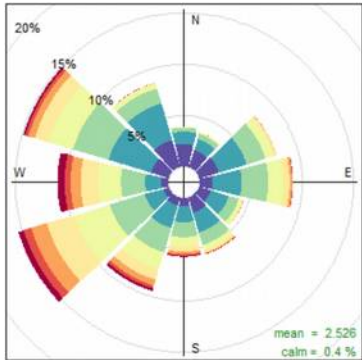


La mesure de l'évapotranspiration en milieu urbain à différentes échelles spatiales.... comment on fait ?



Contexte et Objectifs

Méthodes de mesure évapotranspiration
zoom sur l'eddy covariance

Résultats

- Mesures à basse hauteur
- Application à une toiture végétalisée (Broué)

David Ramier

Fabrice Rodriguez



Contexte



↑ Evapotranspiration

- **Evaporation** (sol, eau libre, interception)
- **Transpiration** (ouverture des stomates pour effectuer les échanges gazeux : photosynthèse + régulation de la température de la plante)
- **Facteurs d'influence** : météo, sol, plante.

Bilan hydrologique

$$P = R + E + I + \Delta S$$

P Pluie, R Ruissellement

E évapotranspiration, I infiltration sol & sous-sol

ΔS variation de la quantité d'eau stockée sol

Bilan énergétique

$$R_n = H + LE + G + \Delta Q_s$$

R_n Ray net à la surface, H Flux de chaleur sensible

LE flux de chaleur latente, G flux de chaleur / conduction sol

ΔQ_s variation de stockage du flux de chaleur

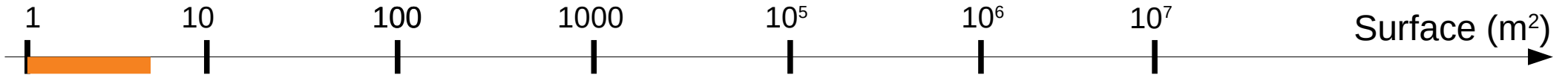
Objectifs

Mieux quantifier le processus d'évapotranspiration dans une ville plus « végétalisée »

=> mesure à une échelle spatiale fine : échelle de l'aménagement

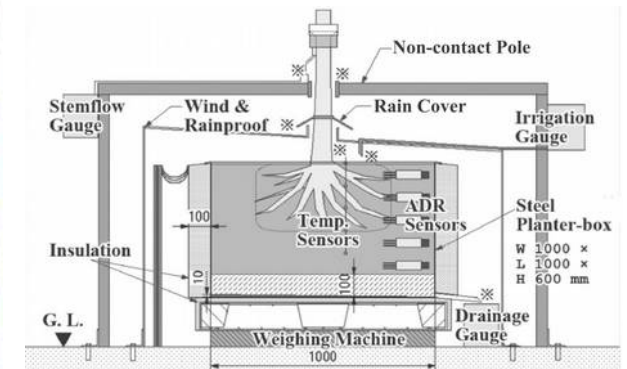
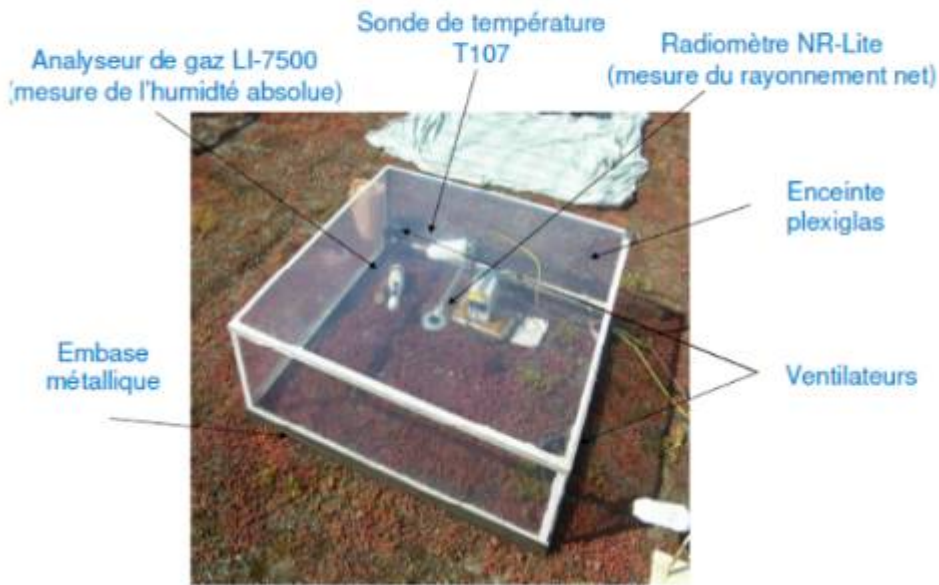
Estimation de l'évapotranspiration en continu

Méthodes de mesure



Chambre à évapotranspiration ¹

Lysimètre ²



Toiture végétalisée

Toiture végétalisée

Arbre

1 Ramier et al., 2017 Mesure de l'évapotranspiration de différentes toitures végétalisées *JST Eaux pluviales et végétal*

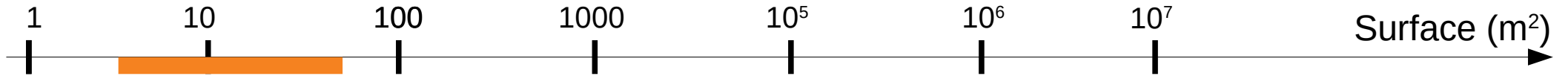
Marasco et al., 2014 Quantifying Evapotranspiration from Urban Green Roofs: A Comparison of Chamber Measurements with Commonly Used Predictive Methods, *Environ. Sci. Technol.* doi.org/10.1021/es501699h |

Hamel, P, et al (2015). Automated chamber system to measure field evapotranspiration rates. *J. Hydro. Eng.* doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001006.

