

L'évapotranspiration des arbres et son rôle dans le rafraîchissement urbain

Marc Saudreau

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



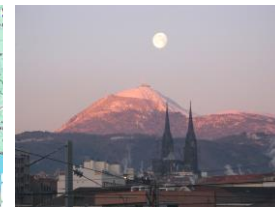
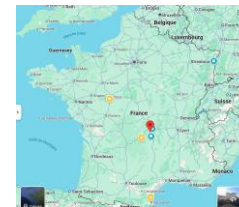
Tempêtes



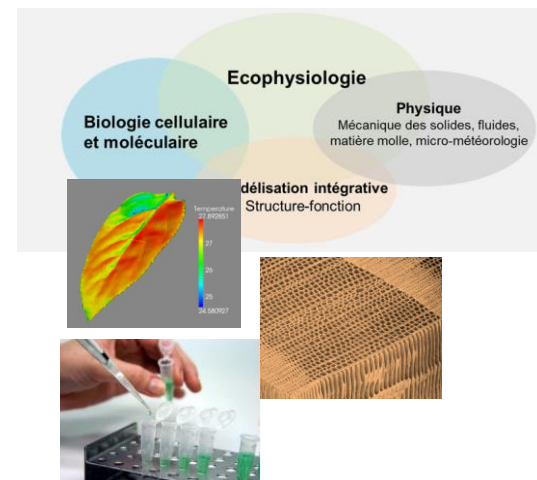
Fortes températures



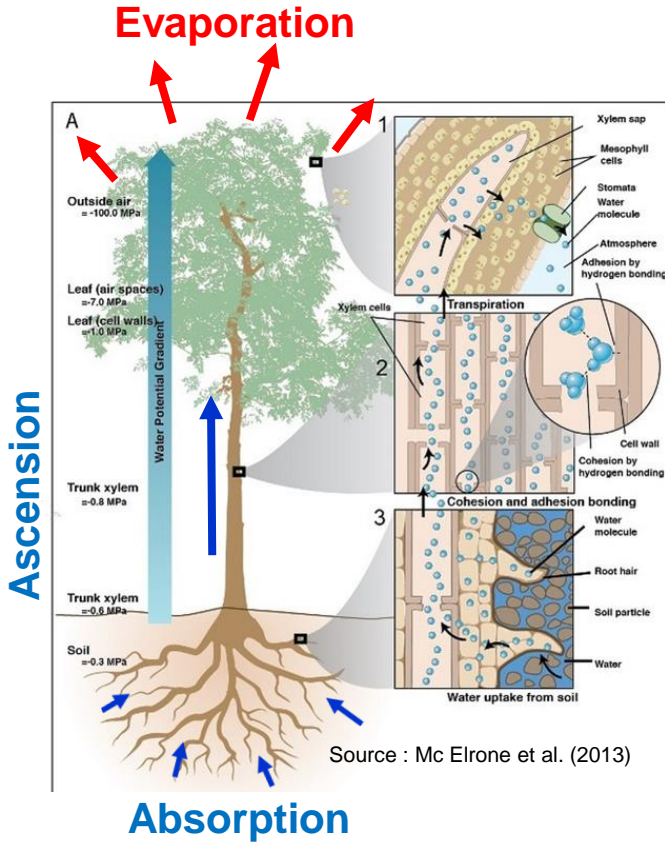
Gelées tardives



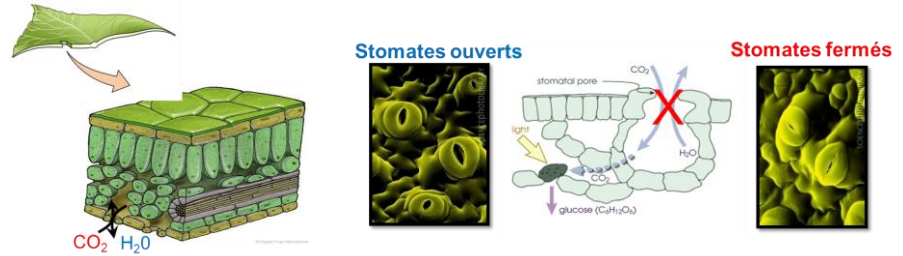
Unité Interdisciplinaire
(~ 60 personnes)



La transpiration - Principe

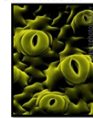


- Site d'évaporation de l'eau = chambres sous stomatiques



- Le **moteur** du mouvement = la colonne d'eau est « tirée » vers le haut – Demande climatique

Flux chaleur latente (W/m²) $\Leftrightarrow \lambda_E = a g_w (e_{sat}(T) - e_{vap}(T_a))$

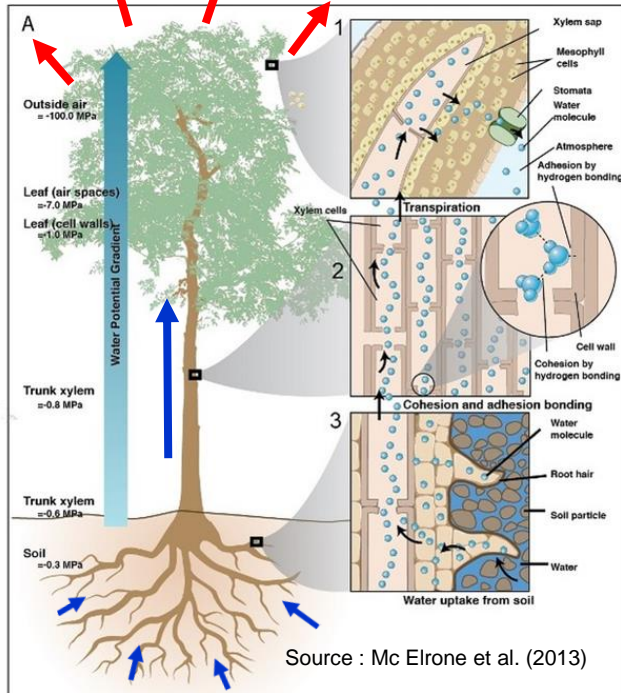


Réponse Physiologique (g_s)
Couche limite (h)

