

La réduction des impacts énergétiques, environnementaux et sanitaires



« Revue des méthodes de mesures de l'évapo(transpi)ration sur des aménagements en ville : que nous apprend le projet national Innovation & Solutions pour lutter contre la Surchauffe Urbaine ? »

Laurent Libessart (LGCgE), Emmanuel Berthier (CEREMA), Philippe Devillers (LIFAM), Maxime Chaumont (UBS), Gilles Escadeillas (LMDC), Isabelle Dubois-Brugger (Holcim, Lafarge)

SFT - Groupes « Thermique atmosphérique et adaptation au changement climatique » et « Génie climatique – Thermique de l'habitat »

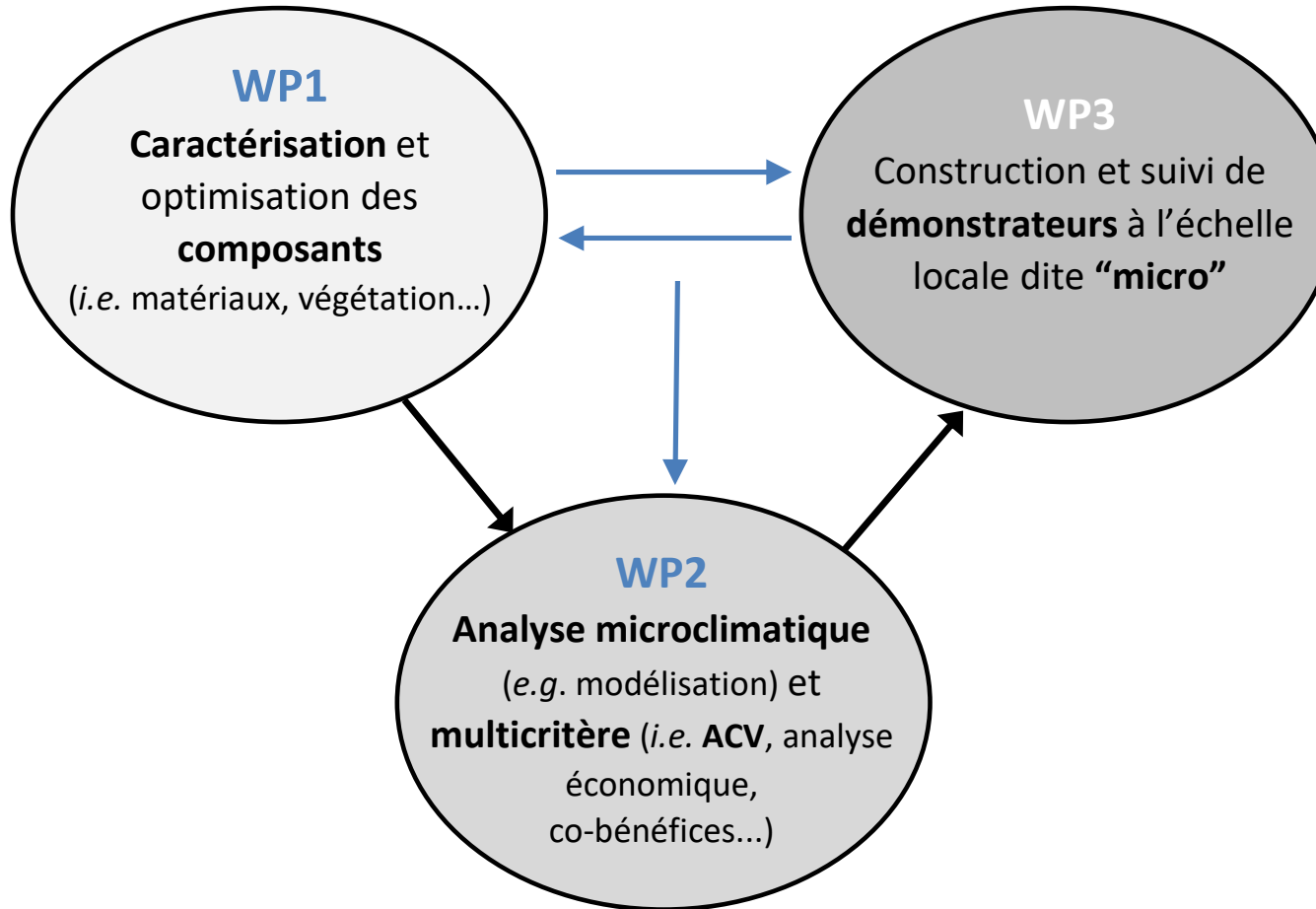
Transferts thermo-hydriques multi-échelles : du végétal au climat



Liberté
Égalité
Fraternité

4 décembre 2025 - Paris





WPO : Transfert et Valorisation des résultats

Organisation/partage de résultats, communications, ateliers
Co-construction d'une approche commune, webinaires, restitutions





Réflexions sur ce que pourrait être le contenu du futur Cahier des Charges des méthodes / protocoles:

► Pourquoi ? = qualifier/quantifier le pouvoir évaporant et de rafraîchissement

→ doit permettre de: i) désigner et optimiser des composants/solutions, ii) les comparer, iii) caractériser pour alimenter d'autres WPs d'ISSU (et en particulier WP2), iv) in fine d'aider à dimensionner les solutions dans les projets

► Variables à mesurer :

a) **Taux d'évaporation (kg/m²/h)** → Mesuré par évaporation réelle sur une surface instrumentée.

b) **Flux latent (W/m²)** → Indique directement la performance de refroidissement.

c) **Température de surface** → Souvent mesurée par caméra IR ou thermocouples.

Une baisse indique un rafraîchissement efficace.

d) **Bilan d'énergie**

→ Utilisé en urbanisme / surfaces perméables : $R_n = H + LE + G$

- LE = flux latent d'évaporation
- H = flux sensible
- G = flux dans le sol
- R_n = rayonnement net

→ Quels sont les essais existants en solutions grises et solutions vertes ?





WP 1.2.2 : CARACTÉRISATION DU POUVOIR ÉVAPORANT DE COMPOSANTS OU SOLUTIONS

Coordination : 2024 Emmanuel Berthier, Isabelle Dubois-Brugger,
2025 Philippe Devillers, Laurent Libessart

Solutions grises (P.Devillers, ENSAM et G.Escadeillas, LMDC):

► Livrable tranche 1 finalisé

Table des matières

1	Introduction	3
2	Généralités sur les ICU	3
3	Facteurs favorisant l'évaporation.....	6
4	Mesure du taux d'évaporation en laboratoire	18
5	Références.....	28
6	Annexes	31

► 12 essais de laboratoire, 3 essais in situ

► 4 tableaux d'analyse des essais (échantillons, rayonnement, ambiances, instrumentation)

Essais laboratoire

Référence

Titre	Impact of climatic factors on evaporative cooling of porous building
Auteur	Lei Zhang, Zhenhao Pan, Yu Zhang, Qinglin Meng
Revue	Energy and Buildings, 2018

Matériau testé

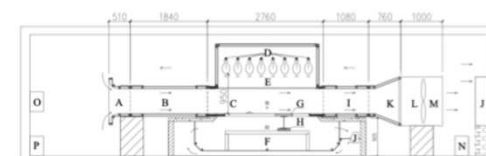
Nature	Tuiles terre cuite, isolation fond et faces latérales
échantillon	24 cm x 30 cm x 1 cm

Conditions d'essai

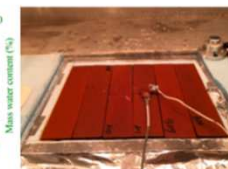
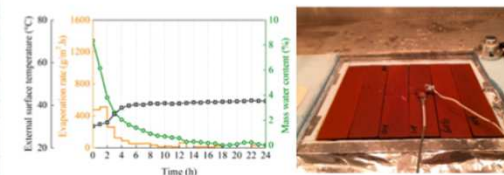
Rayonnement	0, 450 et 900 W/m ²
Vent	Tunnel, 1, 2 et 3 m/s
Saturation	Séchage à 110°C, stockage 24H00 dans l'eau
Durée	24h00
Ambiance	T _{air} = 28, 33 et 38°C, HR=52, 69 et 85 %

Mesures pendant l'essai

Masse	Acquisition
Température	Surface
flux	Surface
Autre	Porosimétrie mercure, MEB