2 DiGiovanni, K et al (2010), Green roof hydrology: Results from a small-scale lysimeter setup (Bronx, NY). *Low impact development : Redefining water in the city.* 2010. 1328-1341. doi.org/10.1061/41099(367)114

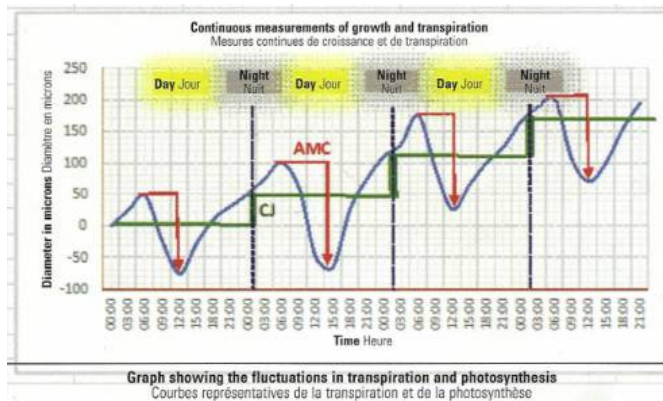
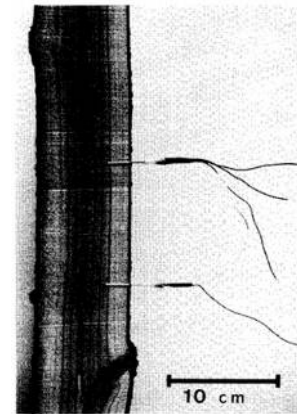
Asawa, T., Kiyono, T., & Hoyano, A. (2017). Continuous measurement of whole-tree water balance for studying urban tree transpiration. *Hydrological Processes*, 31(17), 3056-3068.

Méthodes de mesure



(Micro) dendrométrie³

Flux de Seve⁴



Dissipation de chaleur entre 2 electrodes
Densité de flux de seve (g H₂O m⁻² s⁻¹) appliquée à la section totale de l'arbre

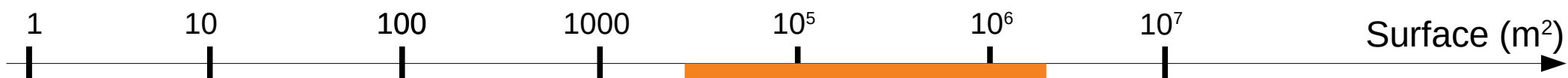
Système Pepipiaf

3 Bensaoud, A., Ségur, F., & Ameglio, T. (2018). Ecosystem services provided by trees in the city: Assessing the cooling capacity by measuring the dendrometric parameters (trunk diameter growth). *Irrigazette*, 165, 25-31.

Moser-Reischl, A., Rahman, M. A., Pauleit, S., Pretzsch, H., & Rötzer, T. (2019). Growth patterns and effects of urban micro-climate on two physiologically contrasting urban tree species. *Landscape and Urban Planning*, 183, 88-99.

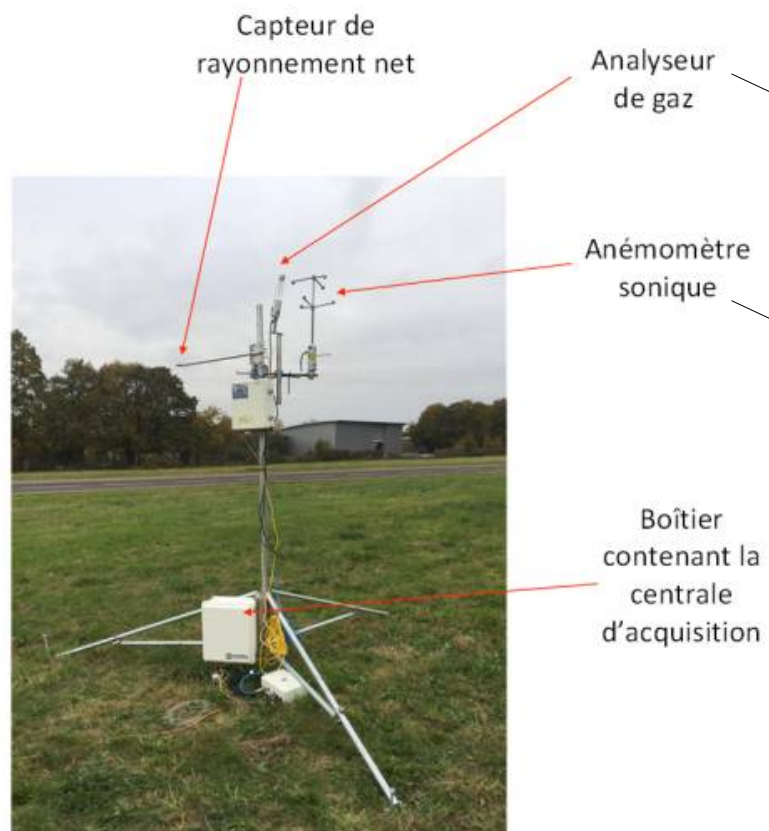
4 Granier A. (1987), Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements, *Tree Physiology*, Volume 3, Issue 4, December 1987, Pages 309–320, <https://doi.org/10.1093/treephys/3.4.309>

Méthodes de mesure



Instruments

eddy covariance⁵



LE
flux de chaleur latente

H
flux de chaleur sensible

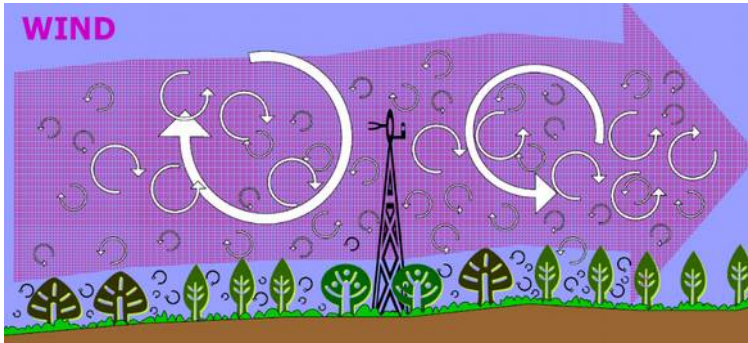
Scintillométrie⁶



⁵ Foken, T, et al. (2004), Post-field data quality control. *Handbook of micrometeorology: a guide for surface flux measurement and analysis*.