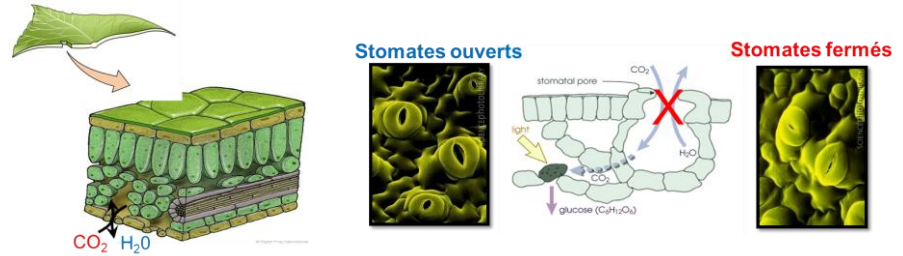
Demande climatique
(HR, Température air)

La transpiration - Principe

Evaporation



- Site d'évaporation de l'eau = chambres sous stomatiques



- Le **moteur** du mouvement = la colonne d'eau est « tirée » vers le haut – Demande climatique

Flux chaleur latente (W/m²) $\Leftrightarrow \lambda_E = a \cdot g_w \cdot (e_{sat}(T) - e_{vap}(T_a))$

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

Absorption

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)

Etat hydrique

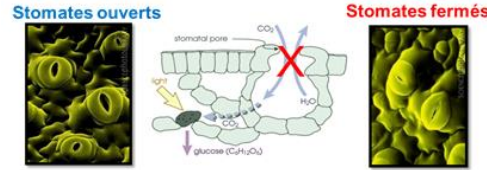
Stress hydrique
 $g_s \rightarrow 0$



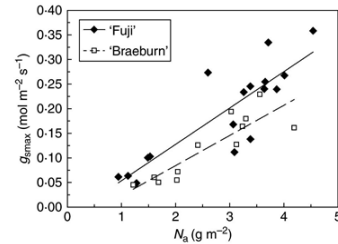
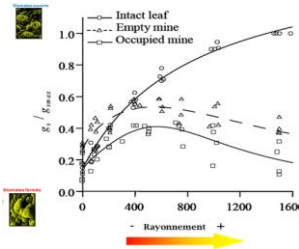
Lien fort avec le sol et le système racinaire



Demande climatique

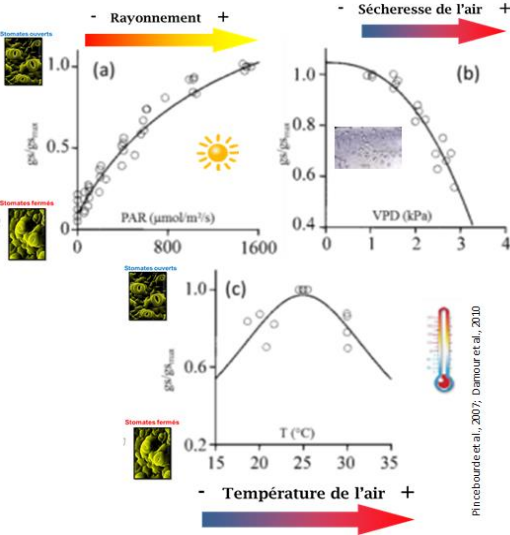


Etat Sanitaire / Physiologique



Maladies - Ravageurs
 $g_s \downarrow$

Azote foliaire
 $g_s \uparrow$ avec N

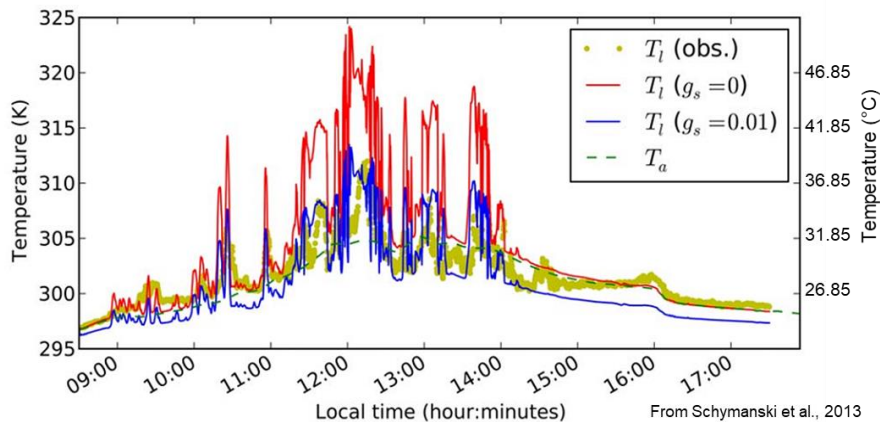


La transpiration – Rôles chez l'arbre

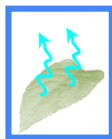
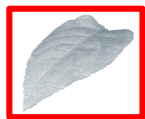
1. Concomitant à l'acquisition de carbone (photosynthèse) – Croissance et maintenance
2. Régulation essentielle et efficiente de température foliaire – Echelle feuille

Capable de la modéliser via bilan énergie

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

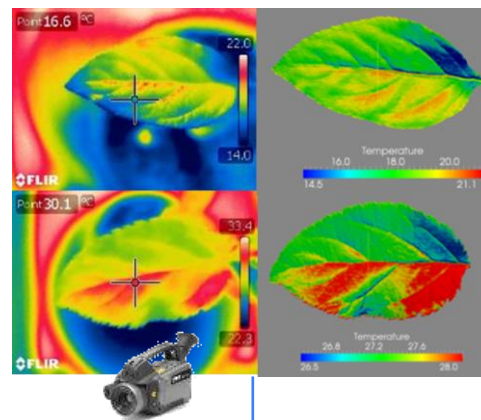
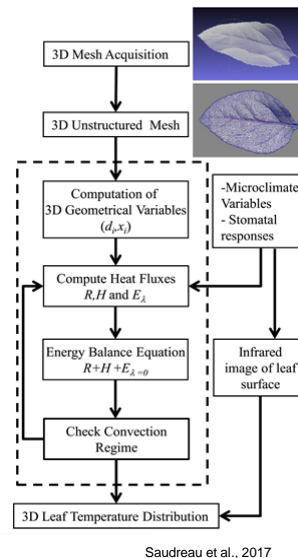