⊗ Digital temperature and humidity sensor ⊕ Hot film anemometer
 ⊖ T-type thermocouple ⊖ Hemispherical radiometer



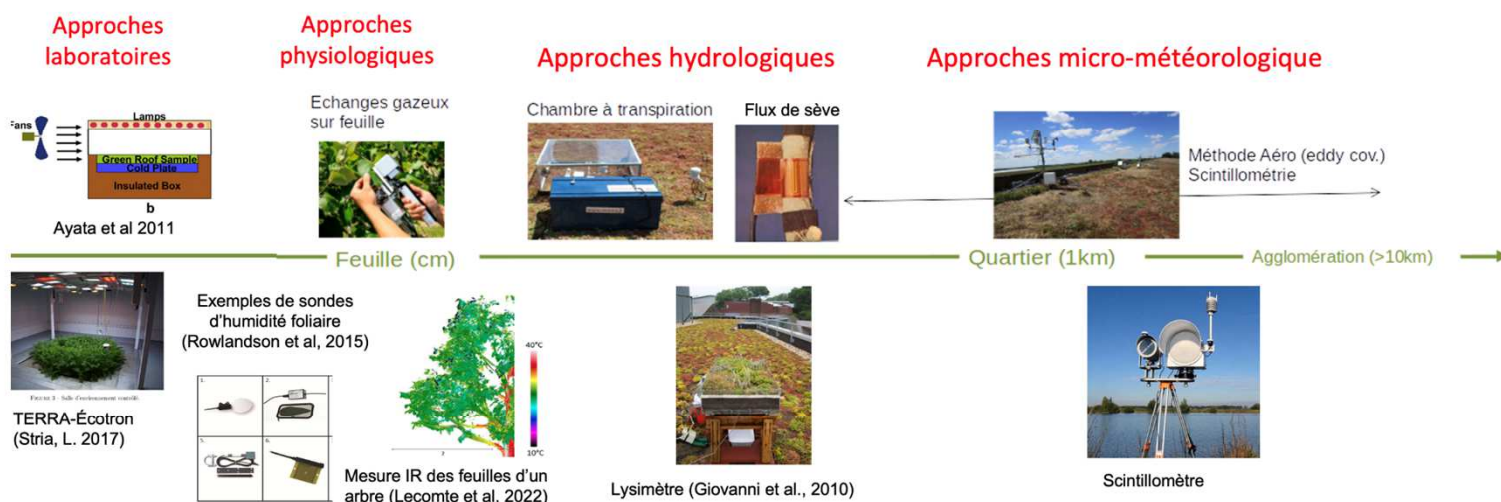


WP 1.2.2 : CARACTÉRISATION DU POUVOIR ÉVAPORANT DE COMPOSANTS OU SOLUTIONS

Solutions vertes (D. Ramier, Cerema, et L. Libessart, Univ. Artois):

- Sommaire..... 2
- 1 Résumé..... 4
- 2 Introduction 5
- 3 L'évapotranspiration..... 5
- 4 Techniques de mesure de l'évapotranspiration..... 7
 - 4.1 Approche hydrologique..... 7
 - 4.1.1 Bilan hydrique..... 7
 - 4.1.2 Lysimètre..... 8
 - 4.2 Approche micro-météorologique..... 8
 - 4.2.1 Rapport de Bowen..... 8
 - 4.2.2 Eddy Covariance..... 9
 - 4.2.3 Méthode par scintillométrie 10
 - 4.2.4 Méthode aérodynamique..... 11
 - 4.3 Approches physiologiques des plantes 12
 - 4.3.1 Transpiration foliaire..... 12
 - 4.3.2 Méthodes basées sur les capteurs thermiques ou infrarouges..... 14
 - 4.3.3 Potentiel hydrique ($\Psi\Psi$)..... 16
 - 4.3.4 Méthode du flux de sève..... 18
 - 4.3.5 Méthode du système de chambres..... 20
 - 4.3.6 Méthode par humidité foliaire..... 21
 - 4.4 Méthode de mesure en laboratoire 21
- 5 Techniques d'estimation de l'évapotranspiration 22
 - 5.1 Estimation des évapotranspirations potentielle et de référence..... 22
 - 5.1.1 Formule de Thornthwaite 22
 - 5.1.2 Formule de Hamon (Hamon, 1961)..... 22
 - 5.1.3 Formule de Serra (1952)..... 23
 - 5.1.4 Formule de Penman-Monteith..... 23
 - 5.1.5 Formule de Blaney-Criddle (1950)..... 24
 - 5.2 Estimation de l'évapotranspiration réelle..... 24
 - 5.2.1 Formule de Turc (1962)..... 24
- 6 Conclusion et perspectives..... 24
- 7 Références..... 26

Echelles de mesures spatiales de mesures de l'évapotranspiration



La réduction des impacts énergétiques, environnementaux et sanitaires



Quels sont les dispositifs existants des participants du WP122

- Que mesurent-ils ?
- Sont-ils complexes ou simples à mettre en œuvre?

→ 4 essais en solutions grises

→ 2 essais en solutions vertes

La réduction des impacts énergétiques, environnementaux et sanitaires



Bilan des dispositifs existants → Solutions grises

LAFARGE HOLCIM

Dr. Isabelle Dubois



LafargeHolcim



*Liberté
Égalité
Fraternité*



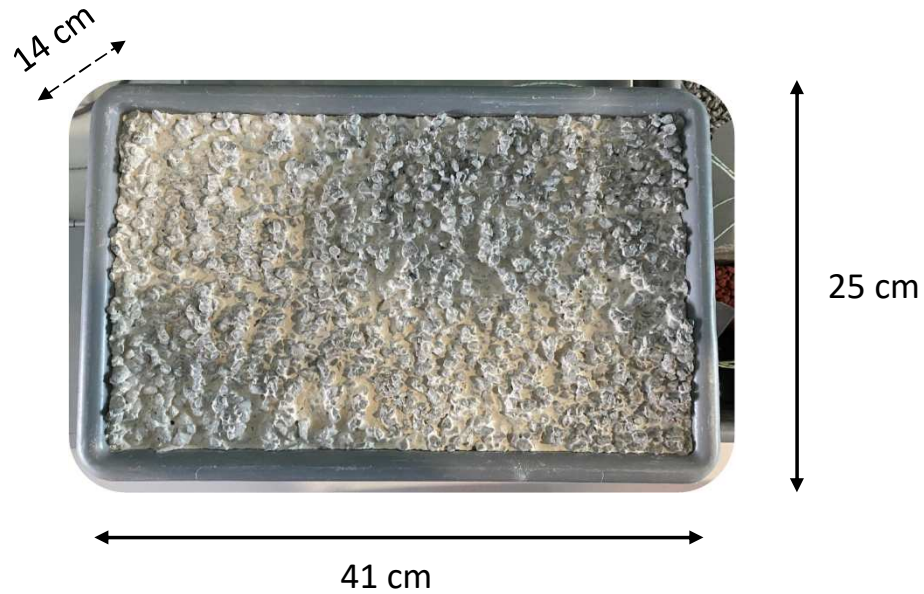


Figure 9 : Photographie de l'échantillon du *Sponge Concrete*

Placé en étuve à 40 °C jusqu'à obtention d'une **masse sèche**
(diminution de masse inférieure à 1%)

Procédure d'acquisition

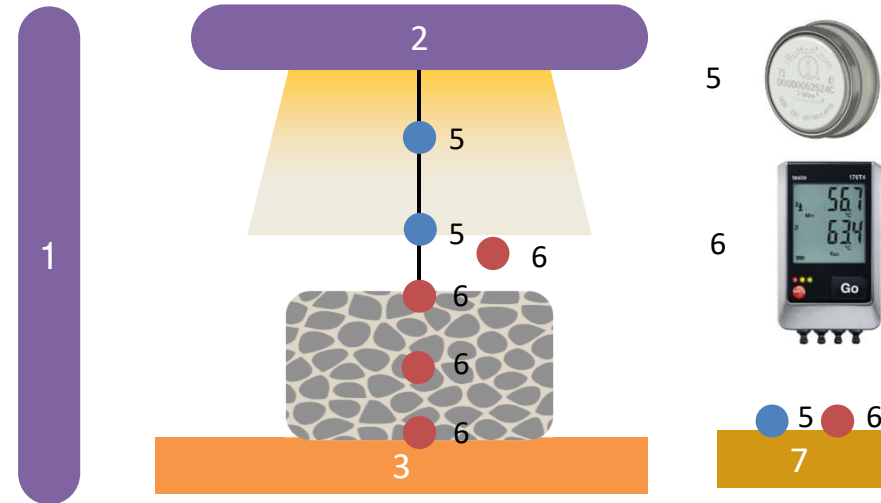


Figure 10 : Schéma d'installation des capteurs sur le banc d'essai

(1) Ventilateur (2) Projecteur Halogène (3) Balance connectée
(4) Sponge Concrete (5) Capteurs *iButton* (6) Capteurs Testo (7)
Support





