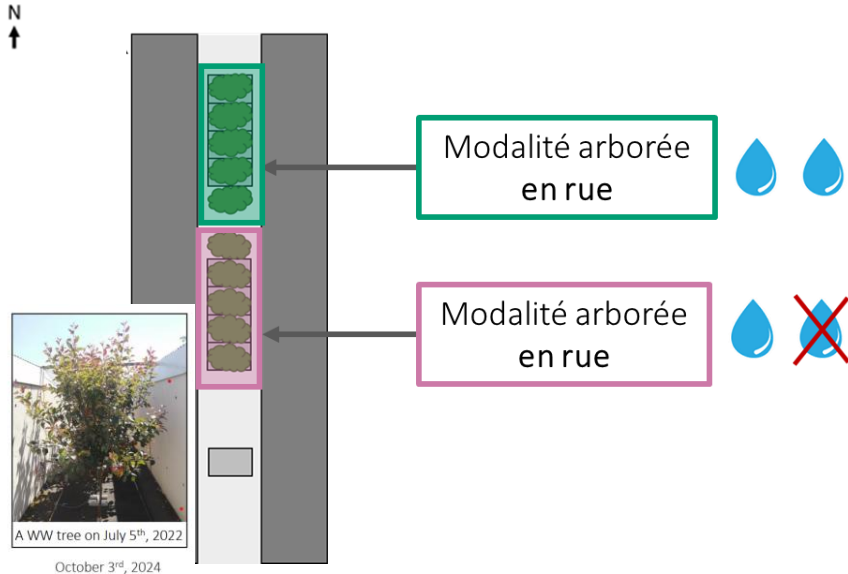
Figure 1: Concept for calculating UTCI of an actual condition, which is defined as air temperature of the reference condition yielding the same dynamic physiological response.



# La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

- Quantification difficile de l'effet direct

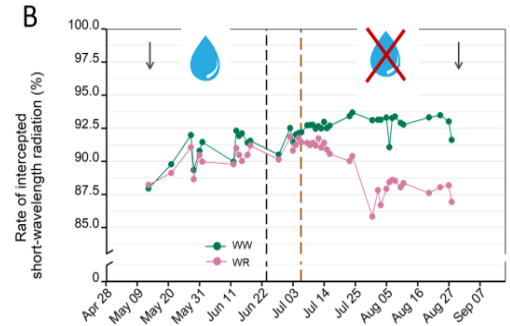
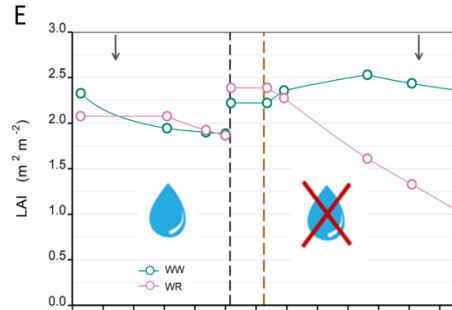
Comparaison avec/sans transpiration



Thèse Dorine Canonne, Canonne et al, 2025



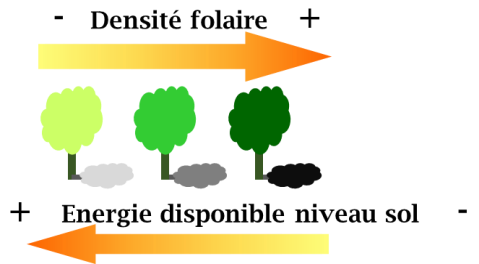
## Effet Indirect via l'ombrage



loi de type Beer-Lambert :

$$R_{abs} = R_{inc} (1 - \exp(-Kc * LAI))$$

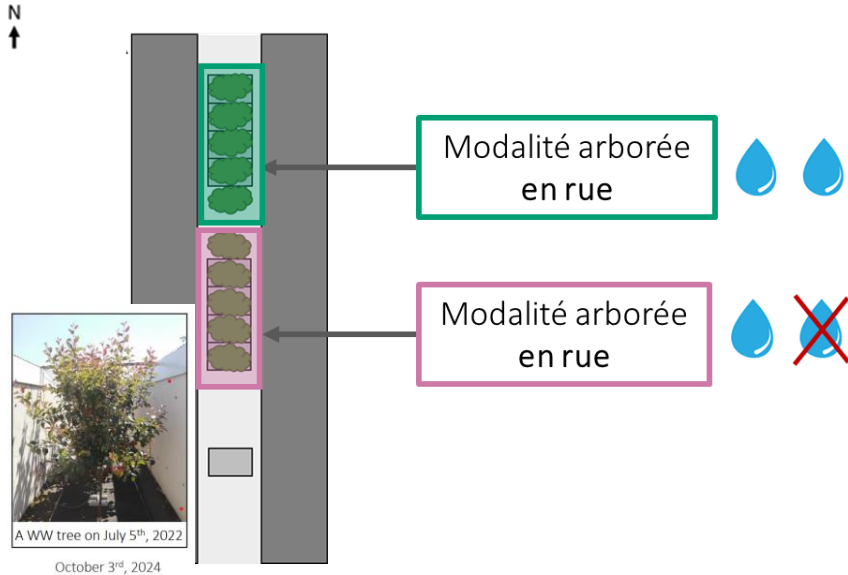
- rayonnement absorbé ( $R_{abs}$ )
- rayonnement solaire incident ( $R_{inc}$ )
- LAI (Leaf Area Index)
- Kc coefficient d'extinction



# La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

- Quantification difficile de l'effet direct

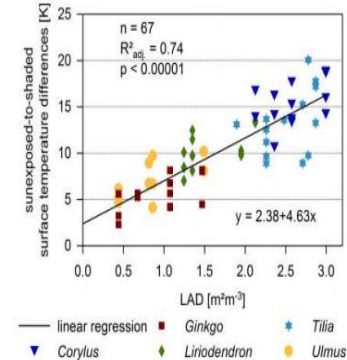
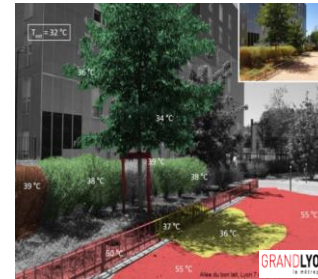
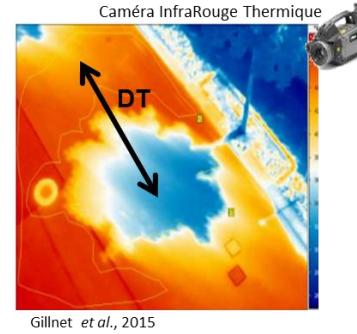
Comparaison avec/sans transpiration



