

UNIVERSITÉ
— PARIS-EST

ÉCOLE DOCTORALE — PARIS-EST
Sciences, Ingénierie et Environnement

Journée scientifique de l'École Doctorale Science, Ingénierie et Environnement

Enjeux sociétaux sur l'énergie et le climat

3 SOLUTIONS POUR LUTTER CONTRE LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE

LIED
PIERI Laboratoire Interdisciplinaire
des Energies de Demain
Paris 7 Interdisciplinary Energy
Research Institute

Laurent ROYON



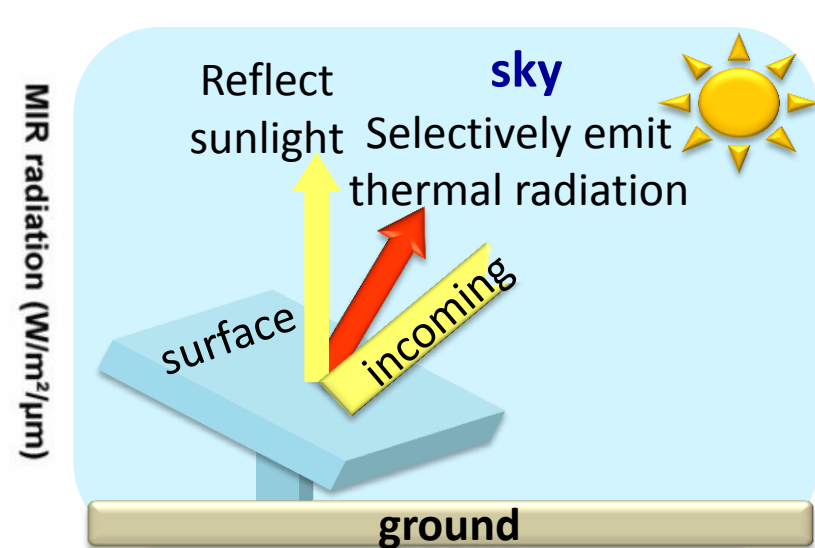
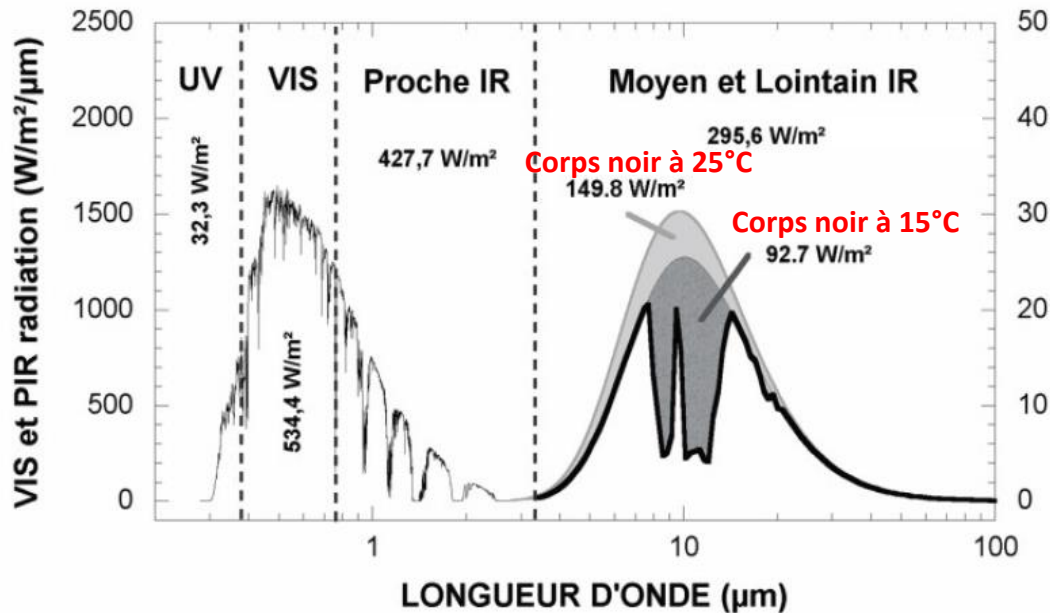
3 solutions pour lutter contre le réchauffement climatique

**Matériaux biomimétiques pour la
récupération de la vapeur d'eau
atmosphérique et climatisation passive
par échange radiatif**

**Régulation et gestion de l'énergie thermique
par l'utilisation de matériaux à changement
de phase**

**Technique de rafraîchissement et revêtements
innovants pour l'adaptation au changement
climatique en milieu urbain**

Matériaux biomimétiques pour la récupération de la vapeur d'eau atmosphérique et climatisation passive par échange radiatif



$$P_{cool}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{Sun} - P_{cond+conv}$$

spectre du rayonnement solaire incident (trait fin) et du spectre Infrarouge incident à la surface du globe (trait gras). Les puissances reçues (intégration du spectre) pour chaque composante du spectre sont indiquées en $W\ m^{-2}$.

forte réflectivité dans le spectre solaire
forte émissivité dans les infrarouges



Refroidissement radiatif

Matériaux biomimétiques pour la récupération de la vapeur d'eau atmosphérique et climatisation passive par échange radiatif