PHOTO DU BANC D'ESSAI

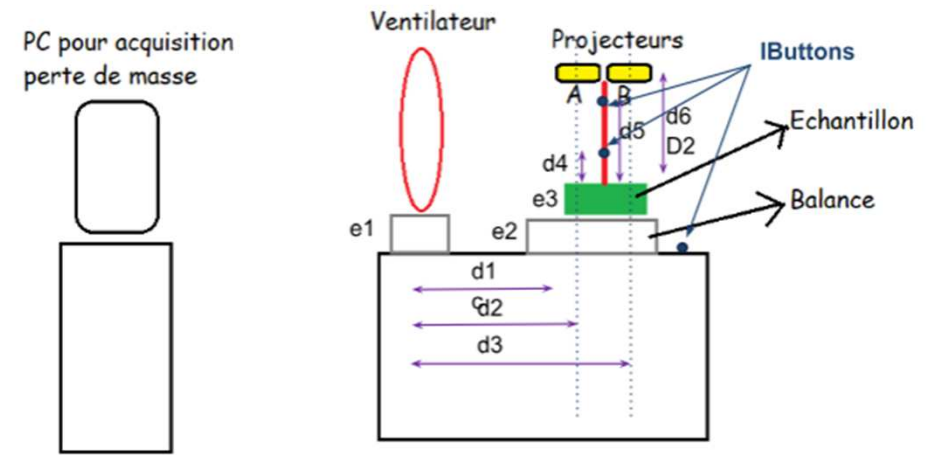
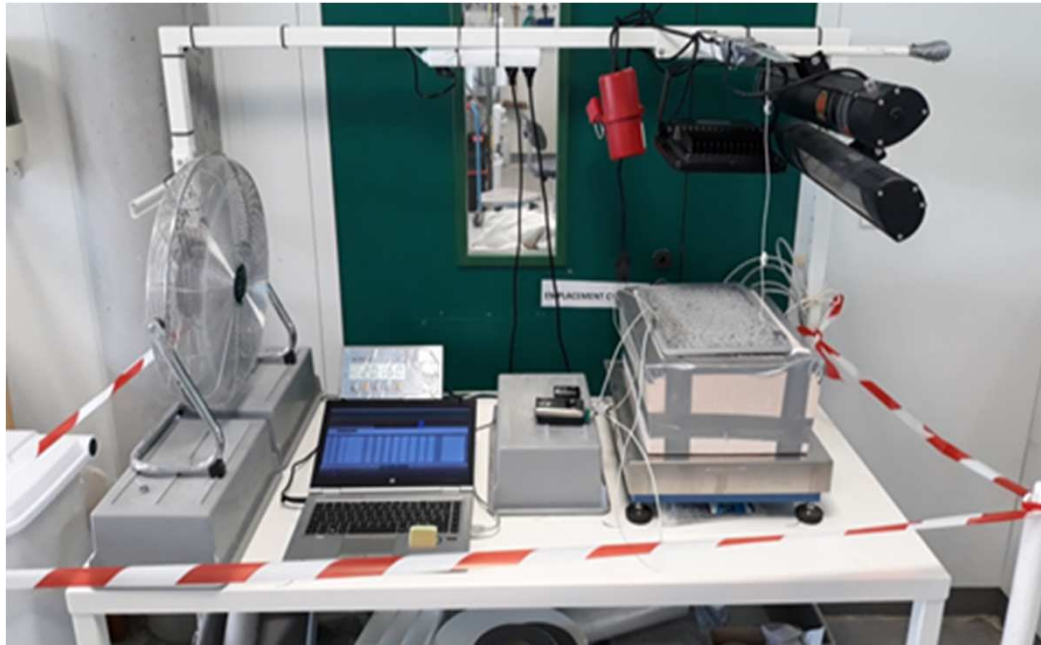


Figure 4: Schéma d'installation des capteurs sur le banc d'essai

d1 = 50 cm	e1 = 15 cm
d2 = 66 cm	e2 = 17 cm
d3 = 88 cm	e3 = 18 cm
d4 = 6 cm	
d5 = 30 cm	
d6 = 37 cm	

→ En enceinte climatique

Même si les deux mesurent la température et l'humidité, les capteurs Testo sont plus adaptés pour des mesures au sein de l'échantillon grâce à leurs thermocouples, tandis que la taille des capteurs *iButton* permet de les placer en hauteurs. Le thermocouple est composé d'un joint d'alliage chrome et nickel et d'un alliage aluminium et nickel. Le Tableau 2 présente les différents instruments.





RESULTATS : PERTE DE MASSE ET TAUX D'ÉVAPOTRANSPIRATION

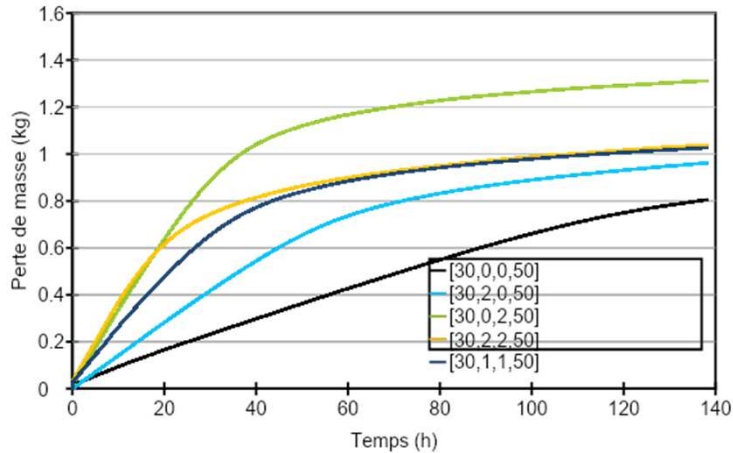


Figure 12 : Courbe des pertes de masse en fonction du temps ((T,Rad,V,HR))

- Chaque essai est décrit par un quadruplet : **[Température, Niveau de rayonnement, Niveau de vent, Humidité relative]**
- Immersion dans un bac d'eau pendant 5 min puis drainage pendant 5 h
- Masses sèches différentes entre les différents essais

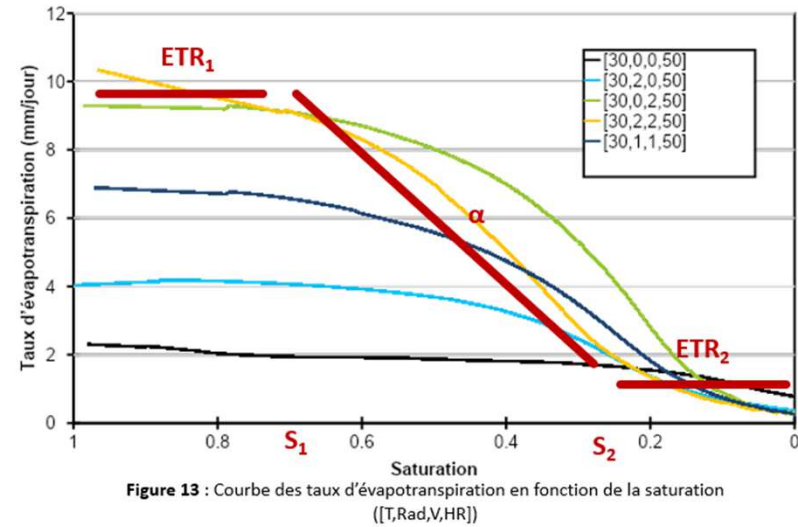


Figure 13 : Courbe des taux d'évapotranspiration en fonction de la saturation ((T,Rad,V,HR))