Thèse Dorine Canonne, Canonne et al, 2025



Effet Indirect via l'ombrage



\* LAD = Surface Foliaire Totale/Volume du Houppier



# La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

## Effet sur la température d'air

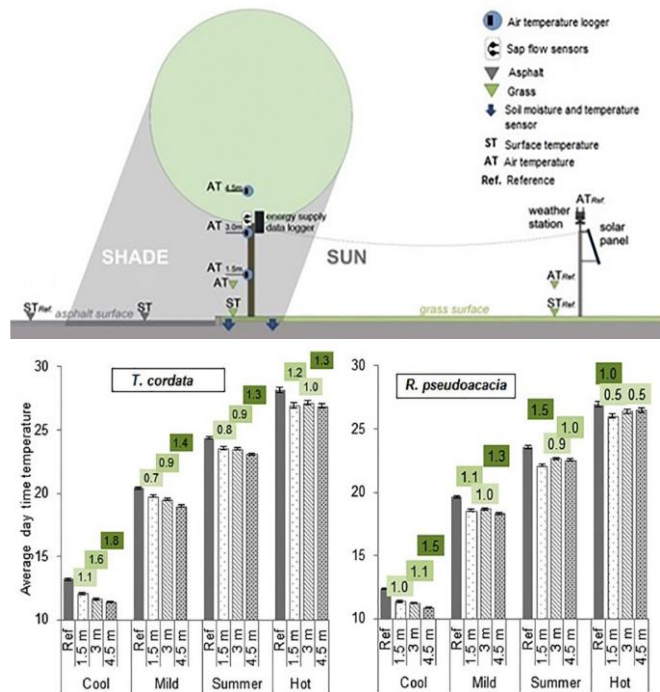


Fig. 8. Average day time (06-21 h) air temperature at reference point, 1.5 m, 3 m and 4.5 m ( $\pm$ SE) from the ground over June, July and August 2016 under the canopies of *T. cordata* and *R. pseudoacacia*. Data labels show the difference of air temperature compared to the reference point (dark green signifies higher cooling effect).

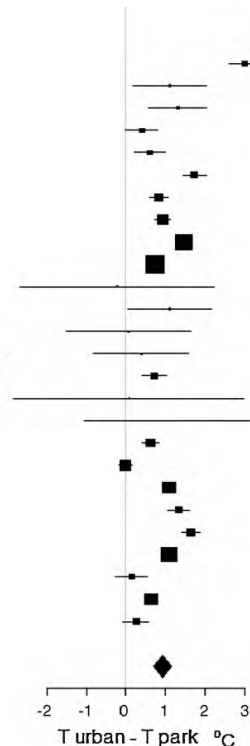
From Rahman et al., 2018

From Bowler et al., 2010

### Study

Barradas 1991 AP  
 Barradas 1991 FV  
 Barradas 1991 LGU  
 Barradas 1991 MP  
 Barradas 1991 TP  
 Ca et al. 1998  
 Chang et al. 2007 61 parks  
 Chen & Wong 2006 BBNP  
 Chen & Wong 2006 CWP  
 Jansson et al. 2007  
 Jauregui 1991  
 Jonsson 2004 Garden lush veg  
 Jonsson 2004 Garden no veg  
 Jonsson 2004 Garden sparse veg  
 Jonsson 2004 Park  
 Kjelgren & Clark 1992  
 Lahme & Bruse 2003  
 Mayer & Hoppe 1987  
 Potchter et al. 2006 A  
 Potchter et al. 2006 B  
 Potchter et al. 2006 C  
 Shahgedanova et al. 1997  
 Thorsson et al. 2007  
 Watkins 2002 BM  
 Watkins 2002 PH  
 Zoulia et al. 2009

### Summary



Impact très local et faible sur la température d'air  
 Diminution ~ 1°C

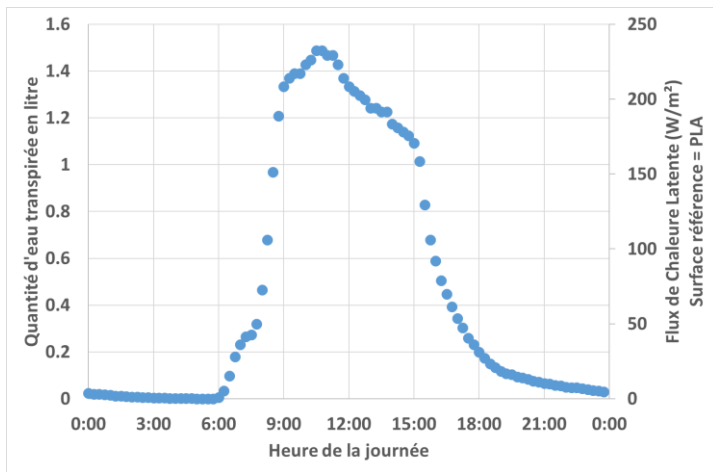
3 raisons principales

1. Valeur du flux
2. Couplé avec l'ombrage
3. Mouvements masse d'air (turbulence – mélange)

# La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

- Flux de chaleur latente – Quantité d'eau évaporée

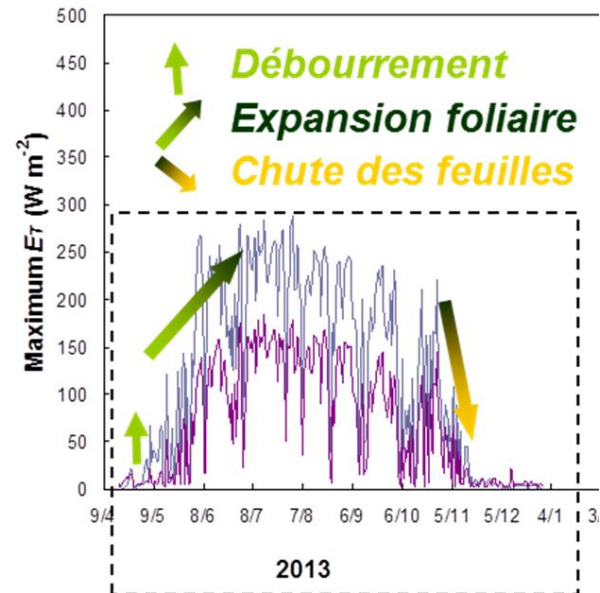
## Strasbourg - Tilleul – 230 m<sup>2</sup> surface foliaire



From Ngao, Pers. Comm.