⁶ Versini, PA, et al (2023). Evapotranspiration evaluation by 3 different protocols on a large green roof in the greater Paris area. *Earth System Science Data Discussions* doi.org/10.5194/essd-2023-324

Méthode d'eddy covariance



Transport de chaleur et d'humidité gouverné par la turbulence / tourbillon (eddy)

Calcul des **covariances entre la vitesse verticale et un scalaire**

=> Mesure d'un flux discrétisé à une fréquence choisie, en conditions stationnaires³

$$F_c = \overline{w'c'} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} [(w_k - \bar{w})(c_k - \bar{c})]$$

$$H = \rho C_p \overline{w'T'}$$

ρ masse volumique de l'air ($kg.m^{-3}$)

C_p capacité thermique massique à pression constante ($m^2.s^{-2}.K^{-1}$)

w vitesse verticale du vent ($m.s^{-1}$)

T température (K)

$$\lambda E = \lambda M_{H_2O} \overline{w'q'}$$

λ chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J.kg^{-1}$)

M_{H_2O} masse molaire de la vapeur d'eau ($kg.mol^{-1}$)

q densité molaire de l'eau ($mol.m^{-3}$)

Conditions d'applicabilité

- Surface homogène de hauteur de rugosité constante
- Turbulence établie

Période de moyennage des flux

Traditionnellement 30 min

Méthode d'eddy covariance / Contribution à la mesure

Mat de mesure

Champ

Toit végétalisé

Milieu agricole
Mono-culture bien irriguée
Hauteur uniforme
Grande superficie

Milieu urbain
Disponibilité en eau variable
Diverses surfaces
Grande superficie

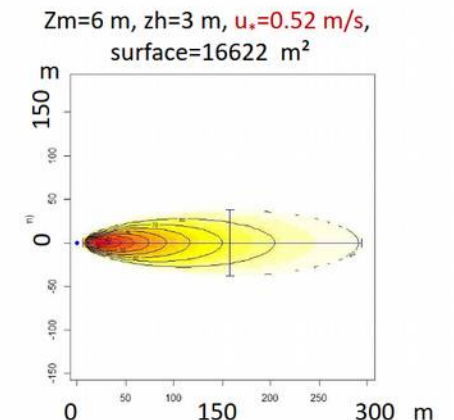
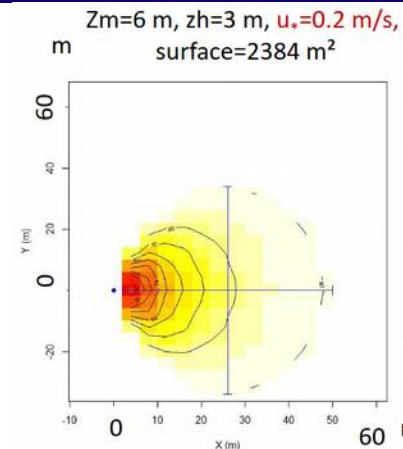
Milieu urbain
Disponibilité en eau variable
Diverses surfaces
Petite superficie

Heusinger, J., & Weber, S. (2017). Surface energy balance of an extensive green roof as quantified by full year eddy-covariance measurements. *Science of the Total Environment*, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.168

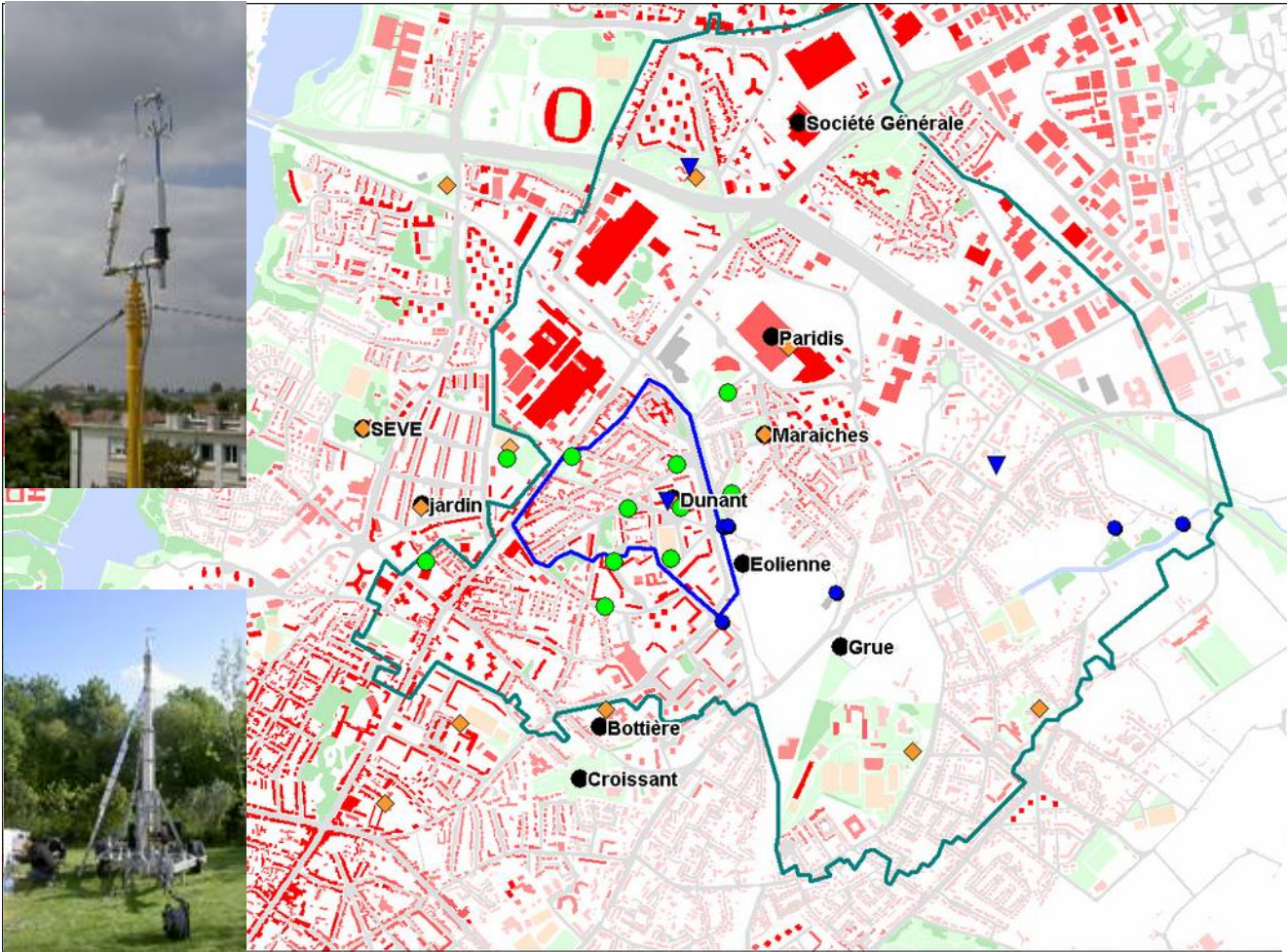
Nicolini, G., et al. (2017). Performance of eddy-covariance measurements in fetch-limited applications. *Theoretical and applied climatology*, doi.org/10.1007/s00704-015-1673-x

Phd Abiven C. (2019-2020)

Zitouna-Chebbi, R., Prévot, L., Chakhar, A., Marniche-Ben Abdallah, M., & Jacob, F. (2018). Observing actual evapotranspiration from flux tower eddy covariance measurements within a hilly watershed: Case study of the Kamech site, Cap Bon Peninsula, Tunisia. *Atmosphere*, 9(2), 68.