- Expression du taux d'évaporation **en fonction de la saturation**
- Taux le plus élevé pour les niveaux les plus élevés
- Taux le plus bas pour l'absence de vent et de radiation



La réduction des impacts énergétiques, environnementaux et sanitaires



Bilan des dispositifs existants → Solutions grises

Laboratoire LMDC – INSA Toulouse

Pr. Gilles Escadeillas

Pr. Stéphane Ginestet

Abbass Awarika – Doctorant (2^e année)



*Liberté
Égalité
Fraternité*

WP122 – 19/11/2025





- **Lampe infrarouge** : montée sur **trois pieds réglables**, positionnée à **38 cm** au-dessus de la surface de l'échantillon, assurant un **flux de 1000 W/m²** (contrôlé par **pyranomètre**).
- **Cinq thermocouples** : un sur la surface de l'échantillon, un autre à 1 mm au-dessus, un en face inférieure de l'échantillon (à 4,5 cm de profondeur), un dans le support granulaire (à 8 cm de profondeur), un dernier pour mesurer la température ambiante.
- **Échantillon en béton** : $10 \times 10 \times 4,5$ cm (épaisseur 4,5 cm).
- **Moule en silicone** : $10 \times 10 \times 10$ cm, assurant **l'isolation latérale**.
- **Plaque isolante en polystyrène** ($20 \times 20 \times 9$ cm) : placée **entre le moule et la balance** pour éviter l'influence du rayonnement sur la pesée.
- **Balance électronique** : reliée à un **système Arduino** qui enregistre **la masse en temps réel** et affiche les données sur un **écran de visualisation**.
- **Centrale d'acquisition** : enregistre automatiquement **les températures** fournies par les thermocouples.
- **Hygrothermographe** : mesure en continu **l'humidité relative** et **la température** dans la salle climatisée.
- **Conditions de l'essai** :
 - Durée totale : **24 h** (8 h lampe ON + 16 h OFF).
 - Essai réalisé **en intérieur**, dans une **salle climatisée** ($T = 22-23$ °C ; HR = 40-60 %).





CARACTÉRISTIQUES MATÉRIELS UTILISÉS

Capteur / Instrument	Type / Modèle	Paramètre mesuré	Plage de mesure	Précision
Centrale d'acquisition	KEYSIGHT DAQ970A	Acquisition multi-voies (T, masse, HR, flux)	—	Résolution 0.001 °C
Thermocouples	Type K	Température (°C)	− 75 à 250	± 1 °C
Thermo-hygromètre numérique	RS PRO RS-325	Température (C) / Humidité relative (%)	−10 à +60 / 0–99 %	± 1 °C / ± 5 % HR
Pyranomètre	Solar Light PMA 2144	Rayonnement global (W/m ²)	0 – 1000	± 10
Balance électronique	Sartorius SQP	Masse (g)	0 – 6000	± 0.01 g
Caméra thermique	Testo 872	Température de surface (°C)	− 30 à 650	± 2 % ou ± 2°C
Lampe infrarouge	220 V, 300 W	Rayonnement solaire simulé (W/m ²)	0 – 2000	± 10
Plaque isolante	Polystyrène expansé, épaisseur 6 cm	—	—	—
Moule expérimental	Silicone souple, 10 × 10 × 4.5 cm	—	—	—



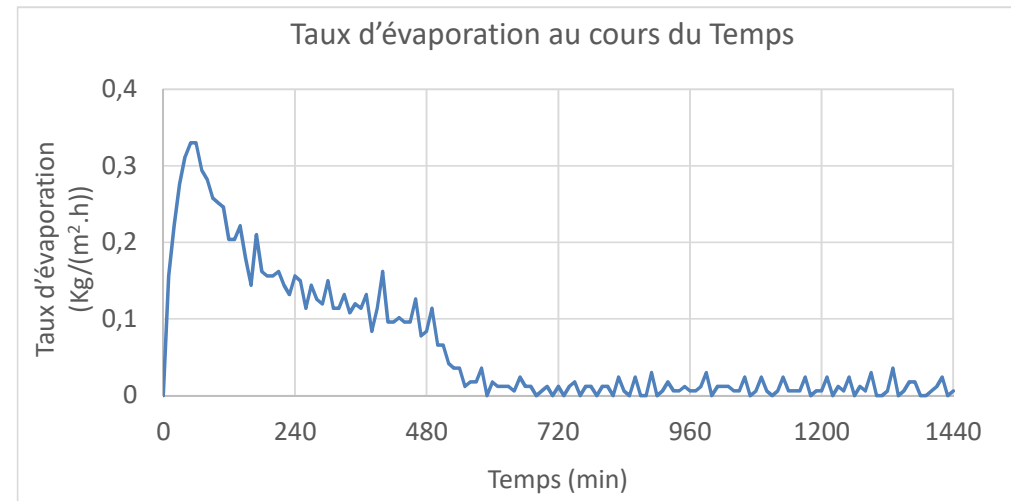
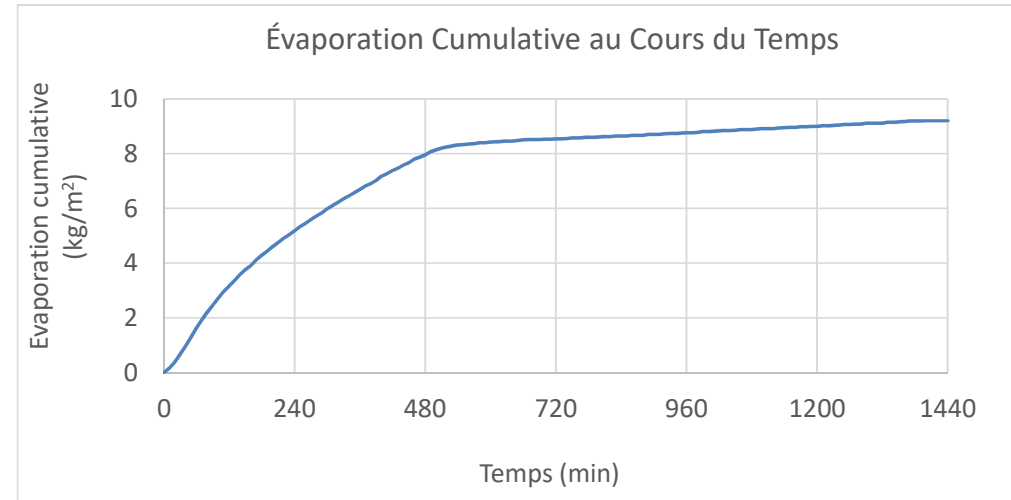
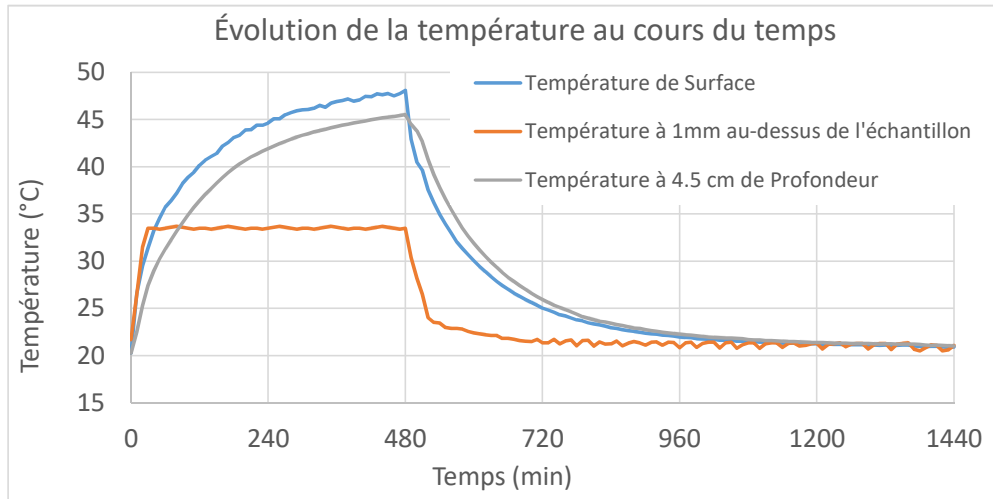