- Consommation journalière ~ 45 L
  - $\lambda_E$  - Flux Maximal ~ 200 W.m<sup>-2</sup> (surface projetée au sol)
- A comparer aux 900 W.m<sup>-2</sup> incidents (rayonnement)

- Variabilité temporelle importante



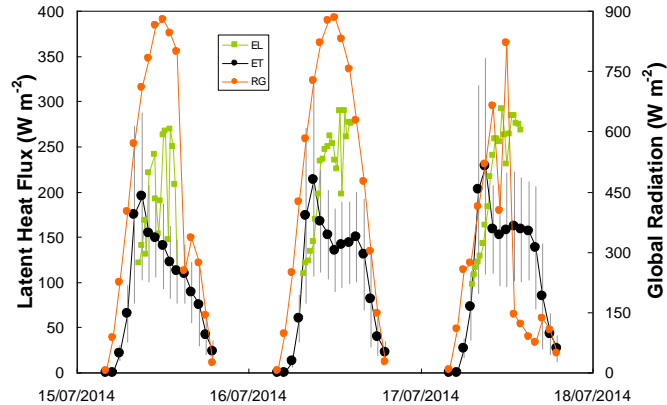
From Ngao et al. ICUC 2015



# La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

- Flux de chaleur latente – Quantité d'eau évaporée

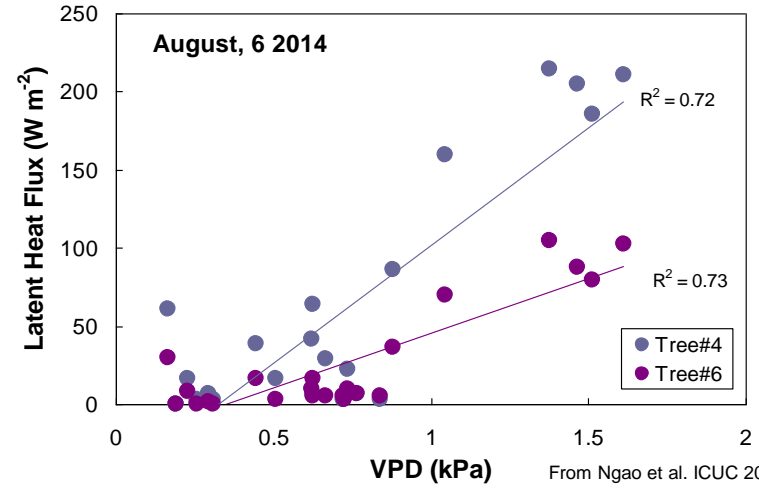
## Strasbourg - Tilleul – 230 m<sup>2</sup> surface foliaire



From Ngao et al. ICUC 2015

- Consommation journalière ~ 45 L
  - $\lambda_E$  - Flux Maximal ~ 200 W.m<sup>-2</sup> (surface projetée au sol)
- A comparer aux 900 W.m<sup>-2</sup> incidents (rayonnement)

$$\lambda_E = a.g_w.(e_{sat}(T) - e_{vap}(T_a))$$



From Ngao et al. ICUC 2015

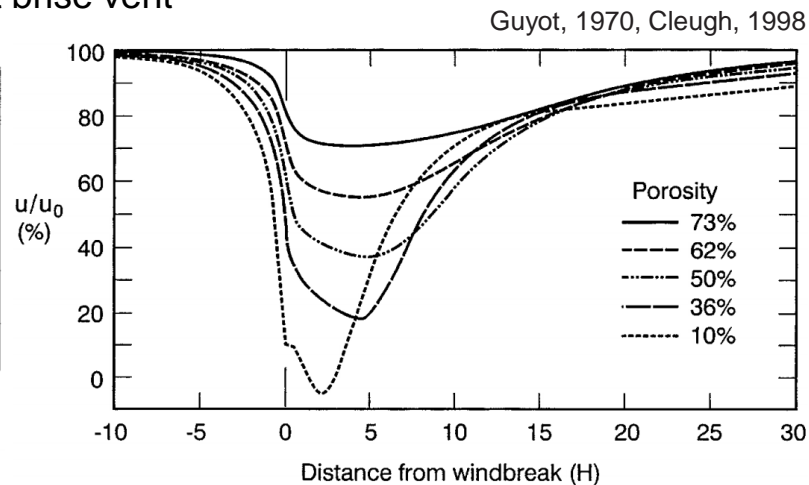
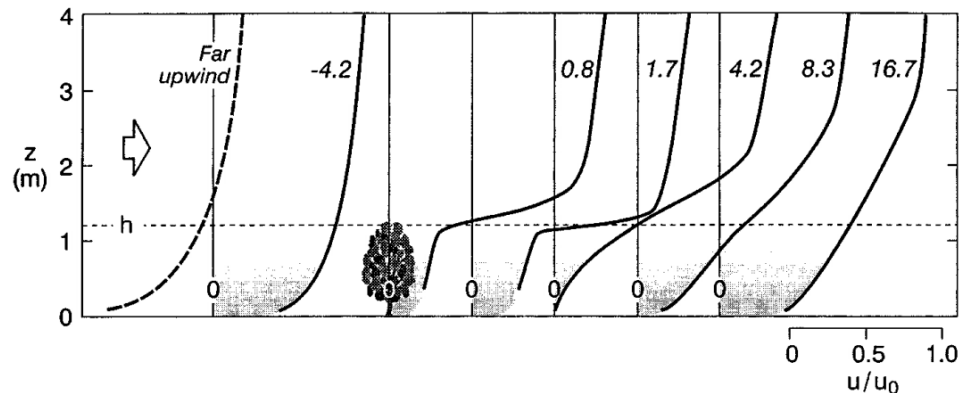
- Piloté par le VPD ~ (e<sub>sat</sub> - e<sub>vap</sub>)

$$\lambda_E = a.g_w.(e_{sat}(T) - e_{vap}(T_a))$$



- **Distance effective de rafraîchissement ?**

- Notion de transport - Mouvement masse d'air - Effet brise vent



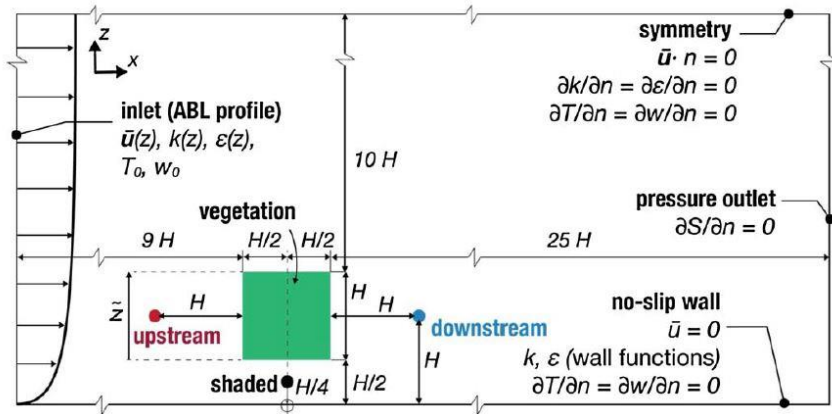
- **Effet brise-vent** bien documenté

Perceptible sur une **distance < 20 Hauteur du houppier**

Dépendance forte à la **structuration** du houppier – **Porosité**

- Quid sur le **rafraîchissement** et le **ressenti** ?