Theoretical max. yield :

$$\frac{P_{\text{cool}} \times \text{time}}{L} = 1 \text{ L/m}^2/\text{night}$$

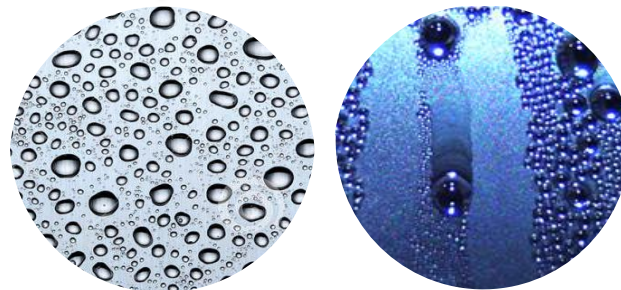
Faible rendement

Tiny drops stick on the surface

Meteorological conditions

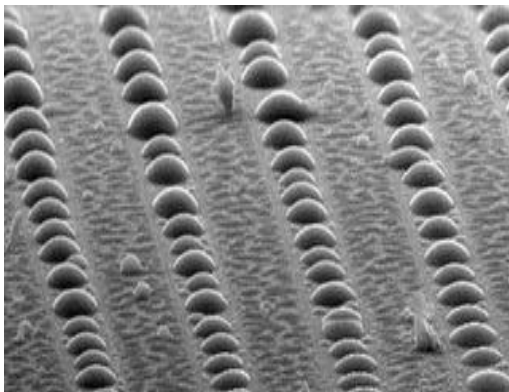
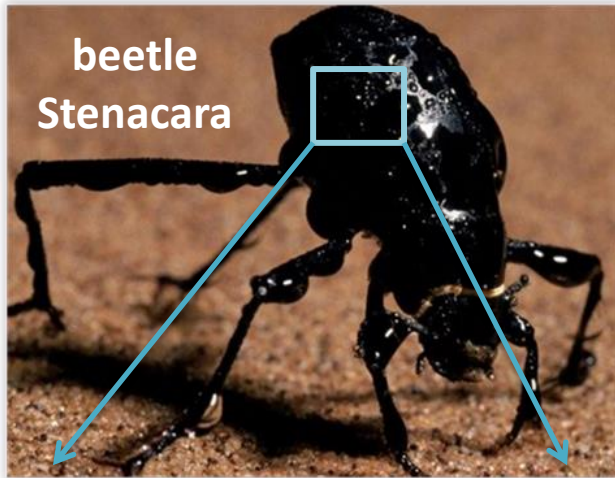
0 0.1 0.3 1 L/m²/night

Current harvesting window



- **Objectif:** développer des surfaces innovantes permettant :
 - d'élargir la fenêtre de collecte de l'eau de rosée
 - d'augmenter la quantité d'eau collectée

Matériaux biomimétiques pour la récupération de la vapeur d'eau atmosphérique et climatisation passive par échange radiatif



A. R. Parker, *Nature*, 2001



Jie Ju & al, 2012 ,
Nature communications

- **Croissance plus rapide par coalescence**
- **Drainage plus précoce**

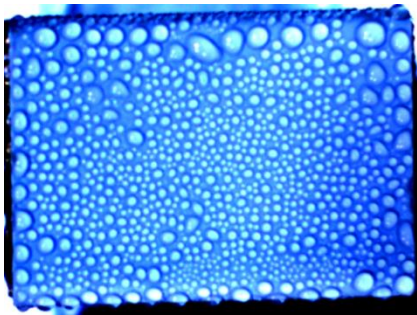
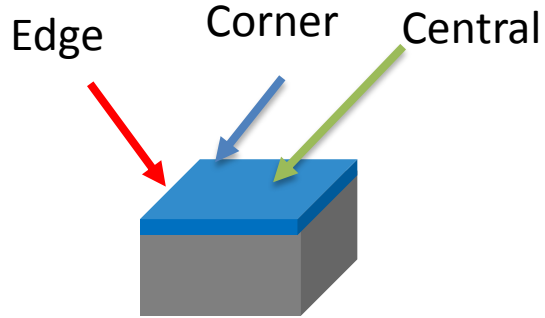
Matériaux biomimétiques pour la récupération de la vapeur d'eau atmosphérique et climatisation passive par échange radiatif

← 20 cm →

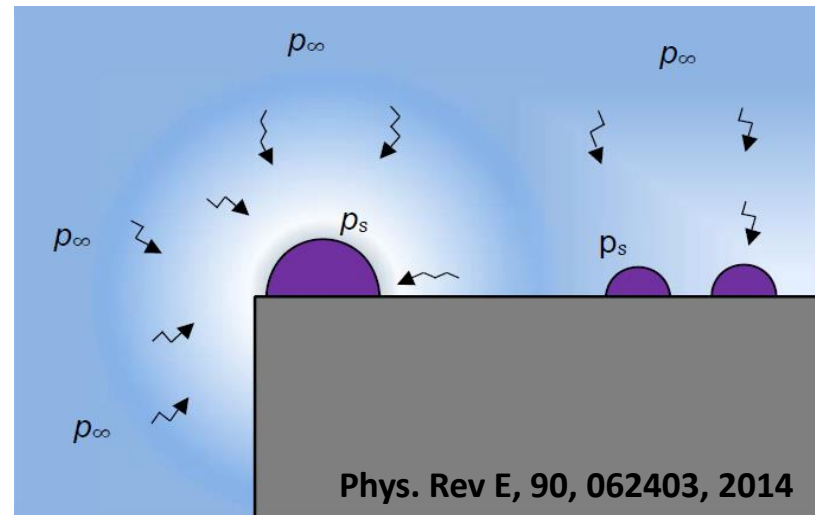
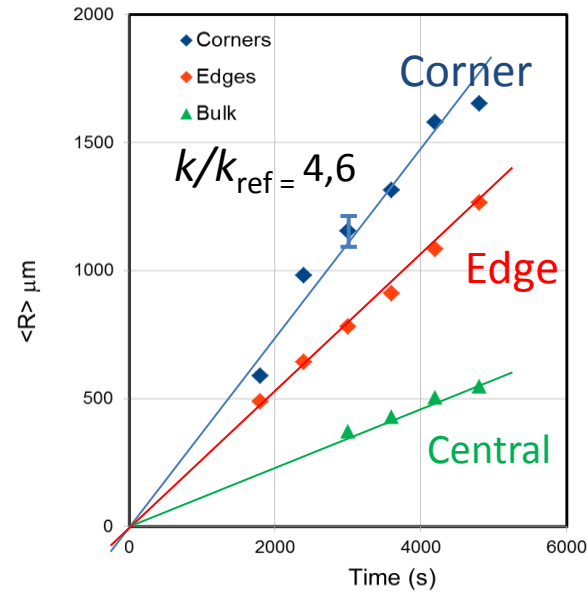