Pavé en béton perméable, préalablement saturé

Dimensions (cm) : 10 × 10 × 4,5

Propriétés physiques :

- Porosité totale : 18,5 %
- Masse volumique apparente : 2081,9 kg/m³
- Perméabilité à l'eau : 0,42 cm/s



La réduction des impacts énergétiques, environnementaux et sanitaires



Bilan des dispositifs existants → Solutions grises

Laboratoire Interdisciplinaires Formes Architecture Milieux

Pr. Philippe Devillers



Laboratoire Interdisciplinaire
Formes Architectures Milieux



*Liberté
Égalité
Fraternité*

WP122 – 19/11/2025





DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Protocole expérimental:
8 heures à 1000 W/m^2
+
16 heures à 0 W/m^2

Préconditionnement:
24 heures dans l'eau

Lampe infrarouge
 1000 W/m^2

Onduleur

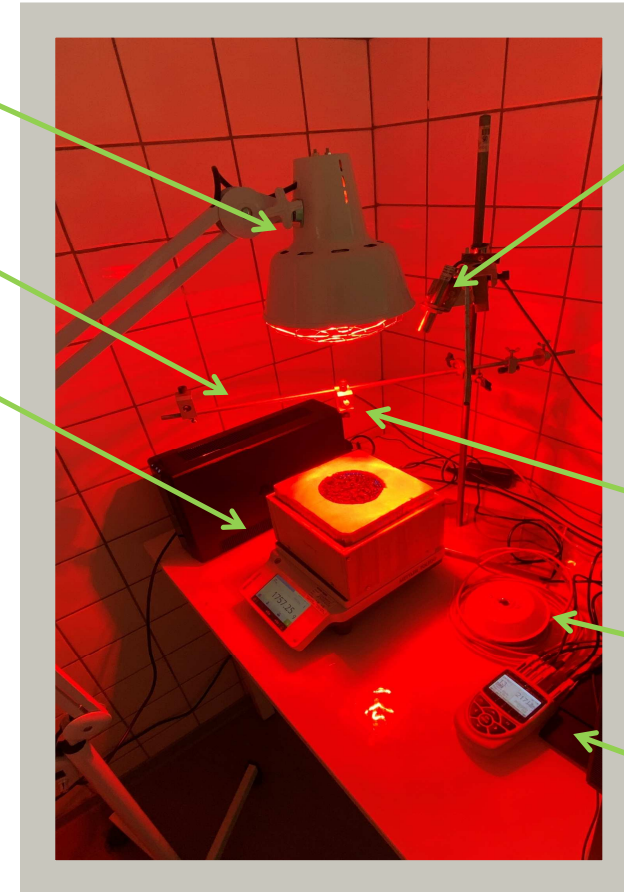
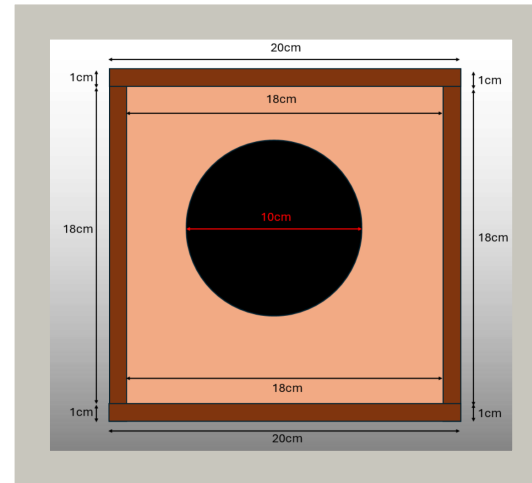
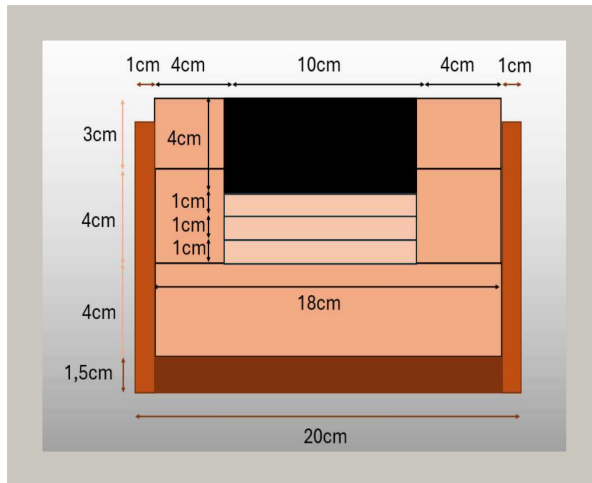
Balance

Température
de surface

Température
et Humidité
Relative

Pyranomètre

Centrale
d'acquisition





CARACTÉRISTIQUES MATÉRIELS UTILISÉS

Centrale d'acquisition ALMEMO
2590-4AS, 4 entrées



Tête de mesure infrarouge compacte AMiR FIA
844 de -20 à 500 °C , haute résolution optique
(tache de mesure 29 mm à distance 300 mm)



capteur FHAD46C2 ALMEMO D6:

Température de -20 à 60°C
Humidité Relative de 5 à 98%



Pyranomètre LSI DPA 053A, de deuxième classe,
rayonnement entre 285 et 3000 nm, de 0 à 2000
W/m², sensibilité de 10 à 15 W/m²



Lampe infrarouge MédiClinic, avec ampoule
de 275 W et variateur électronique

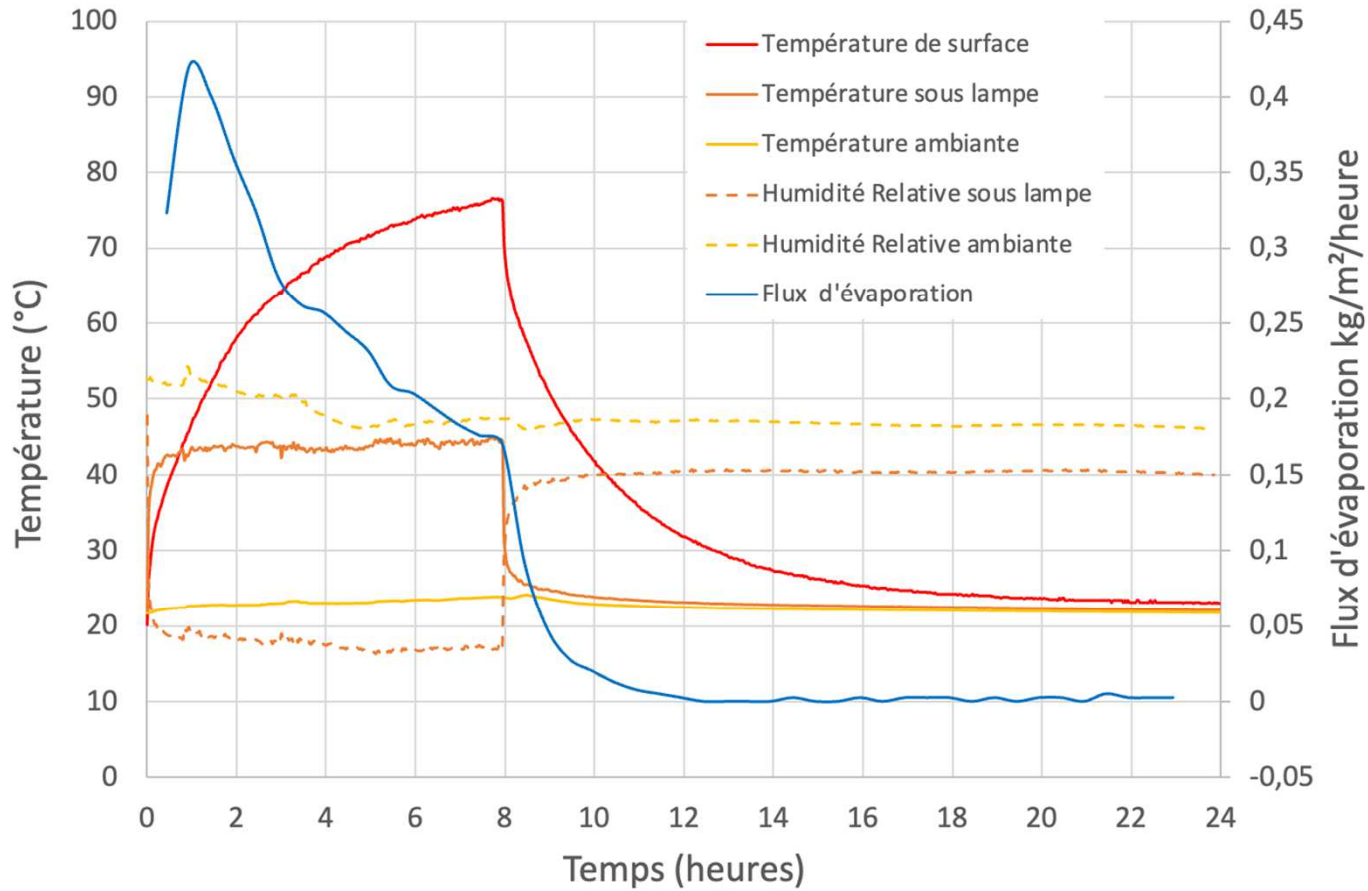


Balance de précision Mettler Toledo
ME3002T, portée 3200 g, précision
d'affichage 0,01g, connectivité via RS232