- Distance effective de rafraîchissement ? Echelle Canopée



From L. Manickathan et al., 2018

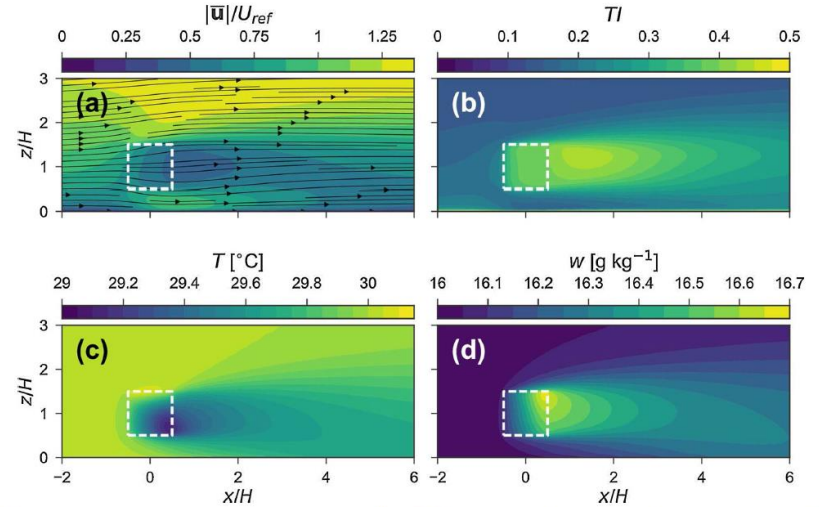
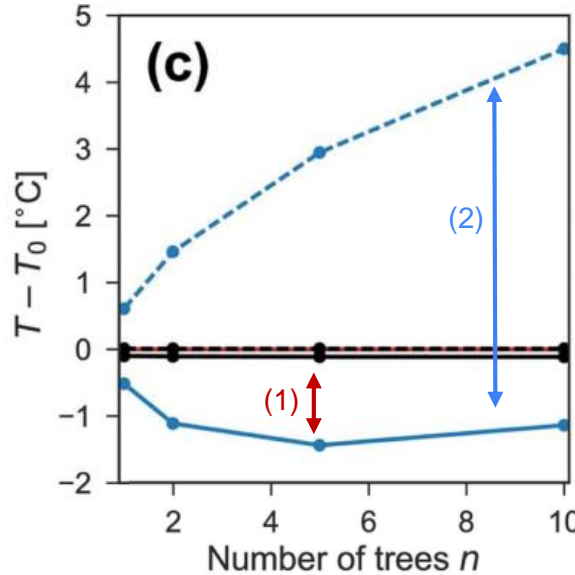
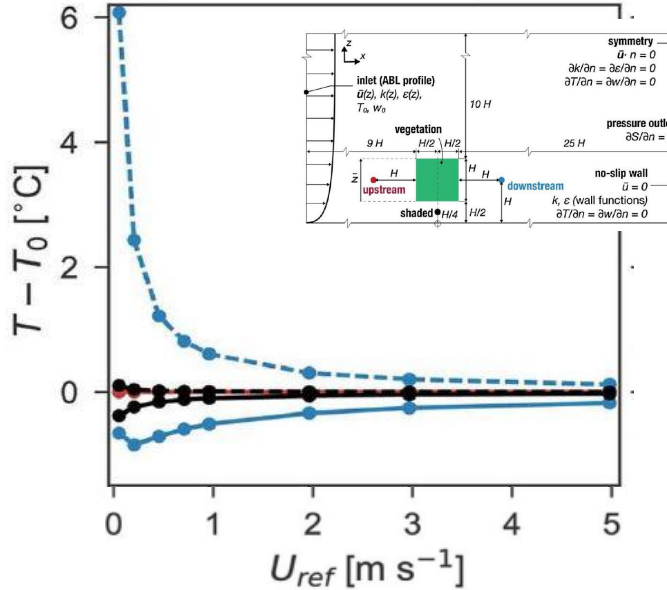


Fig. 6. Flow field past a single row of trees for the reference case with domain described in Fig. 2, with  $r_s = r_{s,min}$  and environmental and tree properties tabulated in Tables 1 and 2, respectively. a) Normalized velocity  $|\bar{u}|/U_{ref}$ , b) turbulence intensity  $TI = \sqrt{2/3 \cdot k}/|\bar{u}|$  c) air temperature  $T [^{\circ}C]$  and d) humidity ratio  $w [g\ kg^{-1}]$ .

# La transpiration - Rafraîchissement urbain

## ● Distance effective de rafraîchissement ? Echelle Canopée

From L. Manickathan et al., 2018



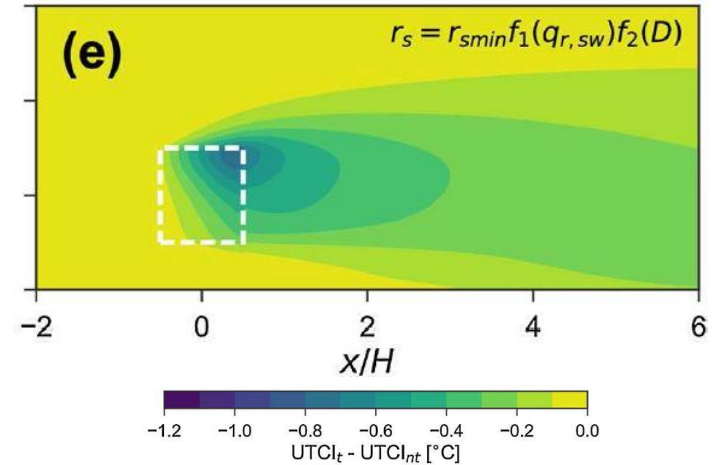
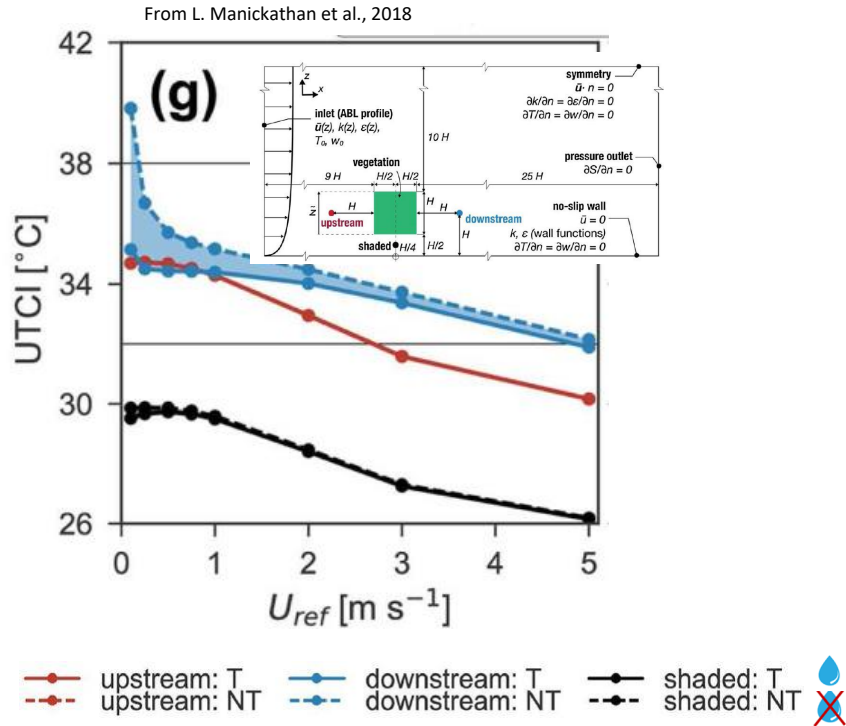
- upstream: T    ● downstream: T    ● shaded: T    ● (with blue drop icon)
- upstream: NT    ● downstream: NT    ● shaded: NT    ● (with red X icon)