$T \text{ sans évap} - T \text{ avec évap} \sim 10^\circ\text{C}$



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

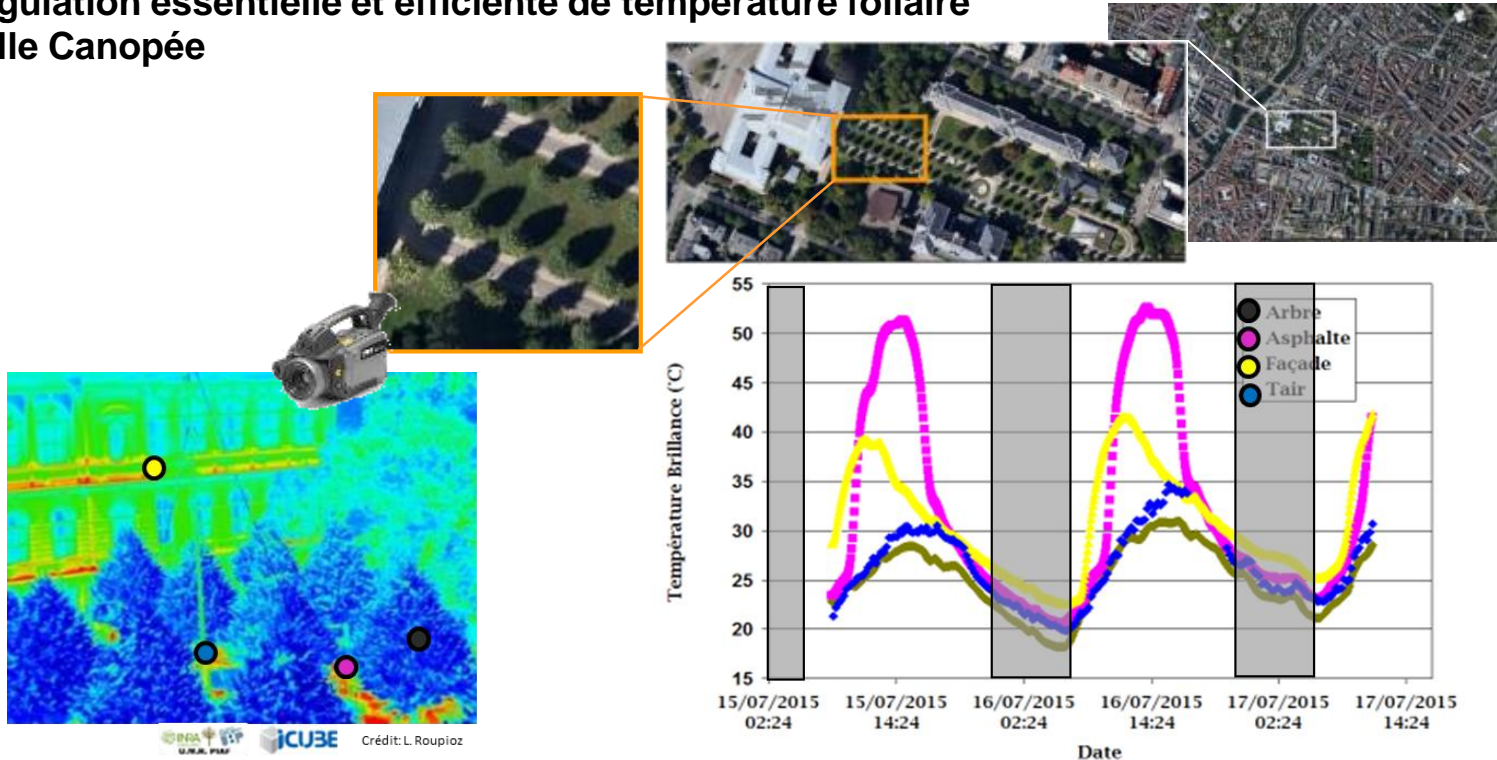
$T = \text{Température Foliaire}$



La transpiration – Rôles chez l'arbre

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

Strasbourg (67)



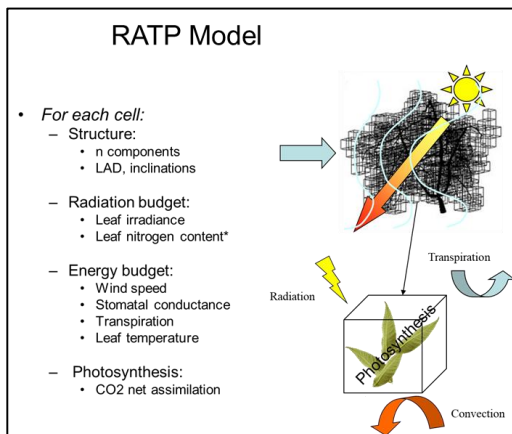
INRAE U.S.R. PAF ICUBE Crédit: L. Roupioz