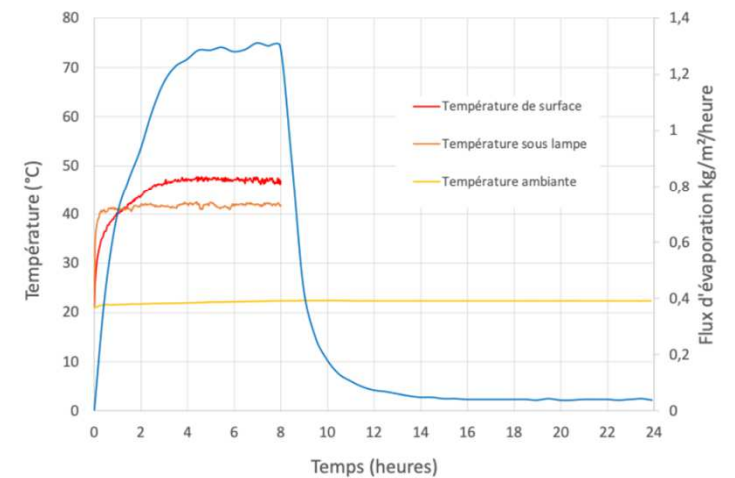


EXEMPLES DE RÉSULTAT D'ESSAI



Masse d'eau initiale:
21,48 g

Masse d'eau
consommée: 16,47
g



La réduction des impacts énergétiques, environnementaux et sanitaires

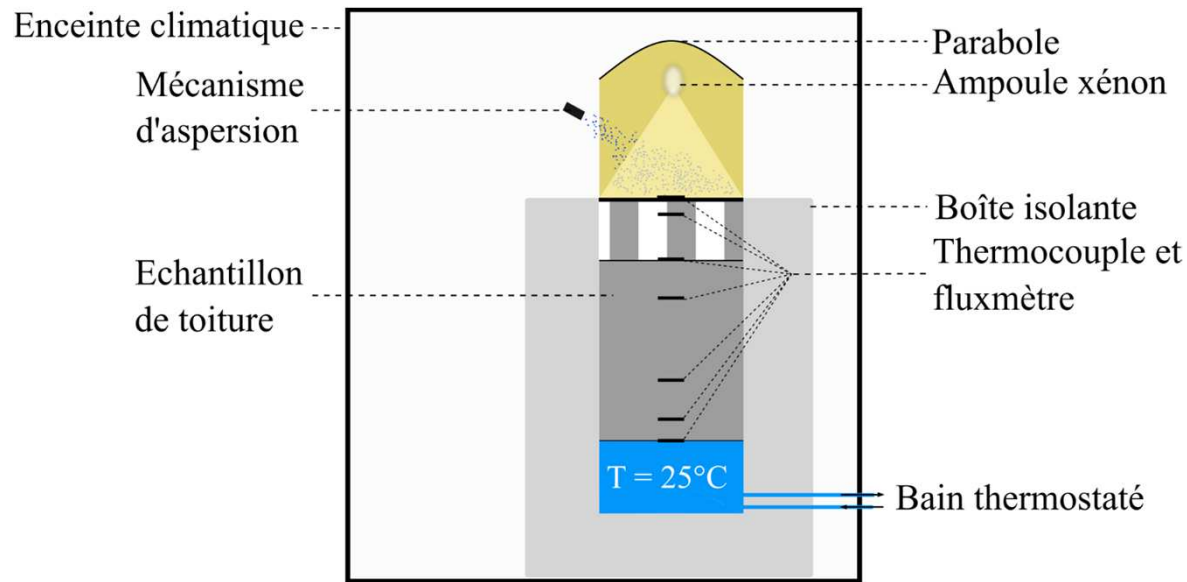


Bilan des dispositifs existants → Solutions grises

Urban Cooling Solutions

Dr. Maxime Chaumont



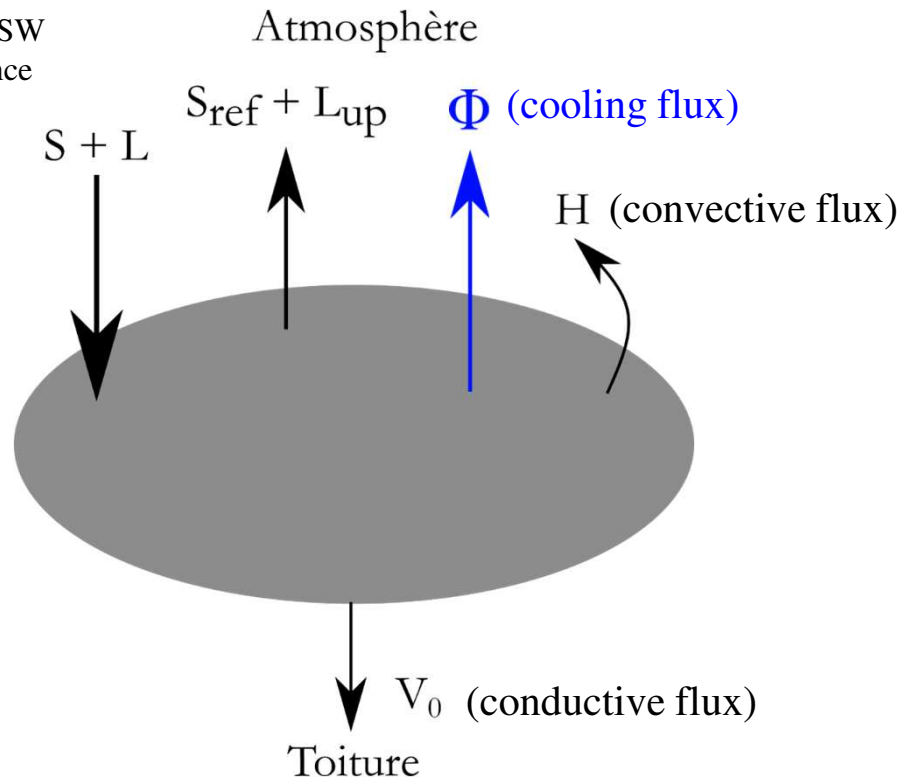


Maxime Chaumont, Frédéric Filaine, Sophie Parison, Martin Hendel, Laurent Royon, *Impact of roof watering on urban cooling during heat waves*, *Energy and Buildings*, Volume 337, 2025, 115693, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115693>.