- **Transpiration a un effet faible** sur la température d'air (1)
- **Transpiration a un effet fort** sur la température de l'air vs arbre qui **ne transpire pas** (2)
- **Augmenter la surface foliaire** permet de **renforcer** l'effet (3)



**Transpiration est nécessaire**  
(absorbe partie énergie)

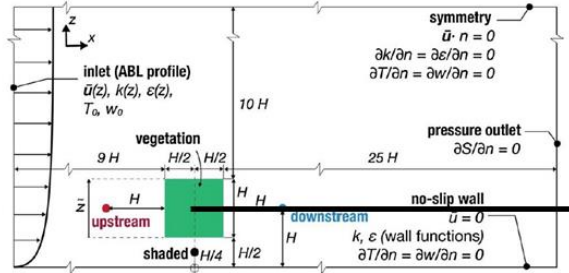
## ● Distance effective de rafraîchissement ? Echelle Canopée



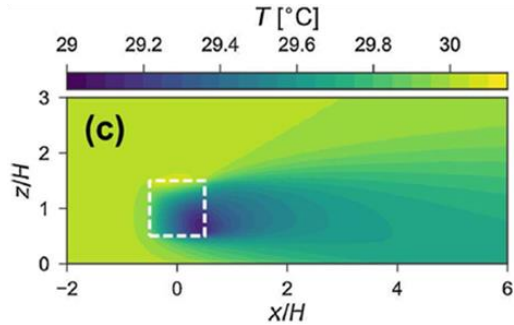
- **Transpiration a un effet à courte distance**
- **Transpiration a un effet fort vs arbre qui ne transpire pas**

# La transpiration - Rafraîchissement urbain

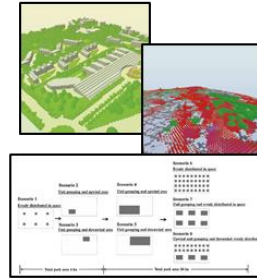
- **Distance effective de rafraîchissement ?**
- Approches **spatialisées** et **couplées**: écoulement et bilan énergie / différentes échelles



From L. Manickathan et al., 2018



RANS



EnviMET - From Lin et al., 2016

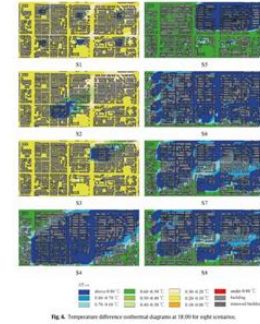
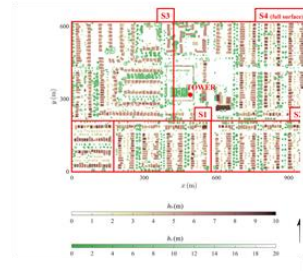
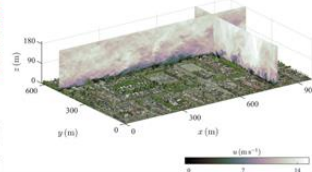


Fig. 6. Temperature difference contour diagrams at 18:00 for eight locations.

LES



From Giometto et al., 2017



# La transpiration - Rafraîchissement urbain

- **Distance effective de rafraîchissement ?**
- Approches **spatialisées** et **couplées**: **écoulement** et **bilan énergie / différentes échelles**

Températures nocturnes – Pas de transpiration

(a) *Z. serrata*



(b) *C. camphora*

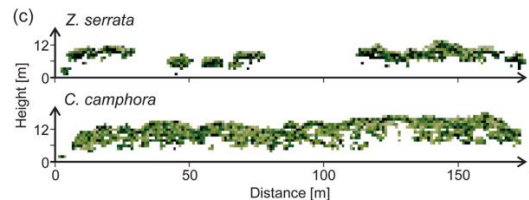
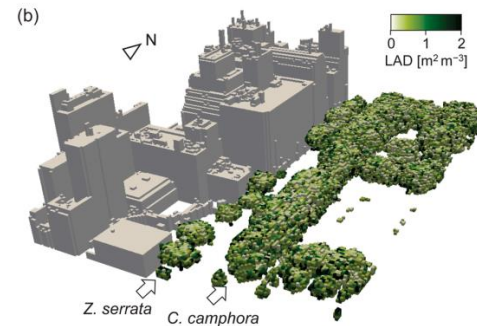
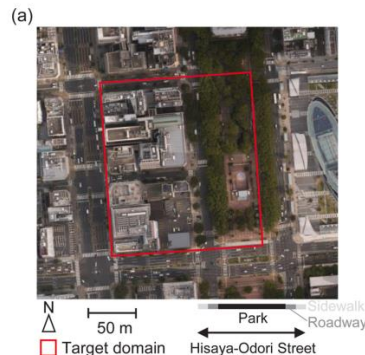