La transpiration – Rôles chez l'arbre

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

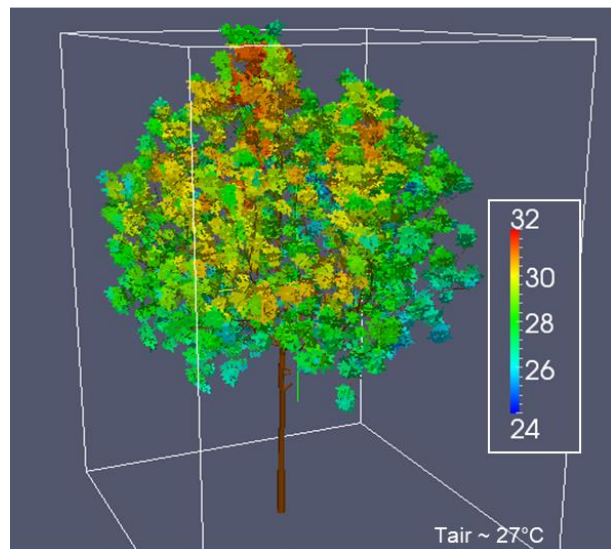
Capable de la modéliser
via bilan énergie

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

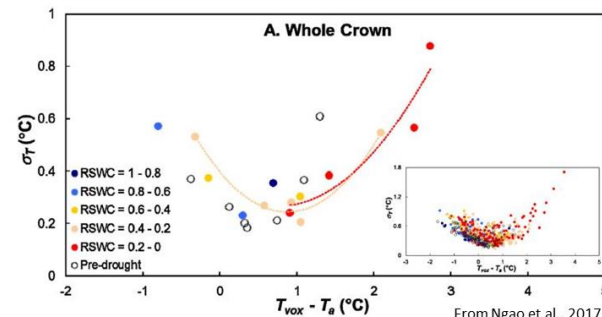
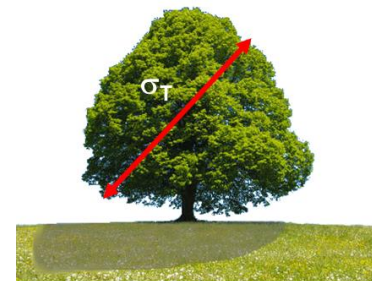


Sinoquet et al. (2001)

Température Foliaire
Noyer - 147 m²



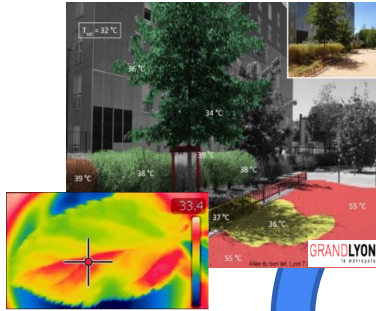
Modèle RATP - Saudreau, pers. comm.



From Ngao et al., 2017

La transpiration - Rafrâchissement urbain ?

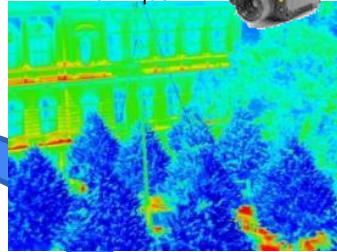
Température de **surface**



Saudreau, Conf. Heteroclim 2014

Température **Radiante**

Caméra InfraRouge Thermique



Crédit: L. Roupioz



Température d'**air**



+ Rayonnement
+ Vent
+ Hygrométrie



Température **Ressentie**

Indices Confort Thermique

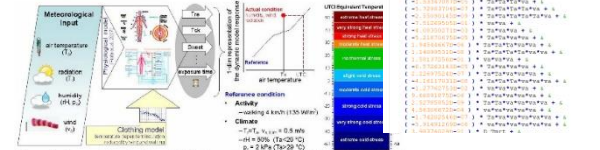


Figure 1: Concept for calculating UTCI of an actual condition, which is defined as air temperature of the reference condition yielding the same dynamic physiological response.

From Brède, 2010

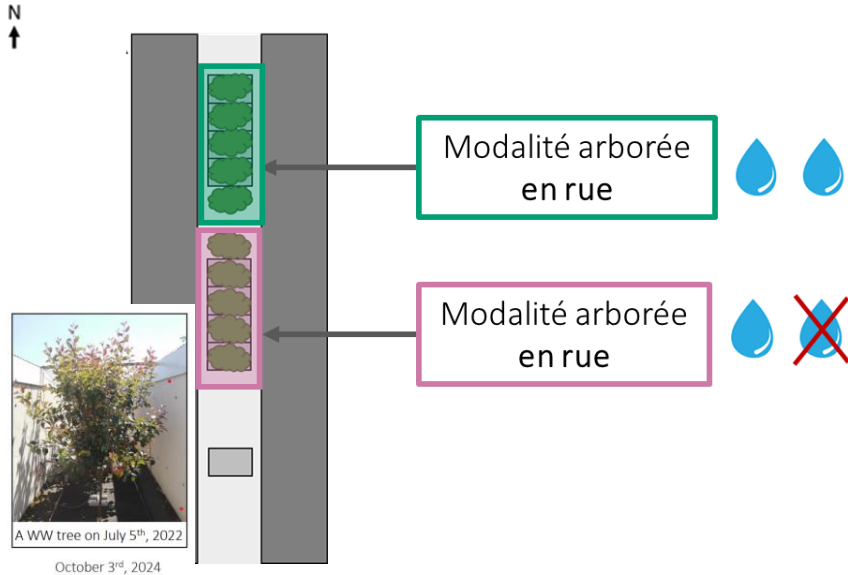
$$UTCI(T_a, T_r, v_a, p_a) = T_a + \text{Offset}(T_a, T_r, v_a, p_a)$$

- (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_{air}, HR)