Drops detach from the top and wipe out the surface

Matériaux biomimétiques pour la récupération de la vapeur d'eau atmosphérique et climatisation passive par échange radiatif



$$\langle R \rangle = k_{ref} t$$



Matériaux biomimétiques pour la récupération de la vapeur d'eau atmosphérique et climatisation passive par échange radiatif

Dispositif expérimental

Smooth

Grooved

Wafer

	SiO ₂	SU8
θ_r	5°	65°
θ_a	35°	80°

Thermostat

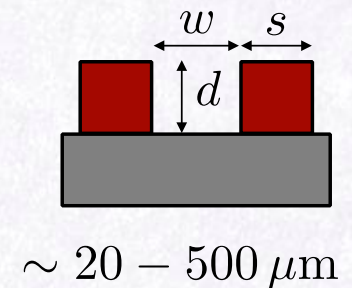
α

Absorbent cloth

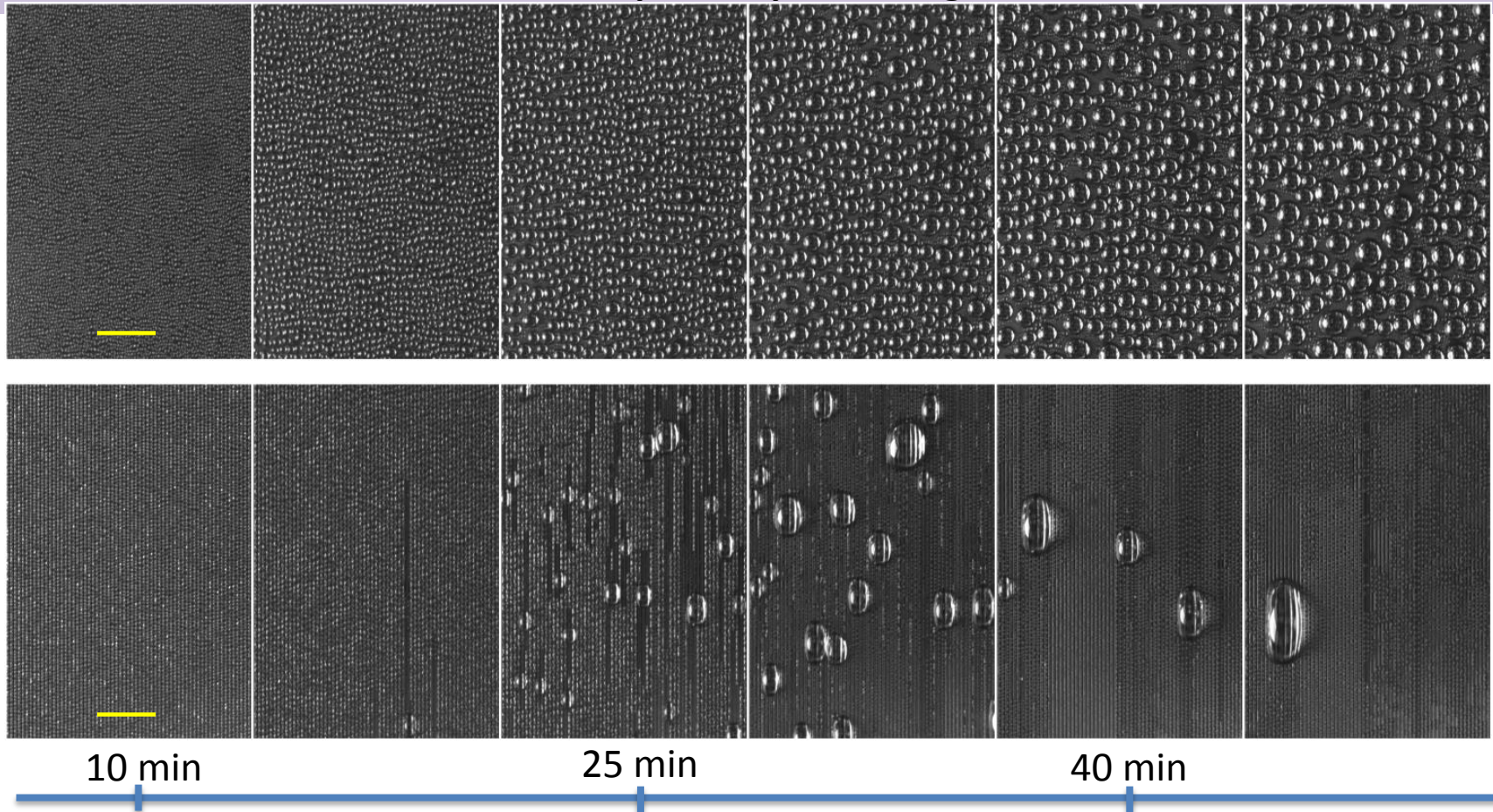
g

Scale

Measure
drained
water

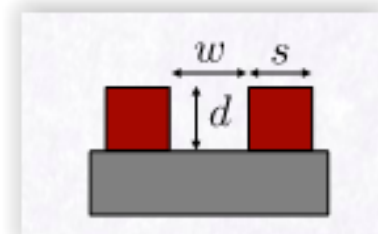
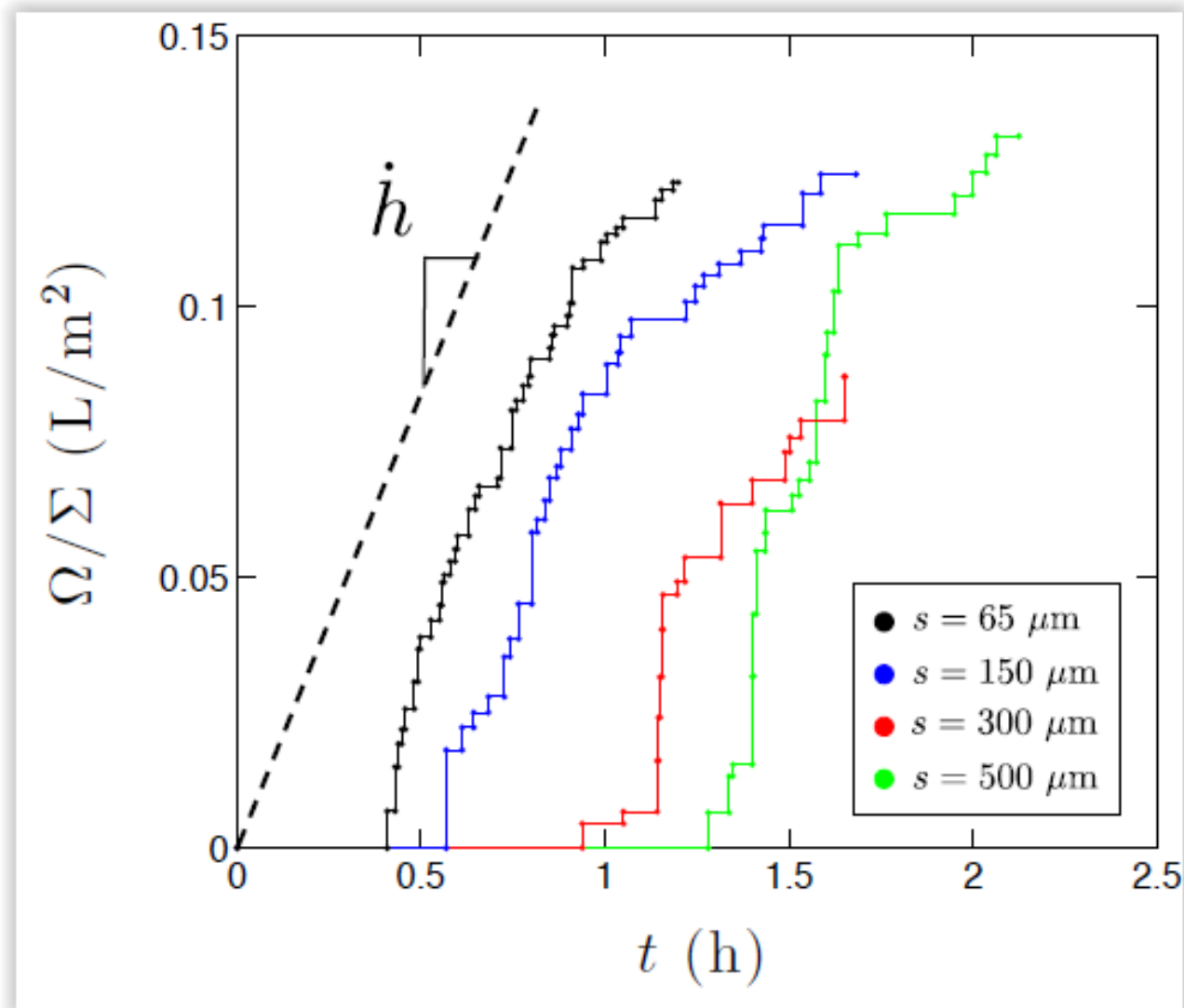


Matériaux biomimétiques pour la récupération de la vapeur d'eau atmosphérique et climatisation passive par échange radiatif