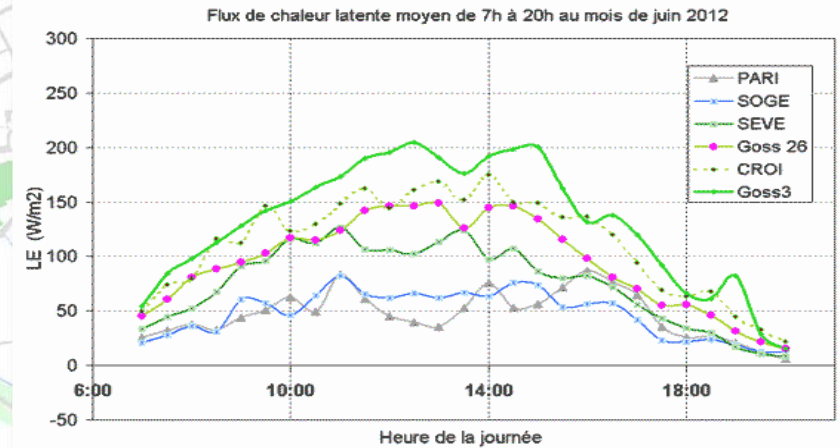
Méthode d'eddy covariance – Expérimentations antérieures



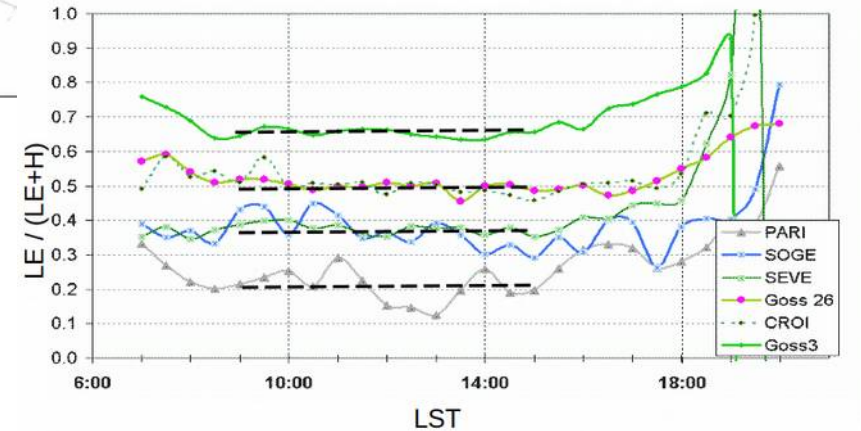
Campagne Fluxsap 2012, Nantes

Mesures

$H_{sol}=25m / H_{bati}= 15m$



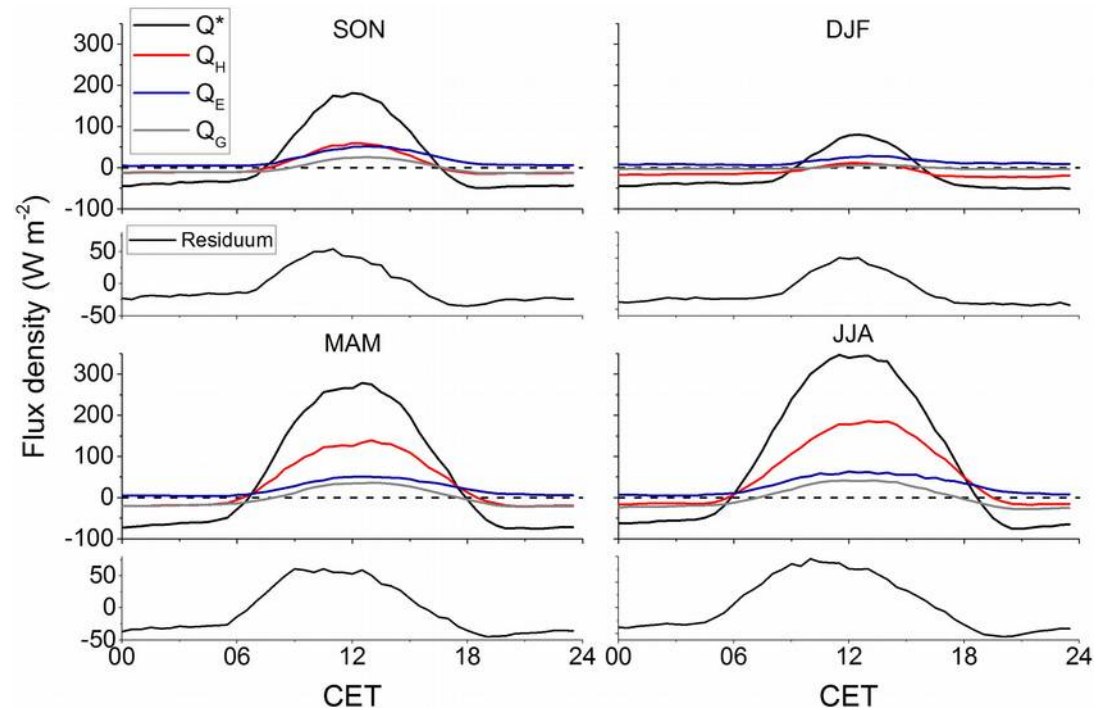
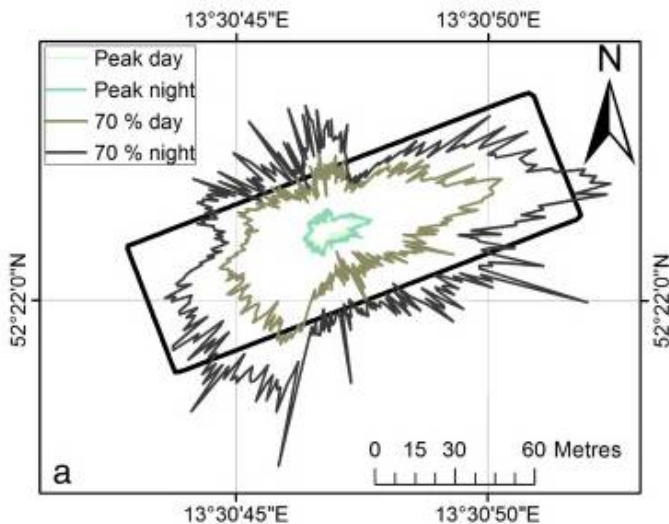
Variabilité du flux LE % vég°