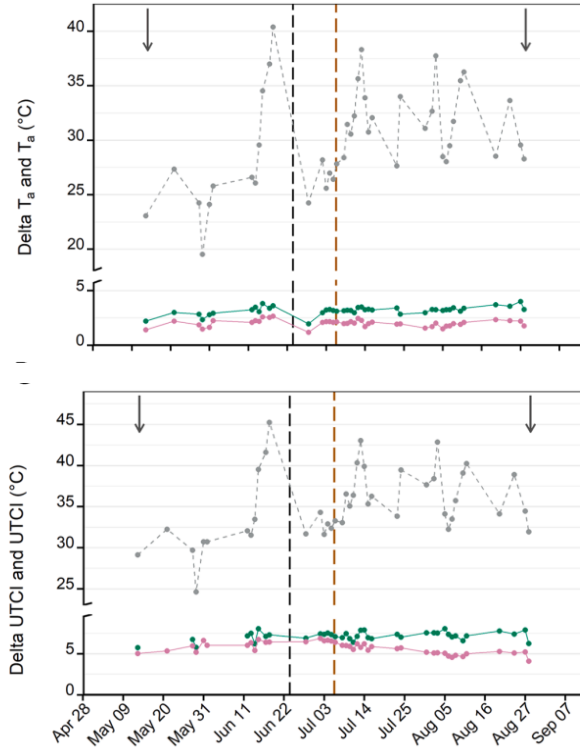
La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

- Quantification difficile de l'effet direct

Comparaison avec/sans transpiration



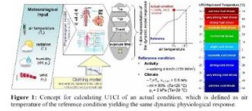
Thèse Dorine Canonne, Canonne et al, 2025



Température d'air



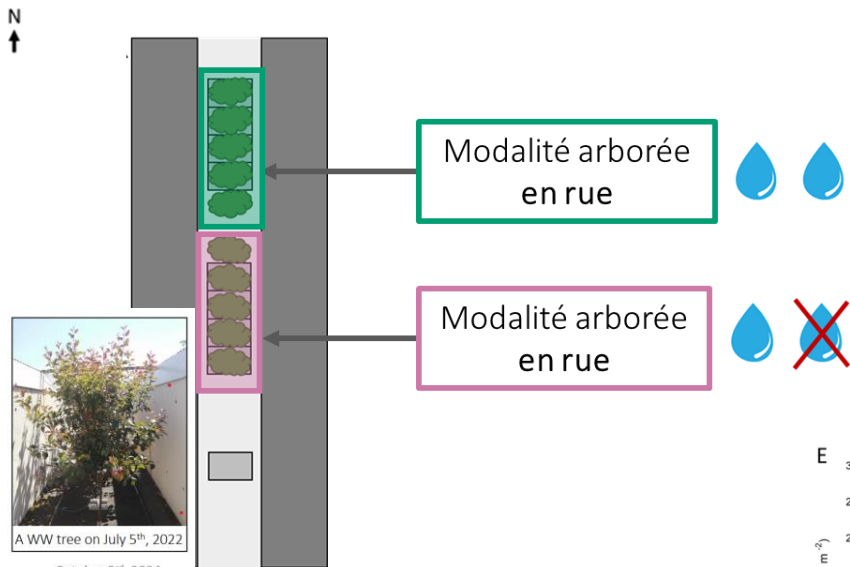
Température Ressentie
Indices Confort Thermique



La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

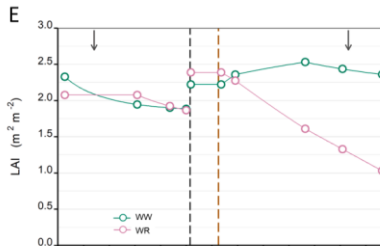
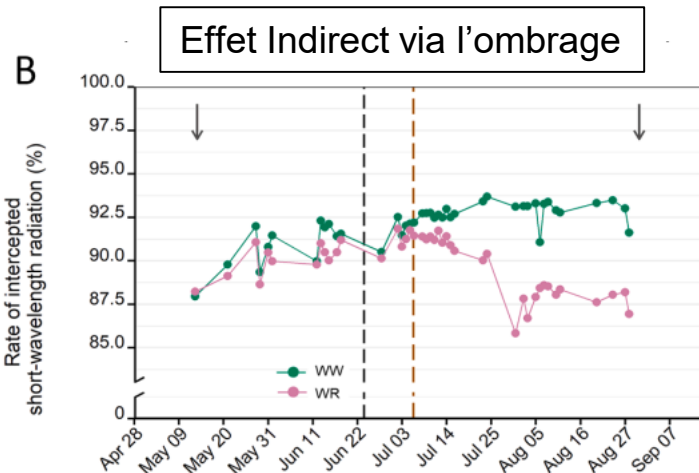
- Quantification difficile de l'effet direct

Comparaison avec/sans transpiration



October 3rd, 2024

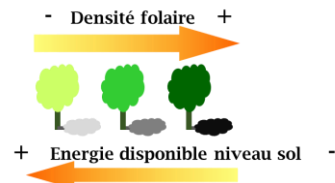
Thèse Dorine Canonne, Canonne et al, 2025



loi de type Beer-Lambert :

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

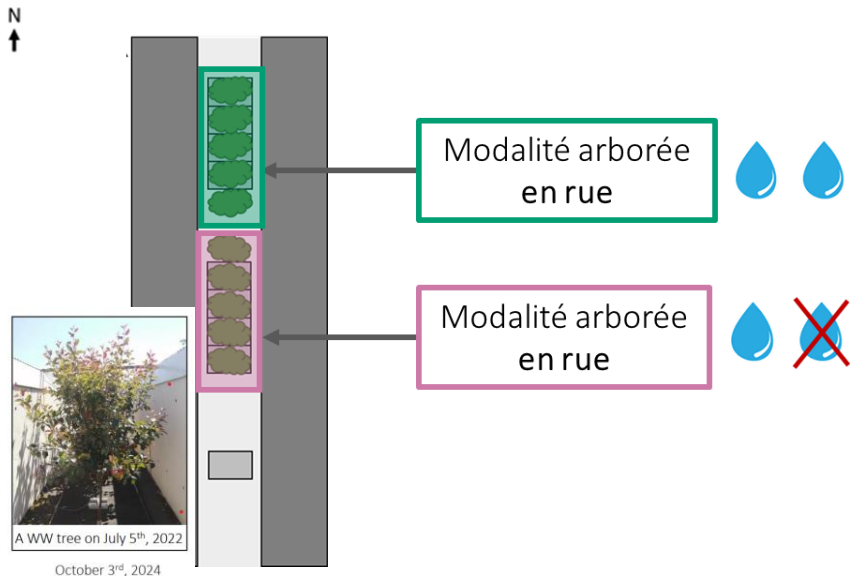
- rayonnement absorbé (R_{abs})
- rayonnement solaire incident (R_{inc})
- LAI (Leaf Area Index)
- Kc coefficient d'extinction