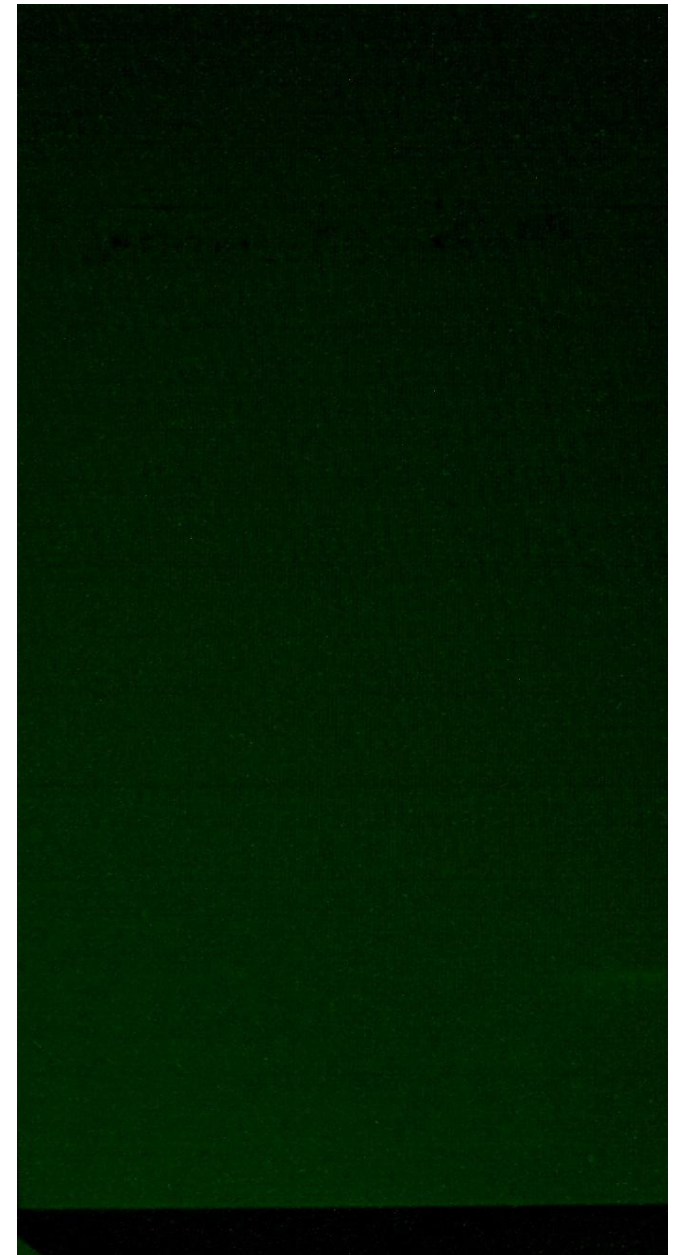
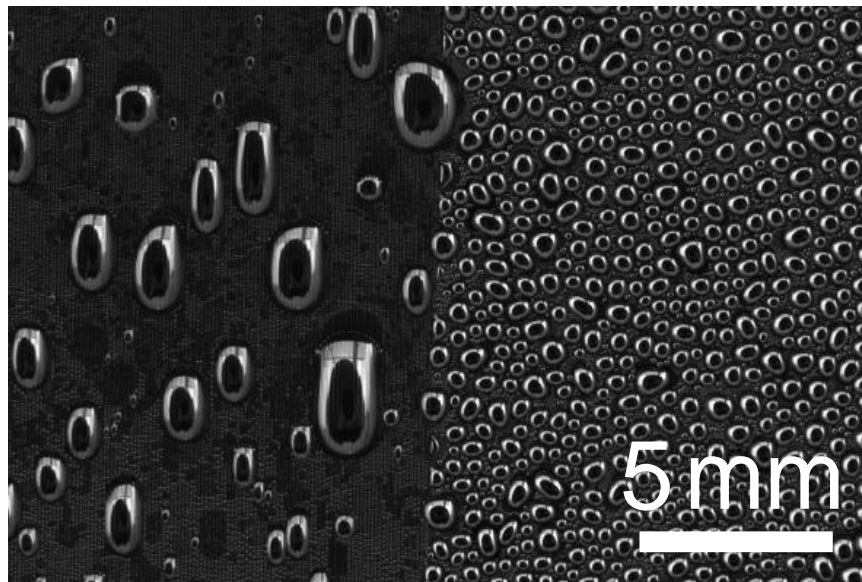
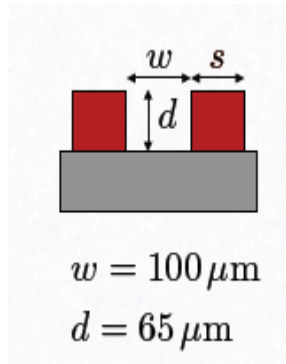


Comparison of pictures taken during the condensation of dew on a smooth plane (up) and on a grooved plane (bottom, with rectangular grooves of width $65 \mu\text{m}$ and height $100 \mu\text{m}$) in identical conditions: both plates are inclined at 45° , cooled at 5°C and placed in a controlled atmosphere of temperature 33°C and relative humidity 50% . Yellow lines show 2 mm , time interval between two images is $7 \text{ min } 30 \text{ s}$.

Matériaux biomimétiques pour la récupération de la vapeur d'eau atmosphérique et climatisation passive par échange radiatif



Matériaux biomimétiques pour la récupération de la vapeur d'eau atmosphérique et climatisation passive par échange radiatif



Matériaux biomimétiques pour la récupération de la vapeur d'eau atmosphérique et climatisation passive par échange radiatif

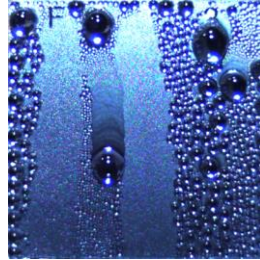
Gouttes « avalées » par les rainures

Macrogoutte nourrie par la coalescence des μ -gouttes dans rainures



Matériaux biomimétiques pour la récupération de la vapeur d'eau atmosphérique et climatisation passive par échange radiatif

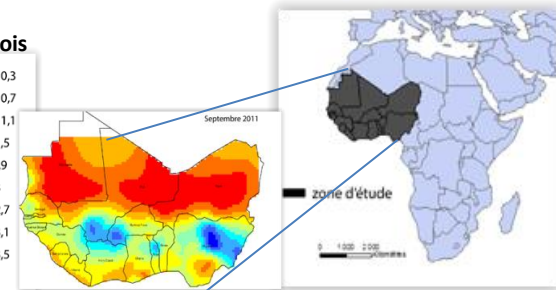
Aspects fondamentaux sur la condensation, le mouillage et le ruissellement d'eau sur ces surfaces texturées



Développement d'un outil de prévision de rosée
Traitement géostatistique (méthode de krigeage)

Physicien – Chimiste
SHS – Géographe

mm/mois



Distribution et utilisation de l'eau
stratégie d'implantation
Potabilité de l'eau

Toiture rafraichissante
Condenseur d'eau de grande
échelle



ONG (OPUR)

Enjeux sociétaux sur l'énergie et le climat

3 solutions pour lutter contre le réchauffement climatique

Matériaux biomimétiques pour la récupération de la vapeur d'eau atmosphérique et climatisation passive par échange radiatif

Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique en milieu urbain

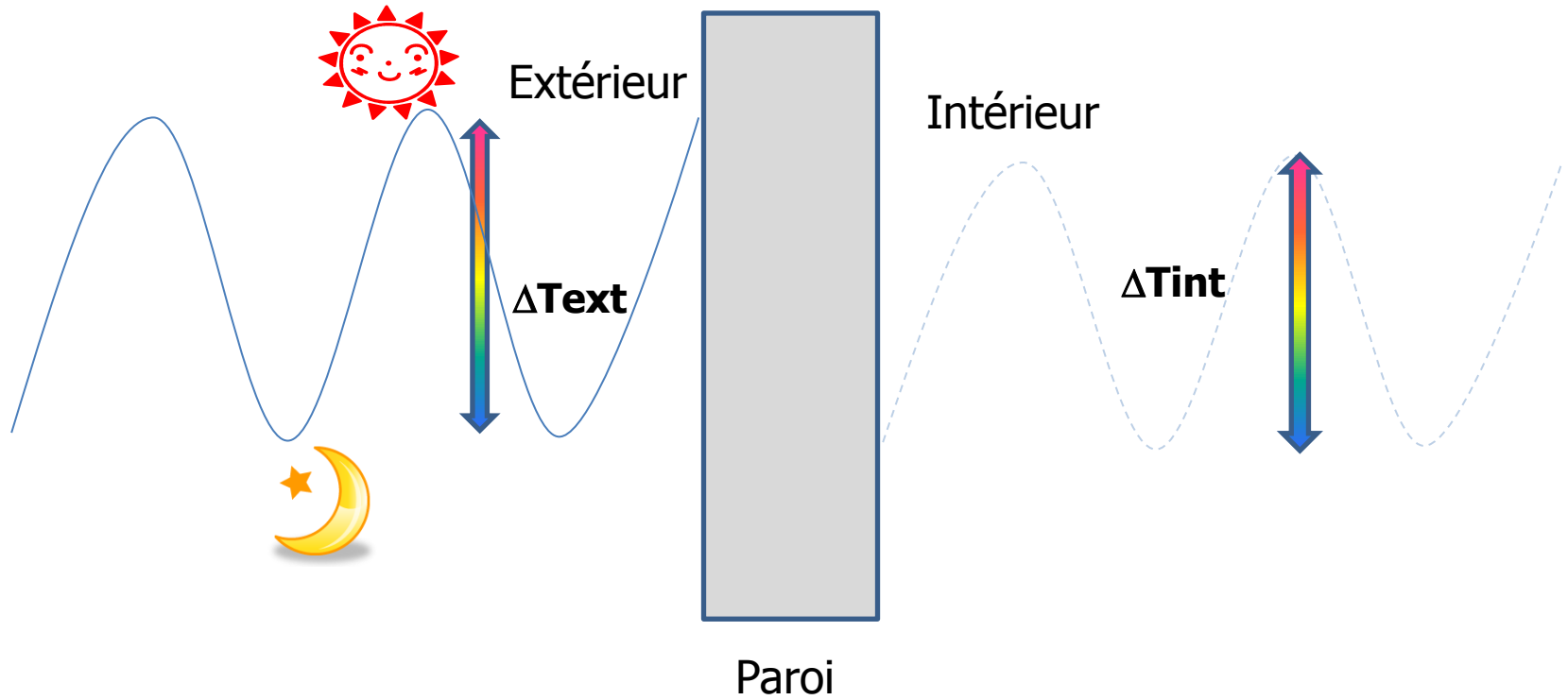
Qu'est-ce qu'un MCP ?