Méthode d'eddy covariance – Expérimentations antérieures

Mesures à basse hauteur sur des toitures végétalisées

Mesure H=1,15m



Zone Source

Méthode d'eddy covariance - Résultats (SIRTA 2016)

Campagne de mesure au SIRTA (été 2016) – Mesure à basse hauteur



Fréquence : 10Hz - Surface : pelouse

CSAT-Licor - Hauteur : 2,5m

CSAT-3 : Anémomètre sonique

LI-7500A : Analyseur de gaz

IRGASON - Hauteurs : 0,8m, 1,5m et 2,5m

Anémomètre sonique et analyseur de gaz

Traitement données

Eddypro

Critères de qualité

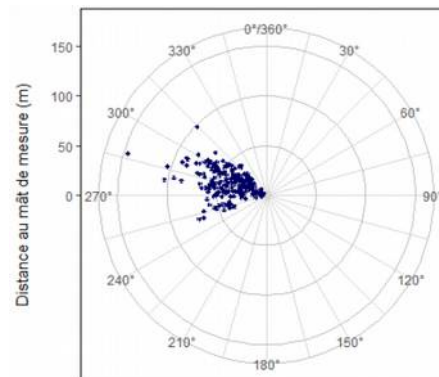
Direction du vent

Période de moyennage

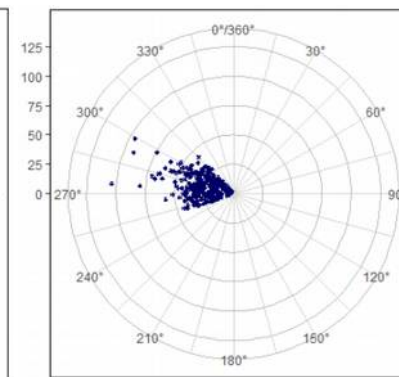
des flux

Zone Source / Footprint

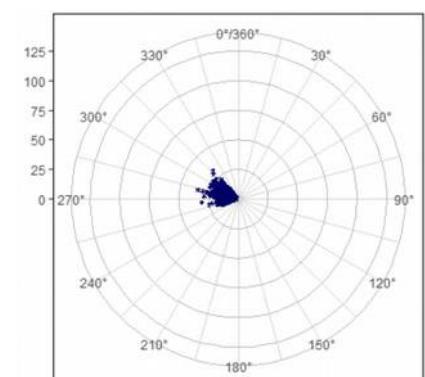
H=2,5m



H=1,5m



H=0,8m



Chronique trop courte

Besoin de données complémentaires

Méthode d'eddy covariance - Résultats (Broué 2022)

Toiture végétalisée de Broué (28) :
longueur 117m, 2 pentes, Largeurs 6 et 11m
Épaisseur du substrat 9 cm.



Eddy Covariance
Irgason, h=50cm
LE, H



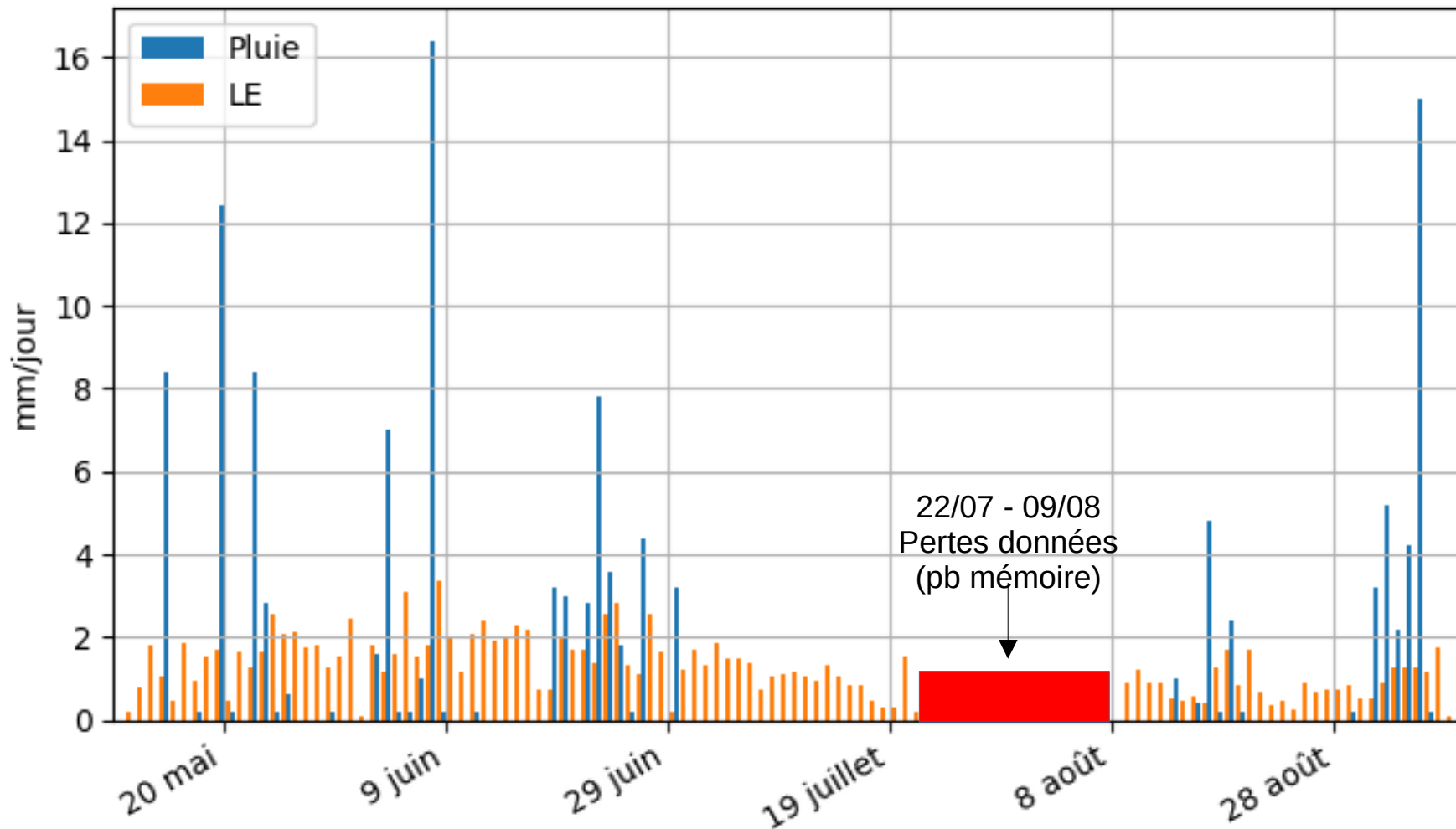
- Vent, T°air, Hr air
- Rayonnement net (Rnet)
- Teneur en eau substrat
- Température substrat
- Flux de chaleur substrat (G)