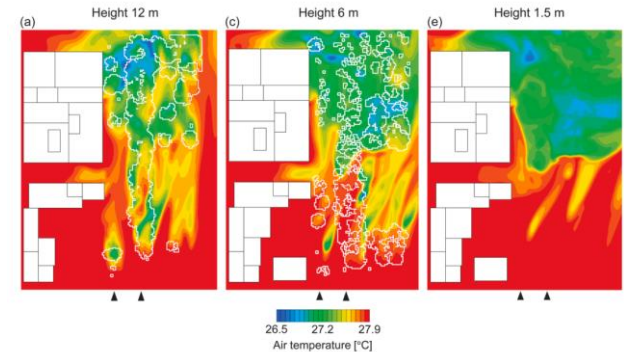
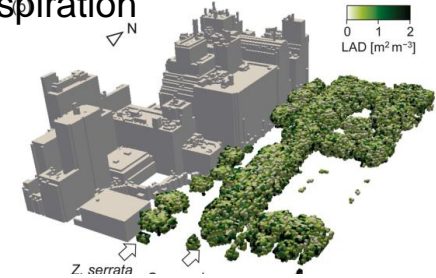
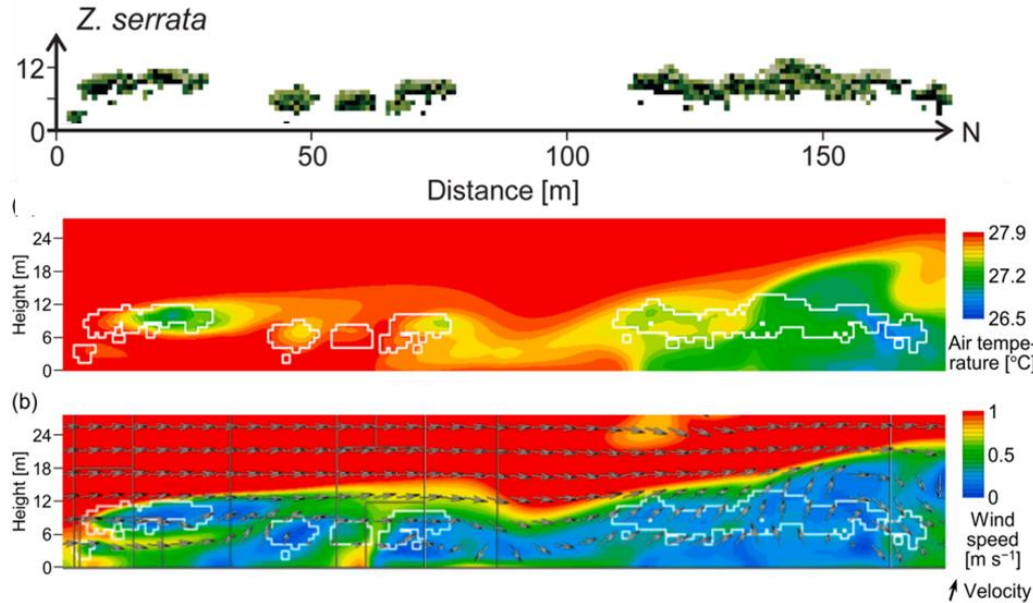
Fig. 2. Photograph (left) and voxel model (right) of isolated trees: (a) *Z. serrata*; (b) *C. camphora*.

From Oshio et al., 2021

# La transpiration - Rafraîchissement urbain

- **Distance effective de rafraîchissement ?**
- Approches **spécialisées** et **couplées**: **écoulement** et **bilan énergie / différentes échelles**

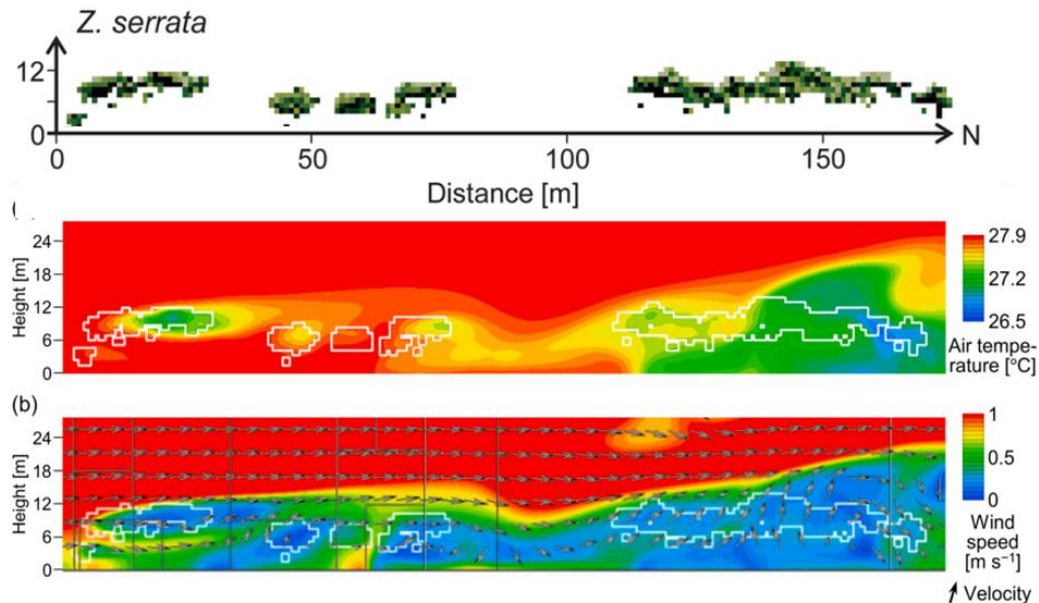
Températures nocturnes – Pas de transpiration



# La transpiration - Rafraîchissement urbain

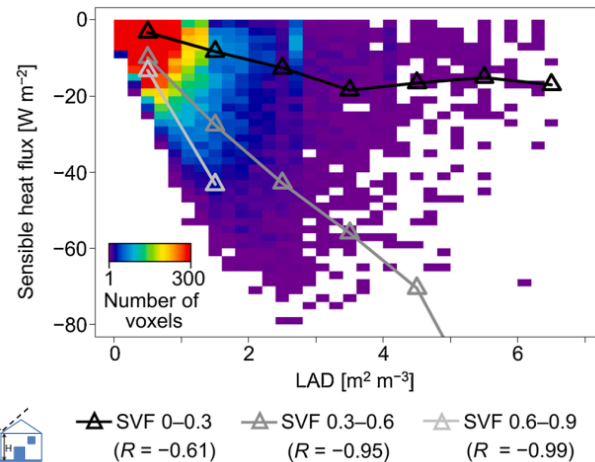
- **Distance effective de rafraîchissement ?**
- Approches **spatialisées** et **couplées**: **écoulement** et **bilan énergie / différentes échelles**