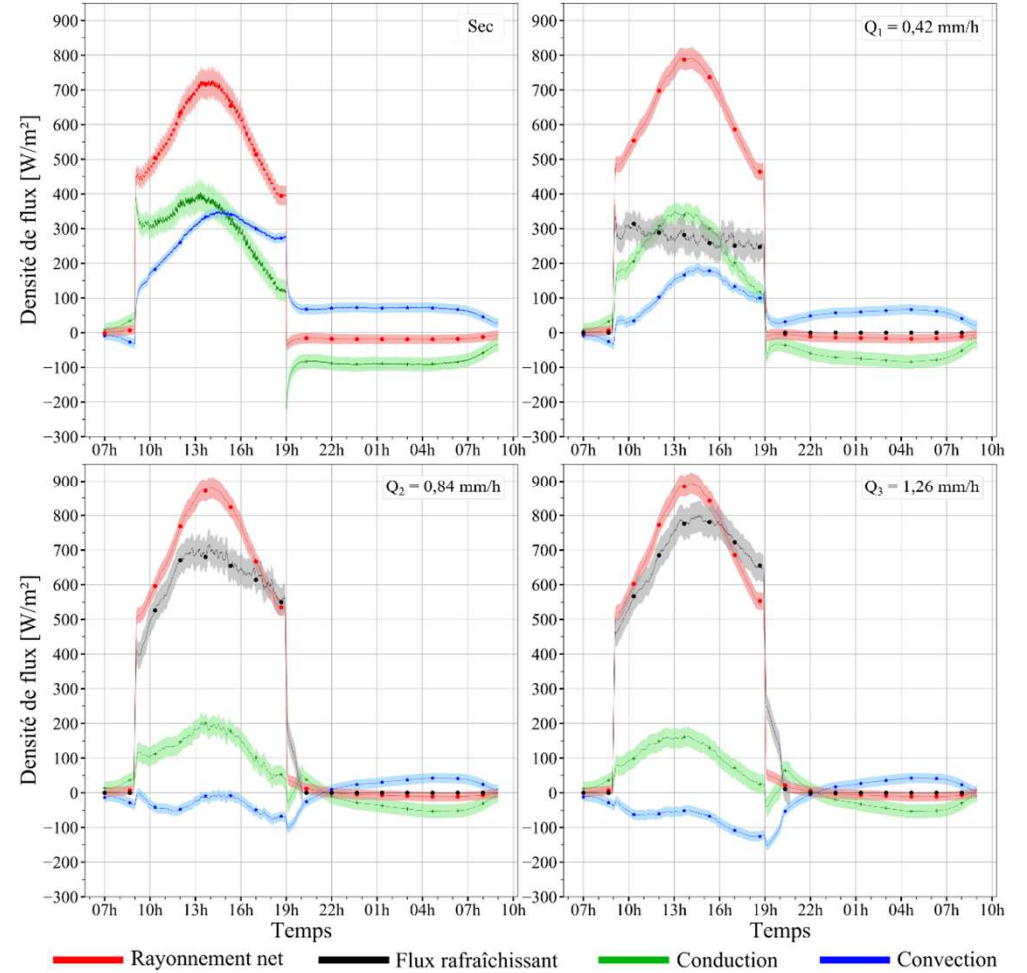
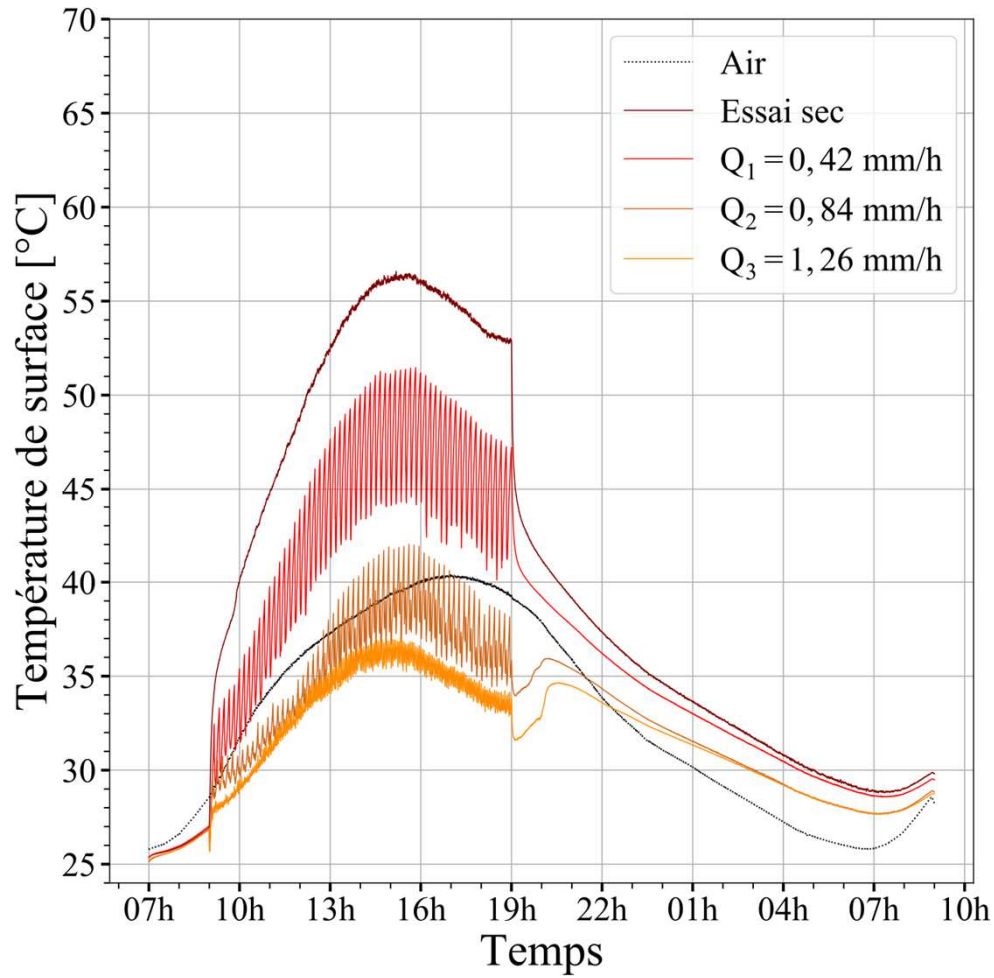


S and L are the SW and LW irradiance





EXEMPLES DE RÉSULTAT D'ESSAI



La réduction des impacts énergétiques, environnementaux et sanitaires



Bilan des dispositifs existants → Solutions vertes

Équipe TEAM du Cerema

Dr. Emmanuel Berthier
Dr. David Ramier





Mesure grâce à un lysimètre par pesée en conditions extérieures

Imaginer un protocole simple (= pas très coûteux)
reproductible (= robuste)
« normalisable »

Mesures: Δ Masse de la solution

Station météo: T°, Humidité, Rg, Vitesse vent
(Drainage)

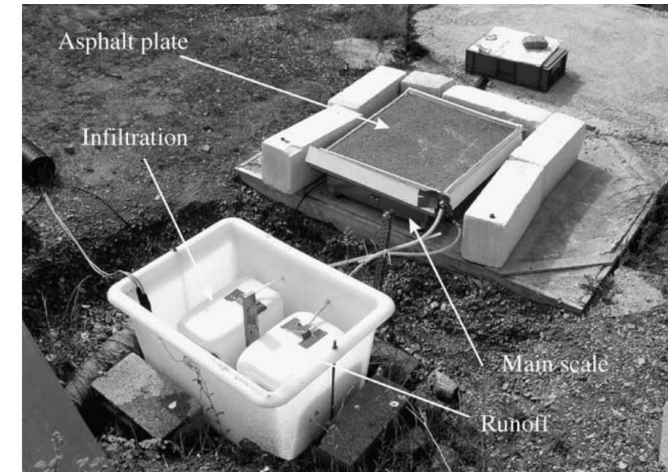


Fig. 2. Photo of the lysimeter placed outdoor: the main scale with an asphalt plate put on and the container collecting runoff and infiltration are visible.