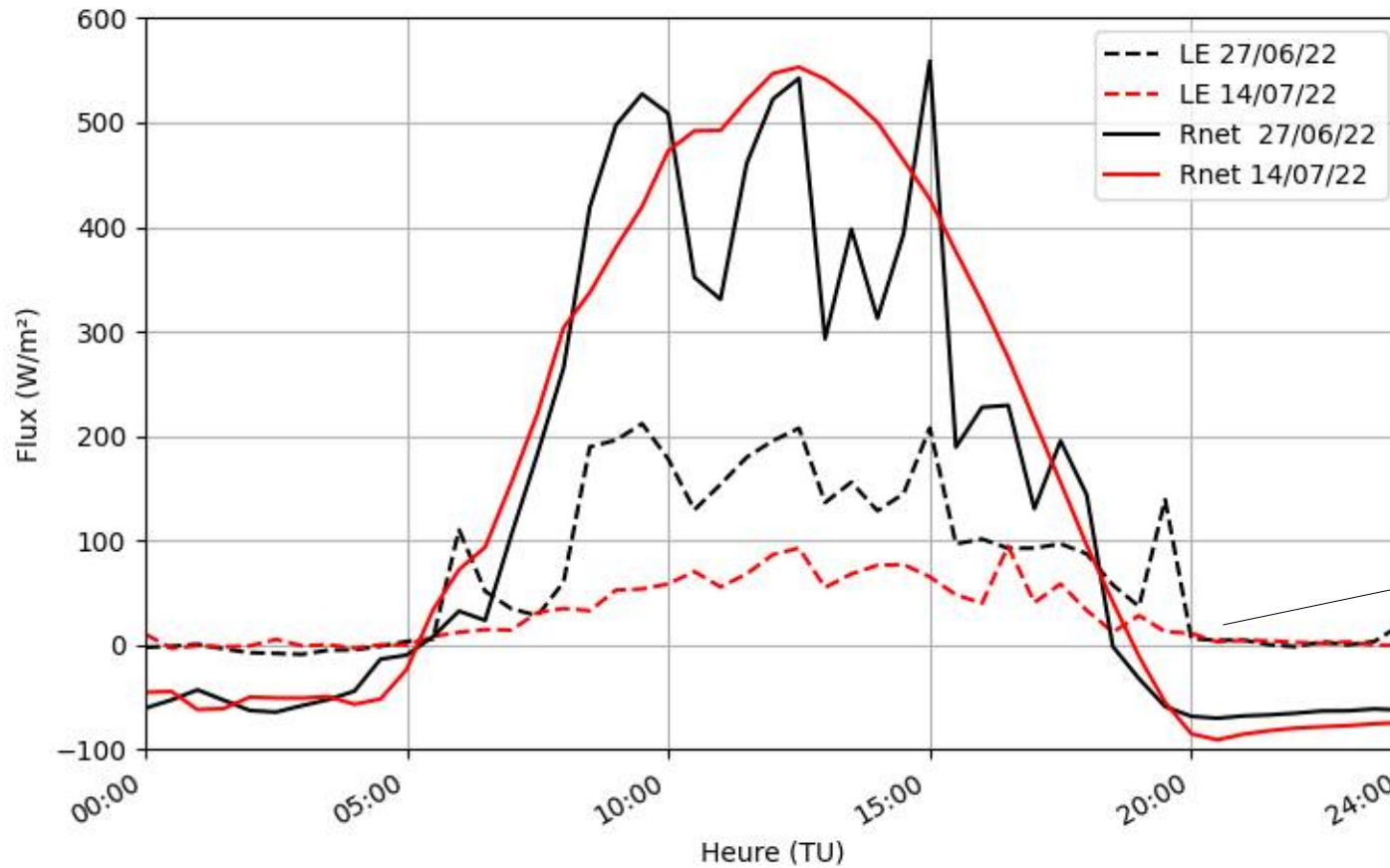
Méthode d'eddy covariance - Résultats (Broué 2022)

10 mai - 7 sep 2022, 129 mm pluie

Evolution du flux journalier ET durant la période



Méthode d'eddy covariance - Résultats (Broué 2022)



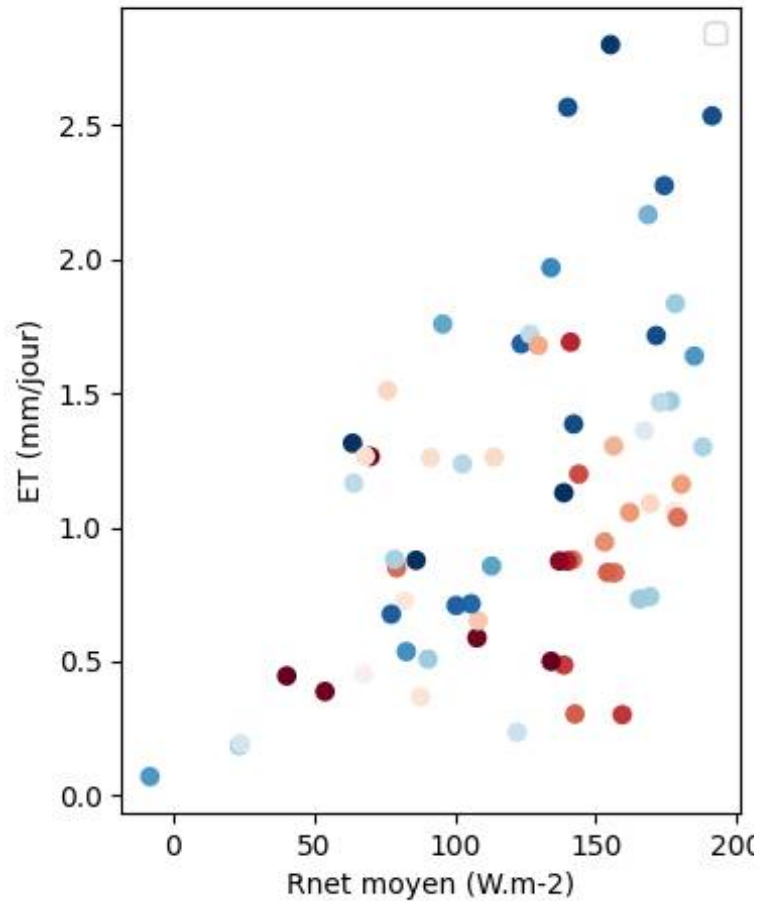
Sensibilité du flux d'ET
à l'état hydrique du
substrat