- Intérêt du MCP : utilisation du changement d'état

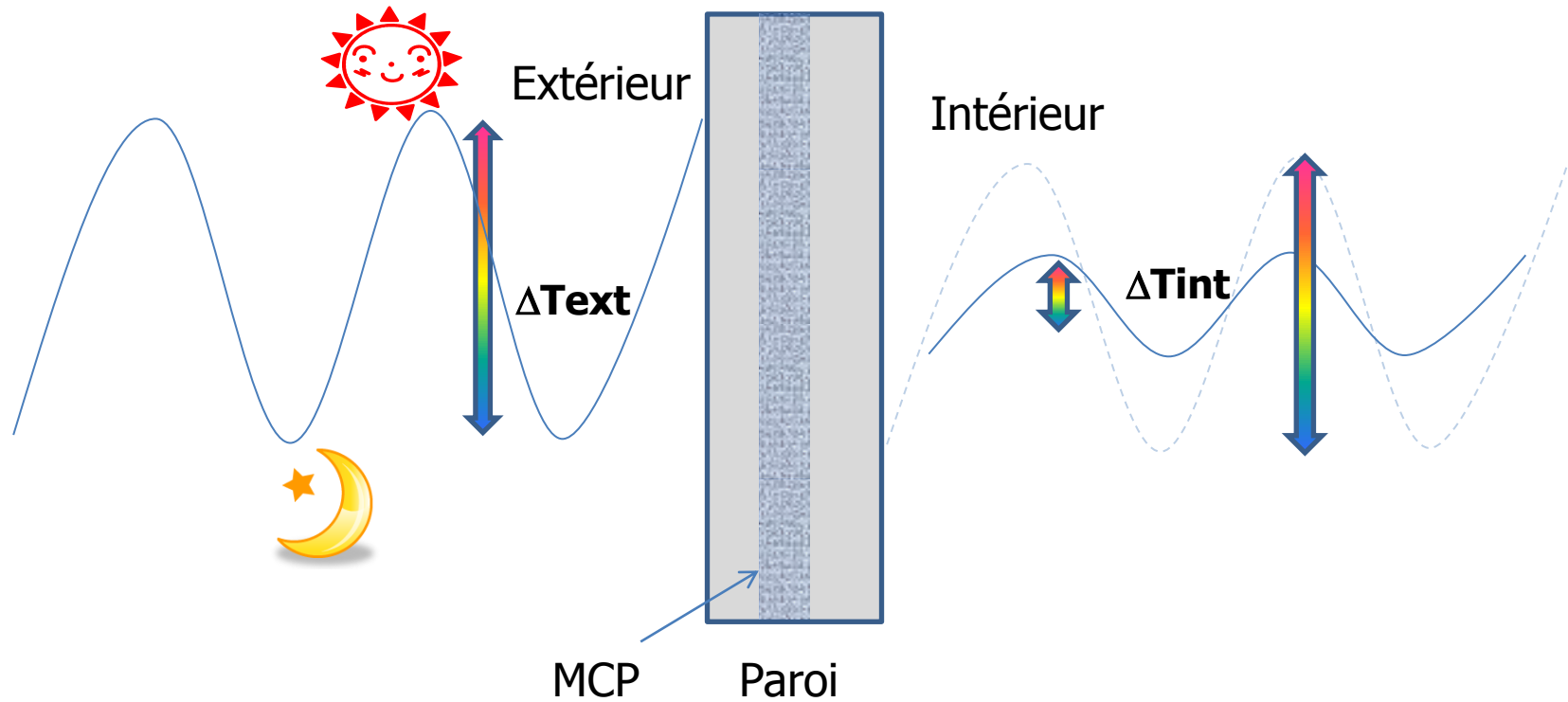


- Stockage d'énergie thermique de haute densité
 - Retarde l'arrivée de l'onde thermique
 - Ecrête les pics de température

Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase



Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

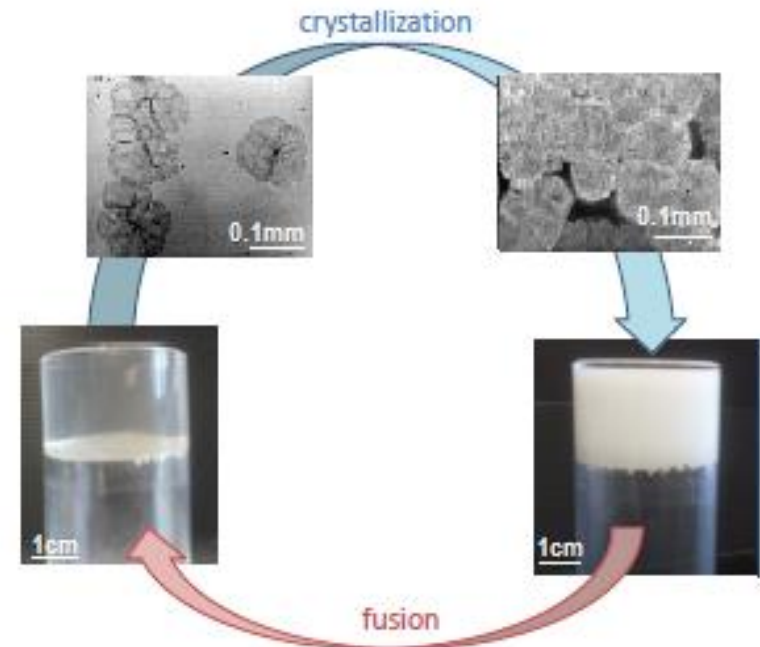
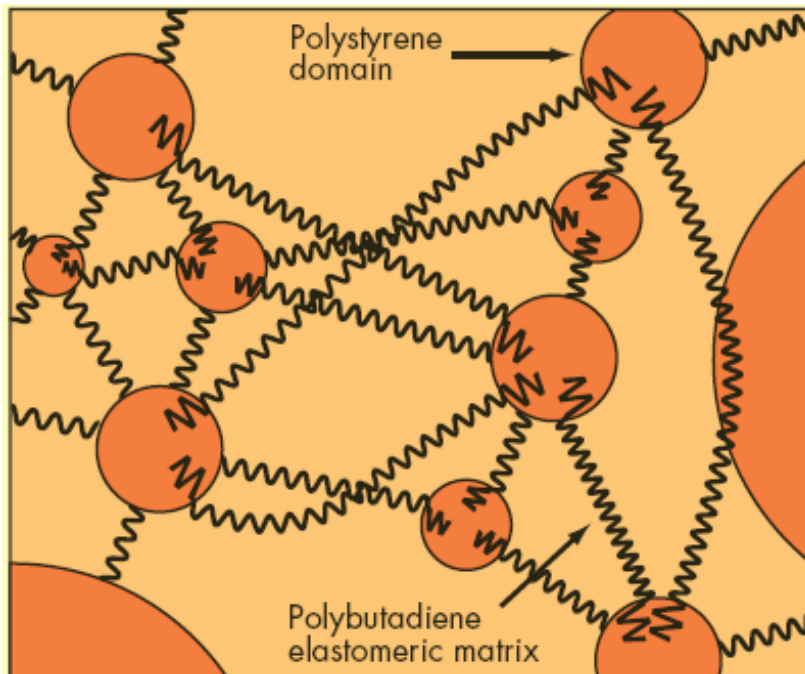


Principal verrou technologique : enrobage du MCP

Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

- **MCP stable mécaniquement**

- Assemblage entre une paraffine et un polymère
- Pas de contenant



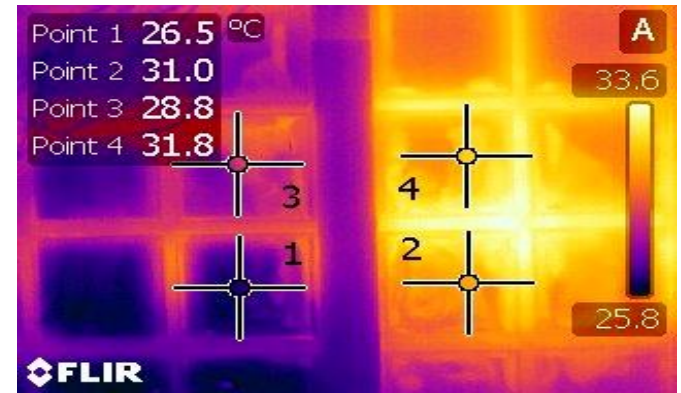
Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