Ramier, D., Berthier, E., Andrieu, H., 2004. An urban lysimeter to assess runoff losses on asphalt concrete plates. *Physics and Chemistry of the Earth* 29, 839–847. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.05.011>





Des solutions «en pot», avec si possible un maximum de caractéristiques :

- Structure globale et dimensions
- Substrat: paramètres et courbes hydrodynamiques
- Végétaux: surface foliaire (LAI), résistance stomatique
-

Grande diversité de solutions possibles, avec des limites:

- Capacité pour la pesée principale
- Adéquation dimensions / système de pesée
- Résolution de la pesée principale = $100\text{g} \times (\text{m}^2 \text{ de solution}) = 0,1 \text{ mm}$



Echantillons à tester lors du stage: un arbre, 1 à plusieurs strate(s) basse(s)





Emplacements à l'extérieur, dégagé (pas d'ombre), station météo à proximité et même exposition que la solution

- Sur plusieurs jours (sans pluie de préférence)
- Etat hydrique initial = structure / substrat ressuyé (??h/min)
- Δt = à minima, mesures matin et soir (= pas obligatoirement en continu)
- Solution de référence (caractériser le contexte d'ET): Hauteur eau libre définie et quasi constante, dans un contenant commun

→ *Indicateurs: LE/R_n et LE/LE_{ref} (% , agrégé à la journée / $\sim 12h$ TU) en période hydrique optimale et en période de stress hydrique ; CME et Réserve utile (mm)*

LE = flux latent d'évaporation / R_n = rayonnement net / CME = Capacité Maximale en Eau



La réduction des impacts énergétiques, environnementaux et sanitaires



Bilan des dispositifs existants → Solutions vertes

En cours de développement

ER5 – LGCgE - UArtois

Dr. Laurent Libessart
Pr. Stéphane Lassue
Alicia M'Bati (Stagiaire BUT3)





Objectif de l'essai : Mesure de l'évapo(tranpi)ration à l'aide d'une sonde foliaire

Dispositif :

- Deux Boites Plastiques
- Dimension de l'échantillon : 28*28 cm
- Épaisseur : de 4 à 10 cm
- Pas d'isolation
- Lieu : Laboratoire, devant la fenêtre orienté Sud
- Boite de dessus : ouverte / fermée
- Échantillon :
 - Sable sec
 - Sable humide (Mesure teneur en eau)
 - Terreau
 - Terreau + plante / gazon
→ Analyse d'image et VPD

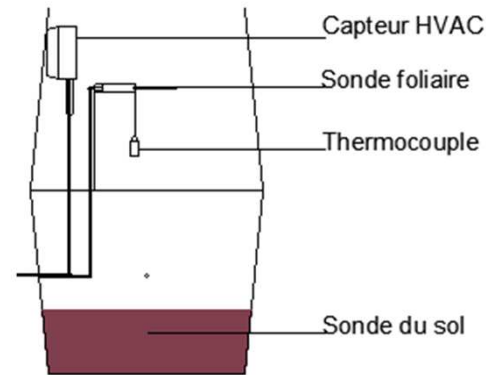


Schéma du dispositif

Protocole de l'essai :

- Boite vide avec capteur et sonde
- Pesée
- Matériau (échantillon)
- Mise en place de la boite au-dessus (boite fermé/ouverte)
- Pesée chaque jour
- Acquisition

Paramètres mesurés :






- Humidité : sol, ambiant, foliaire (%)
- Température : sol, ambiante (T°C)
- Rayonnement solaire





CARACTÉRISTIQUES MATÉRIELS UTILISÉS

Tableau du matériel utilisé pendant l'essai :

Numéro de chaîne	Instruments	Paramètres
1 : Capteur d'humidité HD3910 (%) 2 : Capteur de température HD3910 (°C)	 Capteur teneur en eau volumétrique	Calibre : 1-5 V Valeur haute : 3 V = 60% / 80°C Valeur basse : 0.5 V = 0% / -20°C
3 : Capteur d'humidité HD3901 HAUT (%) 4 : Capteur d'humidité HD3901 BAS (%)	 Sonde foliaire	Calibre : 1-5 V Valeur haute : 3 V = 100 % Valeur basse : 0.5 V = 0 %
5 : Température du capteur HVAC 40T (°C) 6 : Humidité du capteur HVAC 40T (%)	 Capteur humidité dans l'air	Calibre : 1-5 V Valeur haute : 10 V = 80 °C / 100% Valeur basse : 0 V = -20 °C / 0%
9 : Pyranomètre (mV)	 Pyranomètre	Sensibilité : 15,1 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ Flux solaire
10 : Température ambiante de l'expérimentation (°C)	 Thermocouple type T	Température (°C)



Ref balance : 8 kg
précision -> 0,1 g



Graphitec GL220
Acquisition toute les 5 min

→ Possibilité d'évolution du dispositif :

- Résistance chauffante
- Lampe Xénon, IR, Halogène (300 à 500 Watt)





EXEMPLES DE RÉSULTATS D'ESSAI

Boite fermée avec substrat sans gazon

Ep : 9 cm

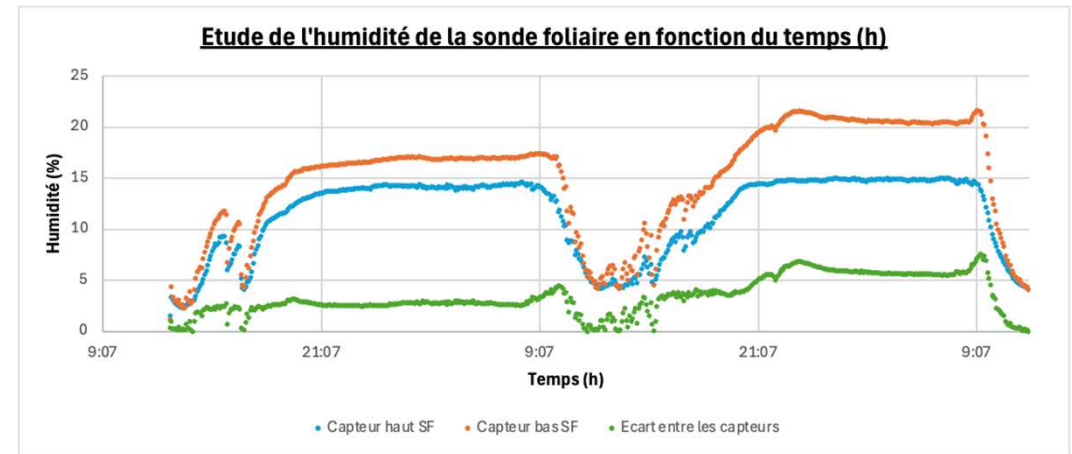
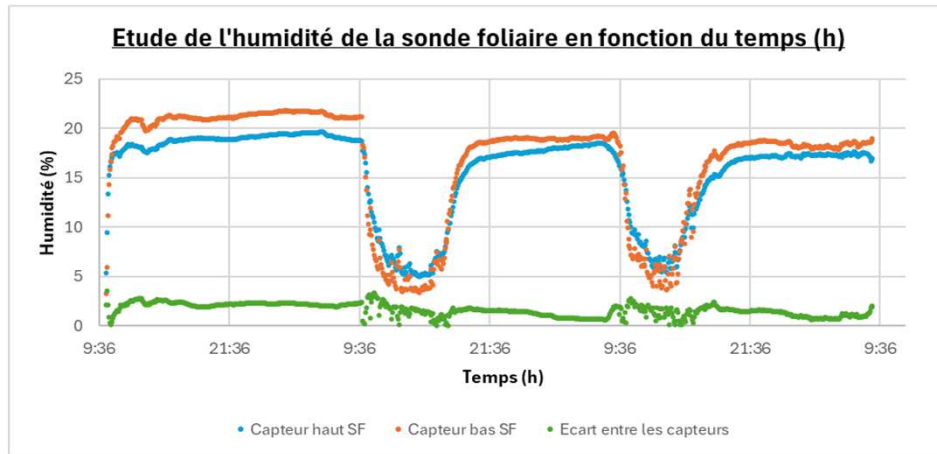
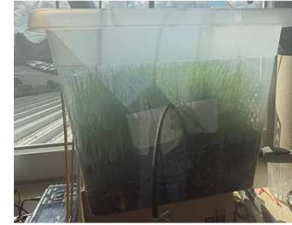


Flux solaire mesuré
max : 1000 W/m²
(14h)

Boite fermée substrat et gazon

Ep : 9 cm

Ht plante : 12 cm



→ Augmentation de l'humidité mesuré avec le gazon

Essais en cours : Sable humide, Lierre





► La suite va consister à :

- i) préciser les points communs entre nos différents protocoles (conditions climatiques, état hydrique des échantillons, mesures, ...)
- ii) préciser les échantillons à tester (plusieurs, en distinguant des solutions grises et vertes). Un ou des échantillons de référence (céramique poreuse, surface d'eau libre, ...) seront aussi identifiés / fabriqués
- iii) intégrer d'autres sous-WP du PN: WP121 (lien avec les transferts thermiques) et WP21 (intégration des données d'évapo(transpi)ration dans les modèles microclimatiques)



La réduction des impacts énergétiques, environnementaux et sanitaires



Merci pour votre attention

<https://www.pn-issu.fr>