$\Theta \sim 0,27 \text{ m}^3/\text{m}^3$
ET jour = 2,6 mm

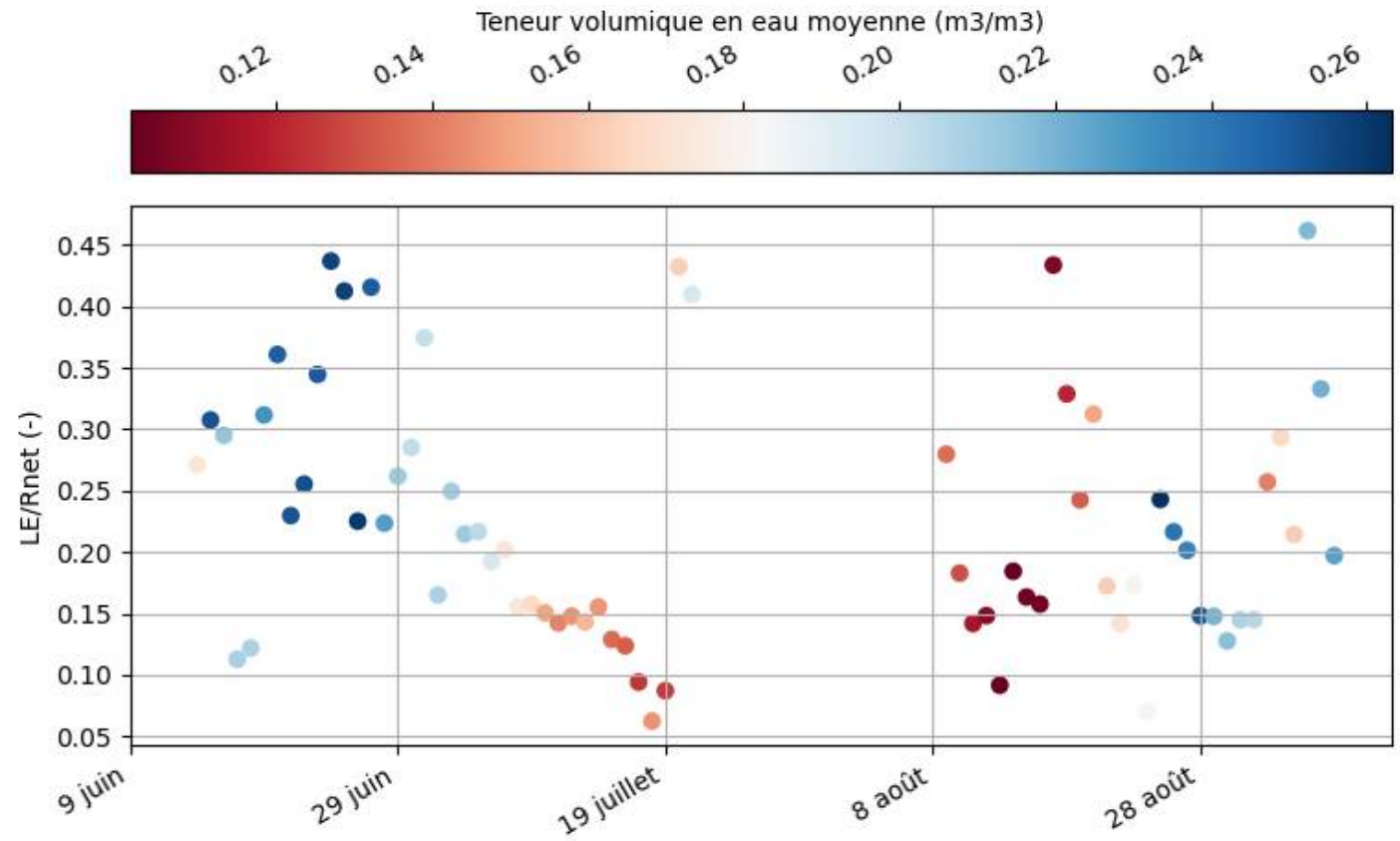
$\Theta \sim 0,14 \text{ m}^3/\text{m}^3$
ET jour = 1 mm

Méthode d'eddy covariance - Résultats (Broué 2022)

ET vs Rnet



Fraction évaporative (moyenne jour)