Températures nocturnes – Pas de transpiration



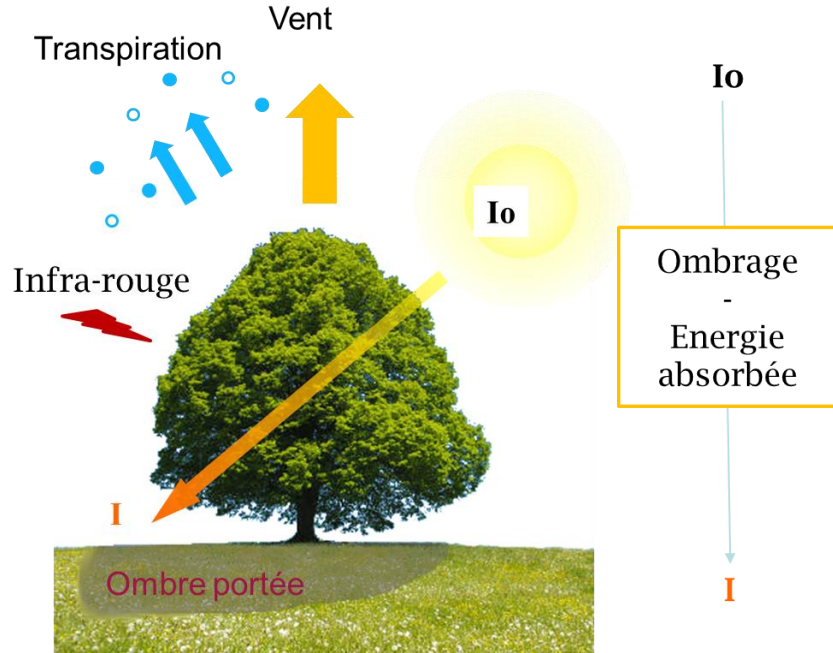
## Effets Densité Foliare et SVF

(b) *C. camphora*

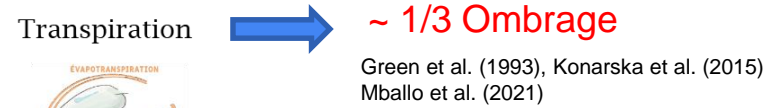


# La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

## Flux de chaleur latente – Résumé



## ● Une question de bilan d'énergie !



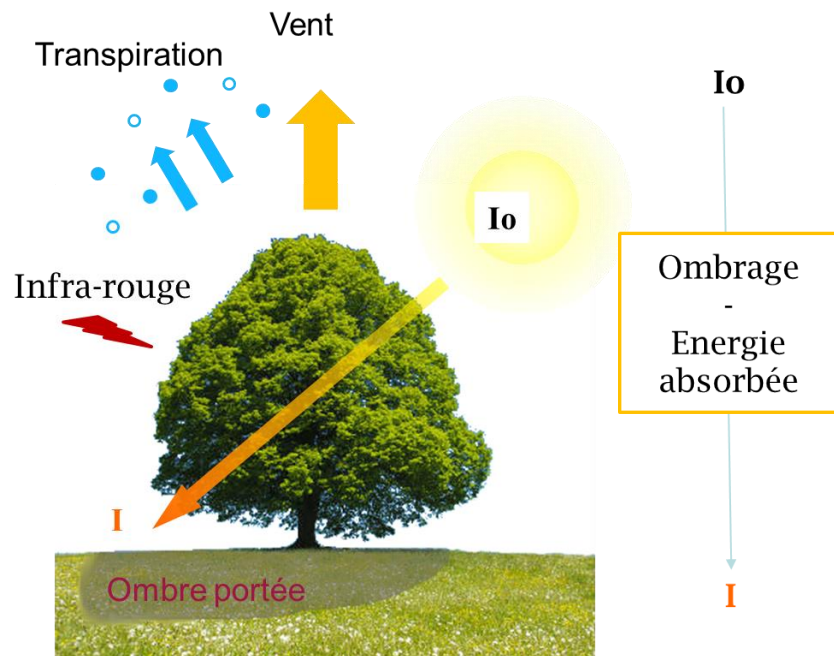
Green et al. (1993), Konarska et al. (2015)  
Mballo et al. (2021)

Ratio variable

- Essences (fct stomatique)
- Vent (vitesse)
- Disponibilité en eau

# La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

## Flux de chaleur latente – Résumé

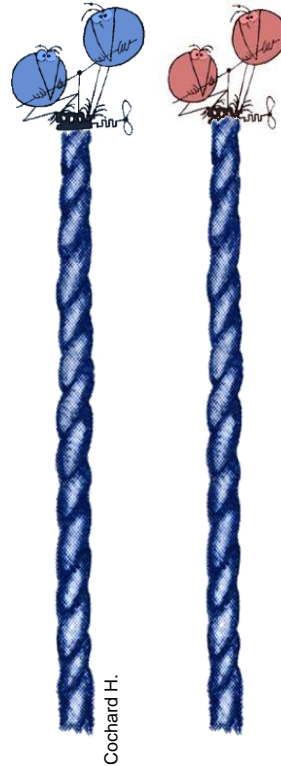
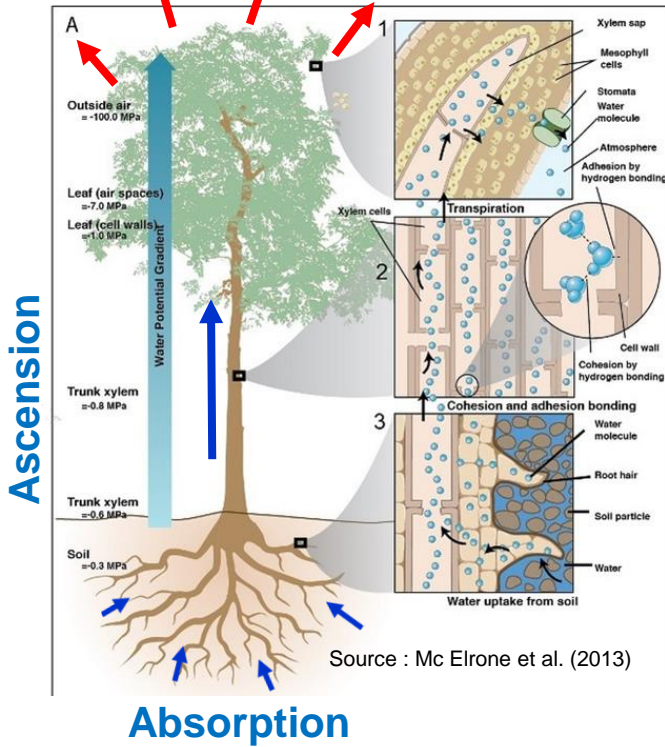


## ● Une question de bilan d'énergie !

- Ombrage très **efficace** = Limite le stockage énergie et donc **l'ICU** (réchauffement **nocturne**)
- Transpiration a un **effet faible** sur la baisse des températures mais il est **nécessaire** :
  1. Absorber une partie de de l'énergie (~ 30%) sinon évacuée vers l'atmosphère la journée (réchauffement **diurne**) – **Limite la surchauffe**
  2. **Pérennité** de l'arbre et des services (ombrage !)