La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

- Quantification difficile de l'effet direct

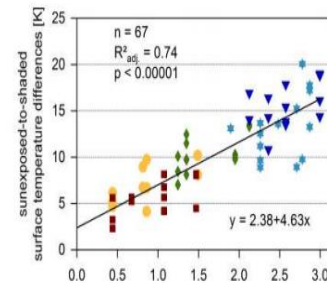
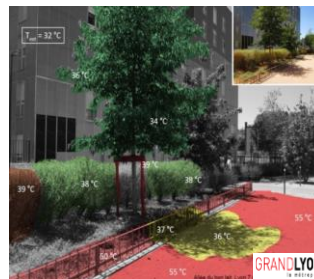
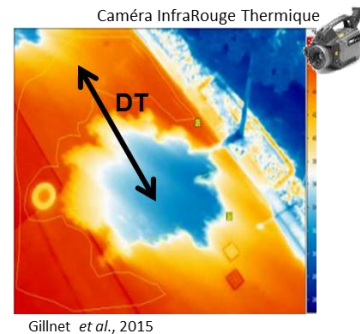
Comparaison avec/sans transpiration



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

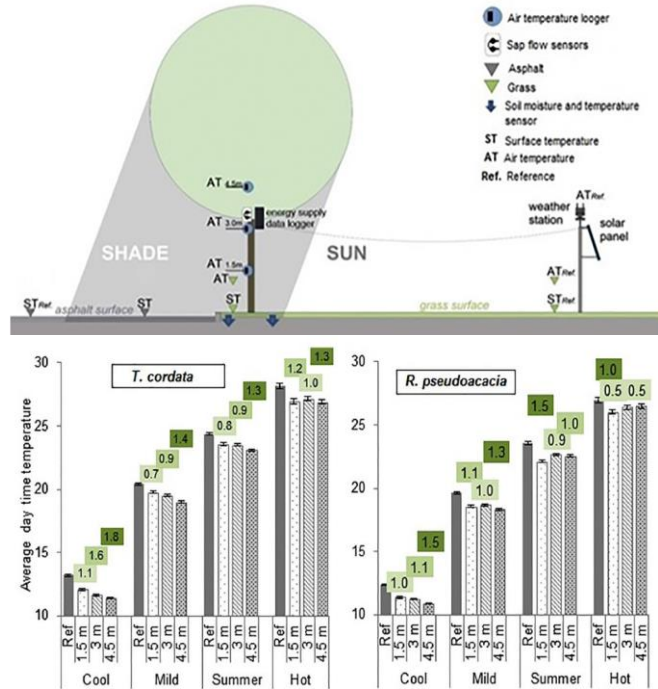


Fig. 8. Average day time (06-21 h) air temperature at reference point, 1.5 m, 3 m and 4.5 m (\pm SE) from the ground over June, July and August 2016 under the canopies of *T. cordata* and *R. pseudoacacia*. Data labels show the difference of air temperature compared to the reference point (dark green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

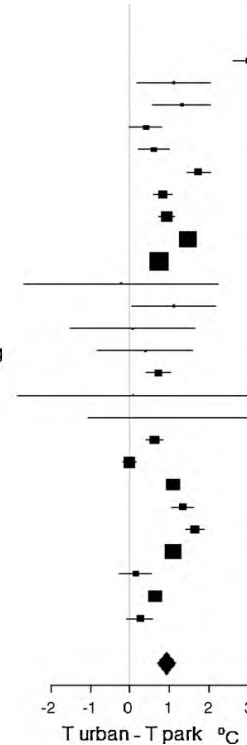
From Rahman et al., 2018

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

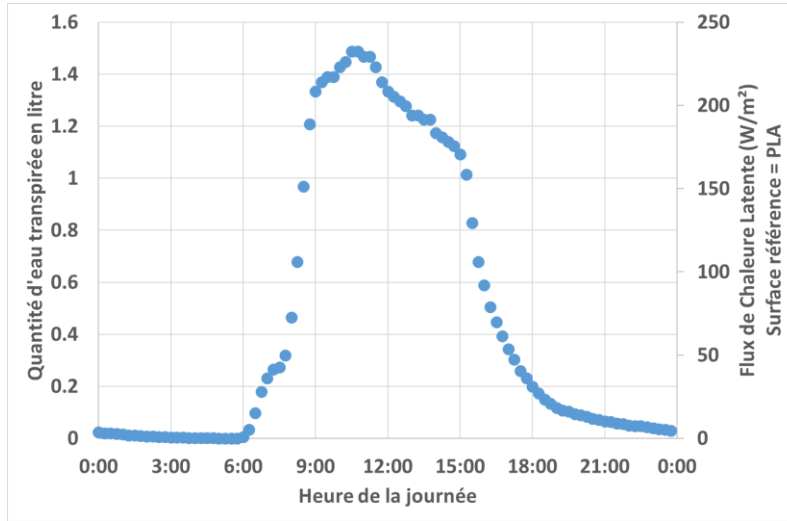
3 raisons principales

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

La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

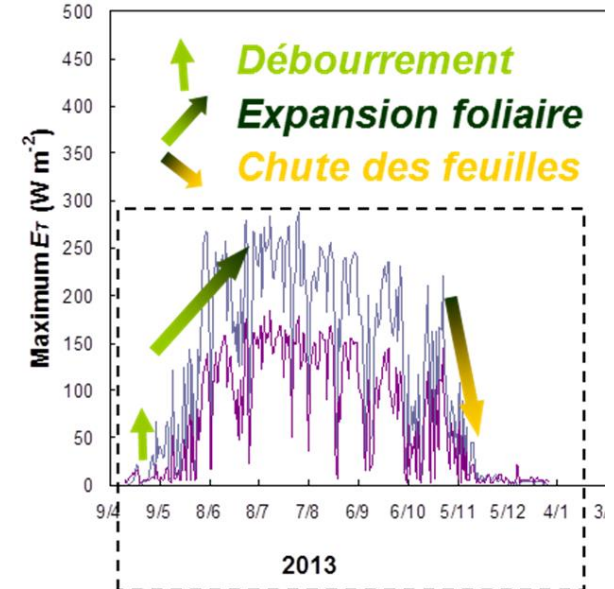
- Flux de chaleur latente – Quantité d'eau évaporée