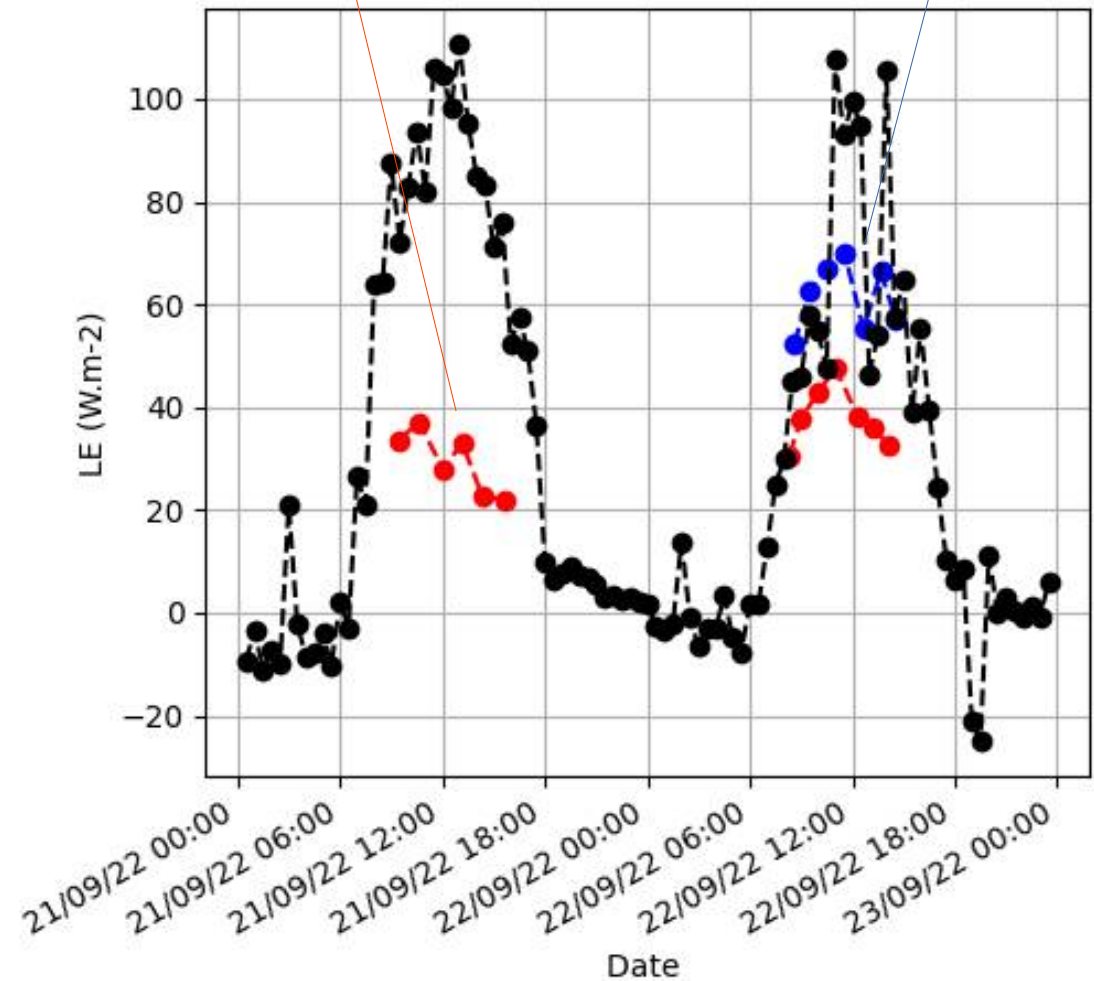
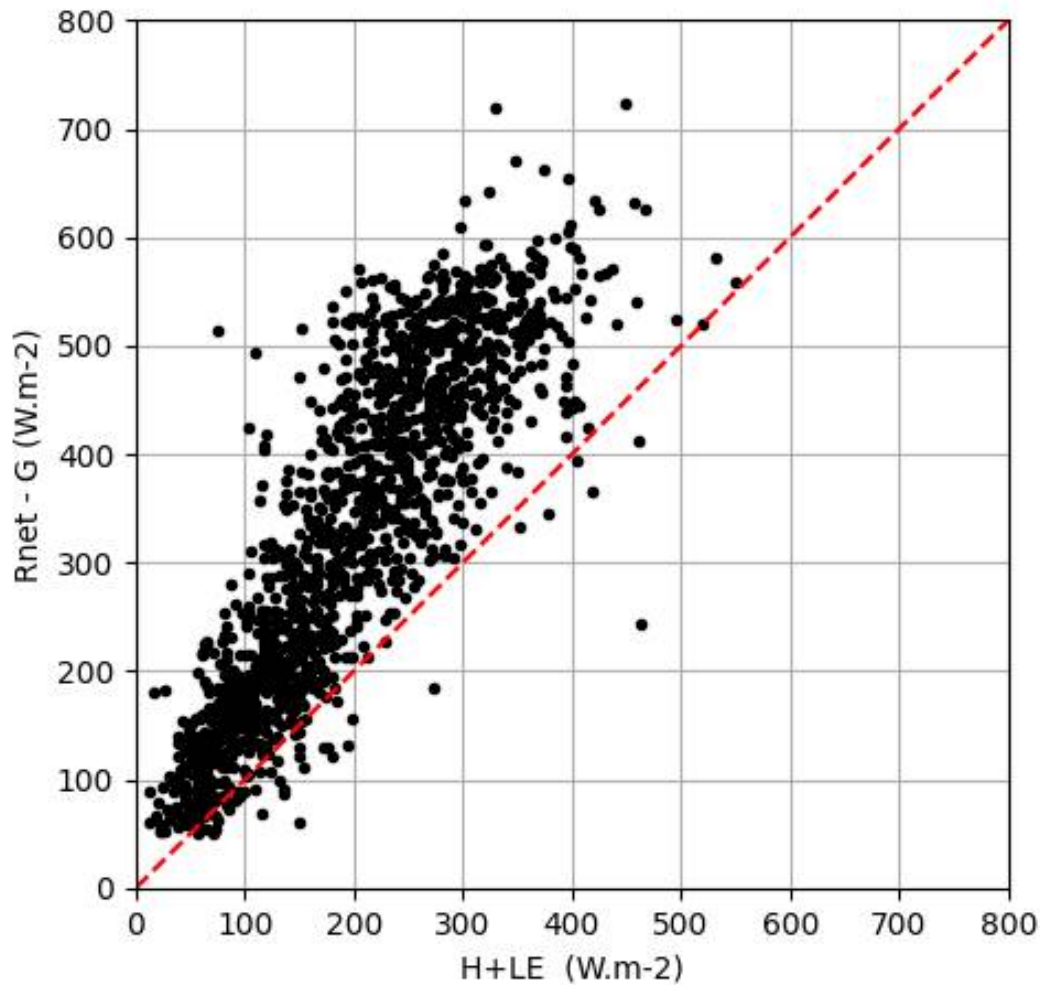
Méthode d'eddy covariance - Résultats

Comparaison de méthodes



Bilan d'énergie

Chambre



Conclusions et perspectives

Des techniques variées permettant des mesures à différentes échelles (x,y,t)
=> Mesures directes vs mesures indirectes

Des mesures pourquoi faire ?
comprendre les processus ?
faire des bilans ?
les modèles ?
hydrologie ou climatologie ?

Consolider notre « savoir-faire » pour la mesure ET sur des petites surfaces urbaines
Amélioration de dispositifs comme la chambre
Travail sur la complémentarité des mesures à différentes échelles.

Site du SIRTA, Palaiseau (91) – été 2016 - Mesures initiales (Cerema)
Intercomparaison capteurs (CSAT/Licor et Irgason) à différentes hauteurs (0,8 - 1,5 - 2m)
Stages : Ameni Youssef-Mabrouk, 2016 ; Abdelhak Douar, 2017.

EPE (2019-2022) Projet OFB

Campagne expérimentale à Broué – Toiture végétalisée Ecovégétal
Installation simultanée de dispositifs d'eddy-covariance à basse hauteur (0,5 – 1 – 1,5m)
Pascal Keravec (LHEEA), David Ramier (Cerema), Fabrice Rodriguez (LEE)

ECOPS (2020-2022) Projet INSU EC2CO

Campagne expérimentale à Broué – Toiture végétalisée Ecovégétal
Installation de dispositifs d'eddy-covariance à basse hauteur (0,5 m)
Cerema / Univ G Eiffel / LHEEA / SIRTA / IGE
Stage : Amadou Wane, 2022.