# La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

## Evaporation/Transpiration



- Un système **vulnérable** aux **sécheresses**

## Cavitation / Embolie

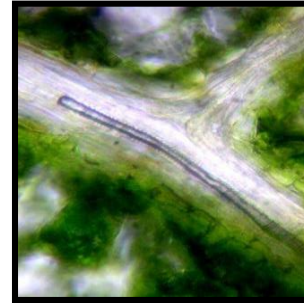


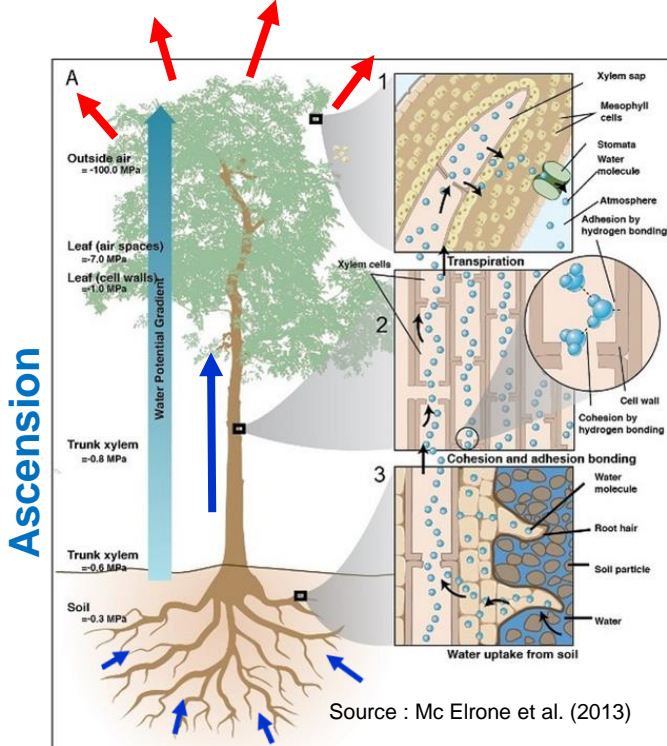
Photo Cochard H.

Sève sous tension dans les vaisseaux du xylème ( $\Psi \ll 0s$ )

- Survie de l'arbre ?
- Pérennité des services écosystémiques rendus (lutte contre ICU) ?

# La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

## Evaporation/Transpiration



## Absorption

### Lutte contre l'ICU

### Lutte pour sa survie

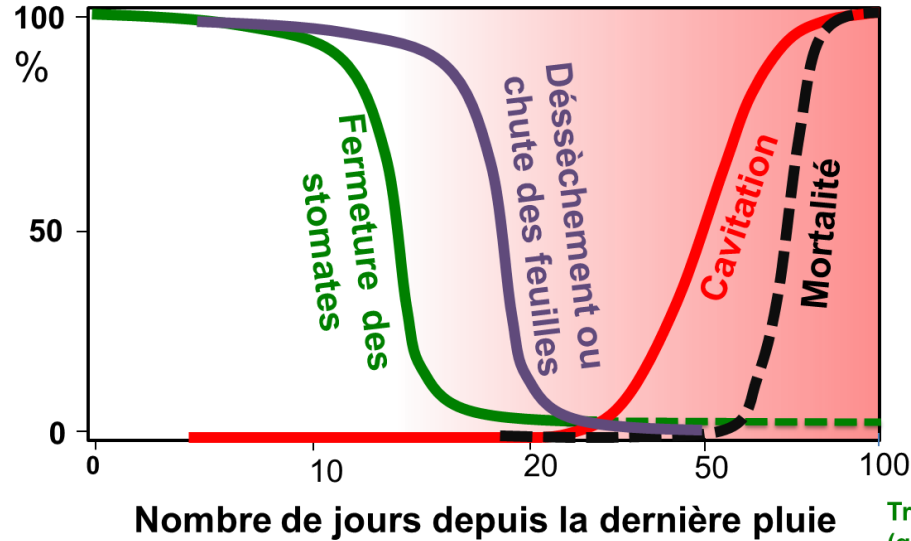
Confort  
croissance

Contrôle  
réversible

Vulnérabilité  
réversible mais  
arbre affaibli

Survie  
Descentes  
de cimes

Mortalité



- Ressource en eau primordiale / Contrainte en ville

# La transpiration – Verrous

- Principes connus mais couplage fort avec la structure du couvert et l'environnement (atmosphère – sol) - **Interactions arbres/ville complexes** (3D, temporalités)

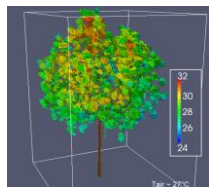
- Verrous** actuels

- **Caractériser la « variabilité »** en milieu urbain – **Spatiale et temporelle**

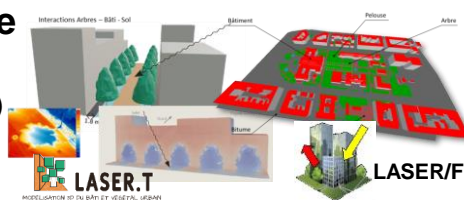
- Mesures in situ / base de données sur la **physiologie** arbres urbains  
Capteurs/monitoring - **Phénologie** - **Vulnérabilité aux stress**

- Structure et typologie** urbaine: bâti et **végétation** (hauteur, Surface Foliaire, LAD) - Télédétection / Lidar mobile ou drone

- Développement d'outils de **modélisation intégrée** (sol/plante/atmosphère)



**Infra-rouge thermique**  
**Stress hydrique**  
(édaphique et atmosphérique)



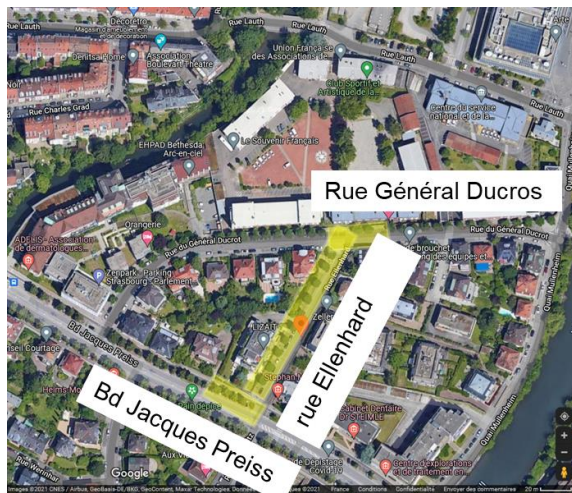
**ENVI-MET**  
From One Click Ltd

PepiPIAF



# La transpiration – ANR TIR4sTREEt (2022 – 2026 / ANR- 21 CE 22 0021)

→ mieux comprendre et caractériser la contribution des **arbres urbains** (Tilleuls, Micocouliers, Platanes) au **rafraîchissement** de l'environnement au sein de 3 rues.



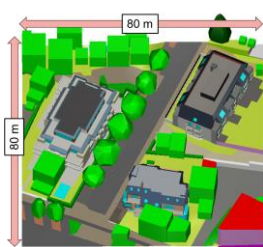
Zone d'étude



Etude du **fonctionnement physiologique** de 3 espèces d'arbres et production d'une **base de données** avec mesures micro-climato, éco-physio, 3D, mesures IRT sur arbres et bâtiments



Méthodologie de **recalage de géométrie 3D** et **température** de surface bâti et arbres (Lidar)



**Simulations** de rues **végétalisées** – Actuelles et scénarios



<https://trio-climatologie-strasbourg.fr/>

# *Les arbres – Fonctionnement et rafraîchissement urbain*

Marc Saudreau  
[marc.saudreau@inrae.fr](mailto:marc.saudreau@inrae.fr)

Merci pour votre attention