Strasbourg - Tilleul – 230 m² surface foliaire



From Ngao, Pers. Comm.

- Variabilité temporelle importante



From Ngao et al. ICUC 2015

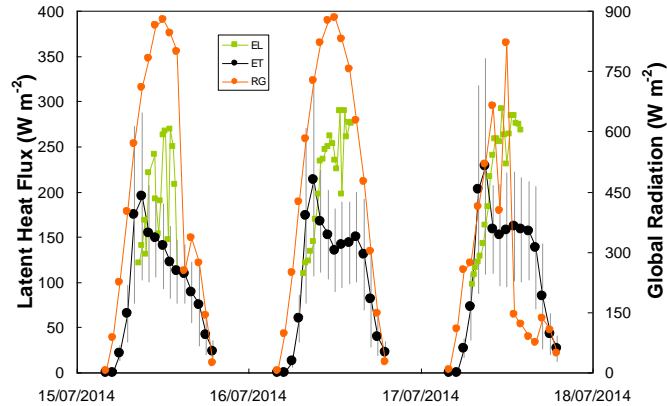
- Consommation journalière ~ 45 L
- λ_E - Flux Maximal / E_T ~ 200 W/m² (surface projetée au sol)



La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

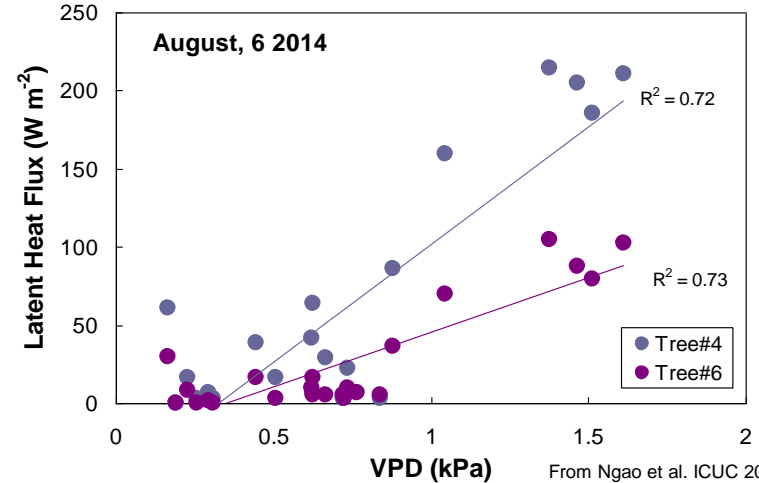
- Flux de chaleur latente – Quantité d'eau évaporée

Strasbourg - Tilleul – 230 m² surface foliaire



From Ngao et al. ICUC 2015

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



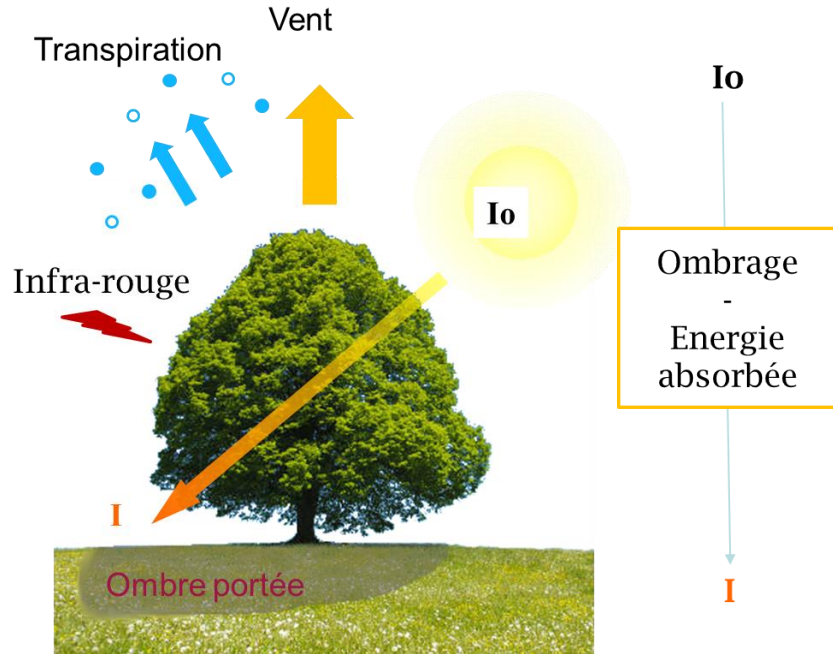
From Ngao et al. ICUC 2015

- λ_E - Flux Maximal / ET ~ 200 W/m² (surface projetée au sol)
A comparer aux 900 W/m² apportés par rayonnement
- Piloté par le VPD ~ $(e_{sat} - e_{vap})$

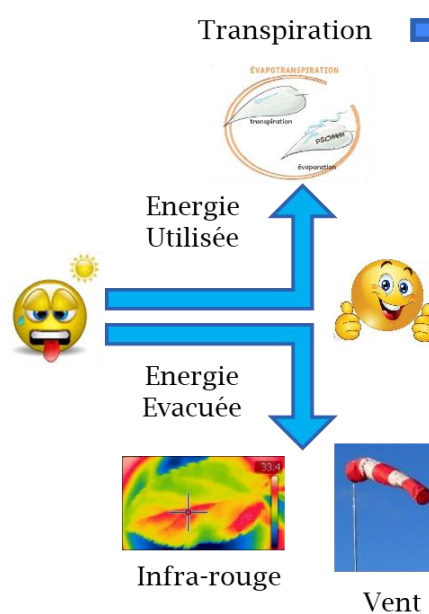


La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

- Flux de chaleur latente – Quantité d'eau évaporée



- Une question de bilan d'énergie !



~ 1/3 Ombrage

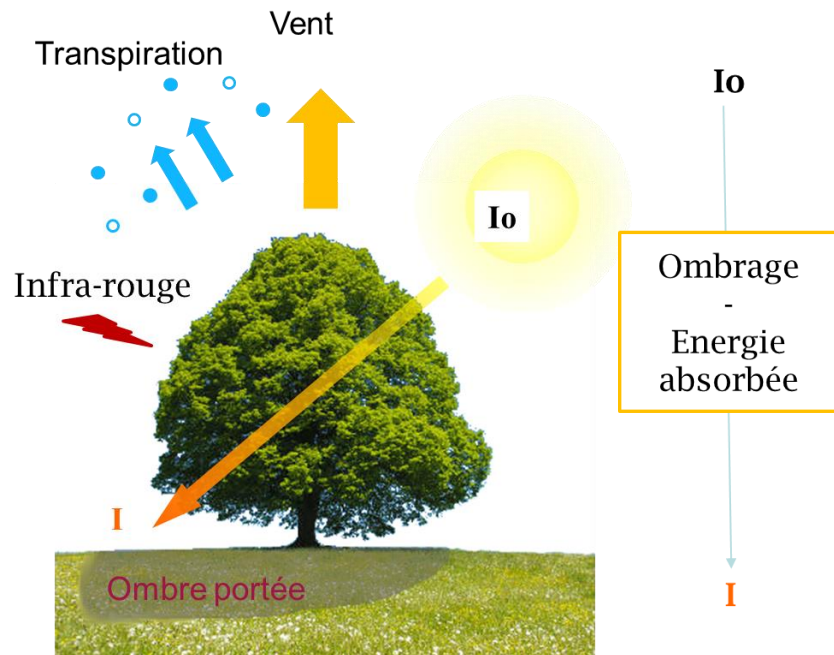
Green et al. (1993), Konarska et al. (2015)
Mballo et al. (2021)

Ratio variable

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

La transpiration - Rafraîchissement urbain ?

- Flux de chaleur latente – Quantité d'eau évaporée



- Une question de bilan d'énergie !

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

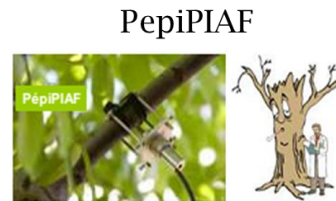
La transpiration – Verrous

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

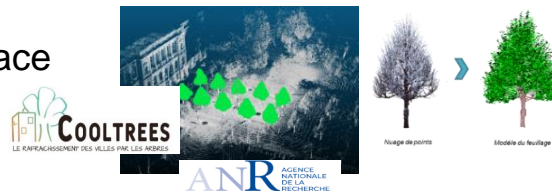
- Verrous** actuels

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

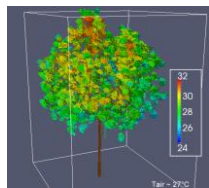
1. Mesures in situ / base de données sur la physiologie arbres urbains - Capteurs/monitoring - Phénologie



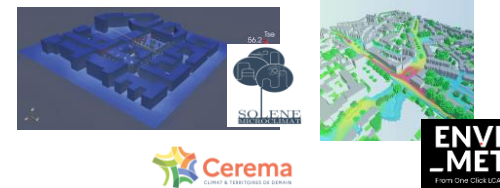
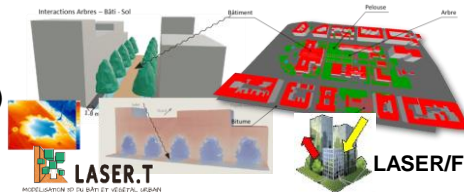
2. Structure et typologie urbaine: bâti et végétation (hauteur, Surface Foliaire, LAD) - Télédétection / Lidar mobile ou drône



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

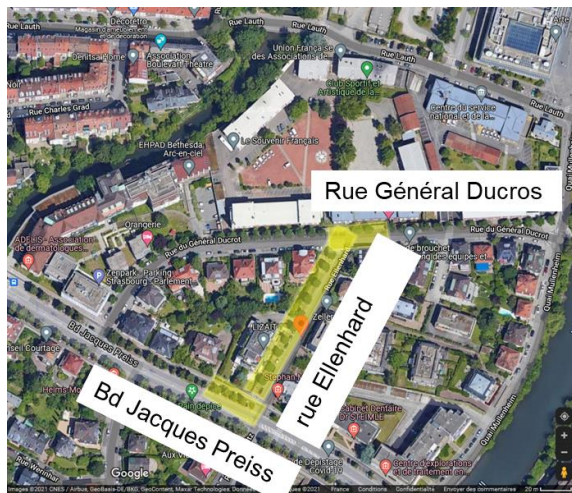


Infra-rouge thermique
Stress hydrique
(édaphique et atmosphérique)



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.



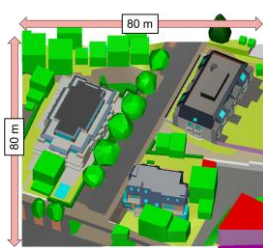
Zone d'étude



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/>



L'évapotranspiration des arbres et son rôle dans le rafraîchissement urbain

Marc Saudreau
marc.saudreau@inrae.fr

Merci pour votre attention