Paroi avec MCP

- Incorporation du MCP dans une paroi verticale**



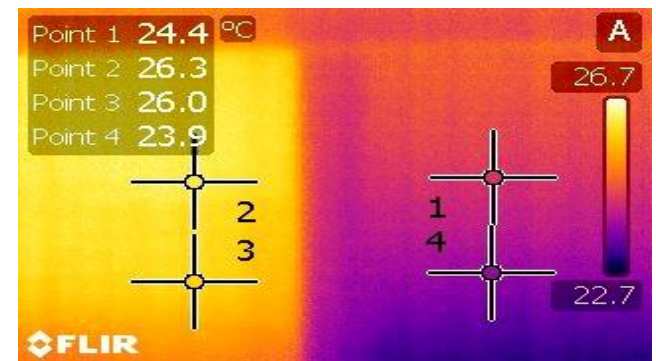
Briques de verre



Brique creuse

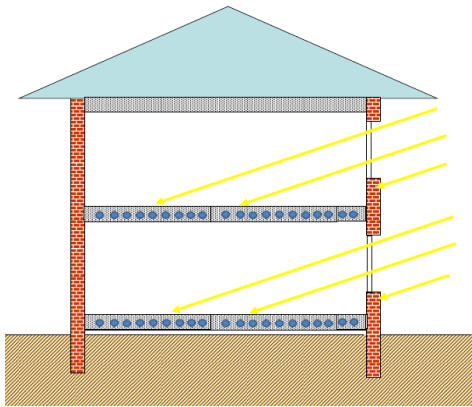


Images Infra-Rouge



Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

Application « Batiment »

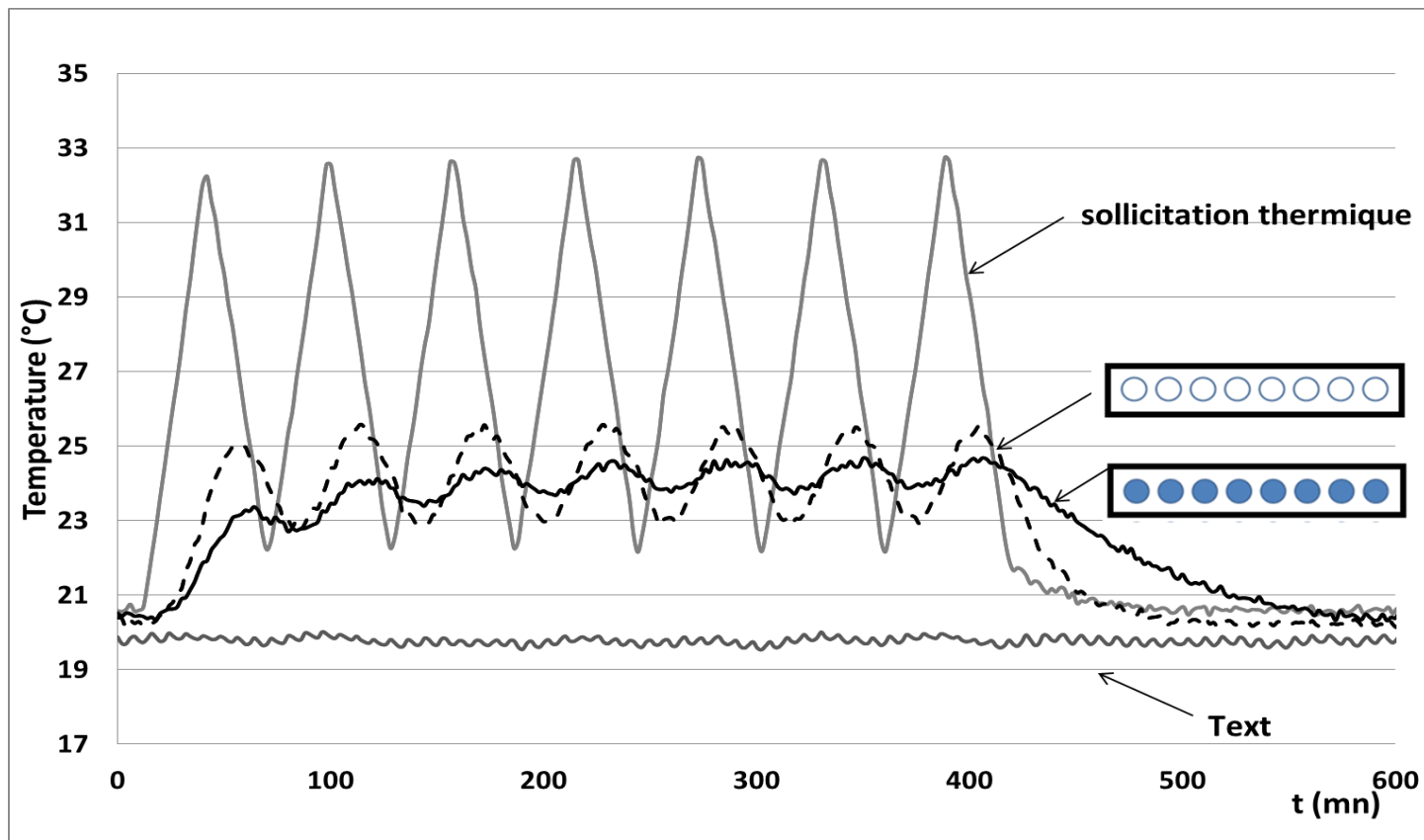


Echelle « Système »

Thèse Laurie Karim
(2011-2014)



Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

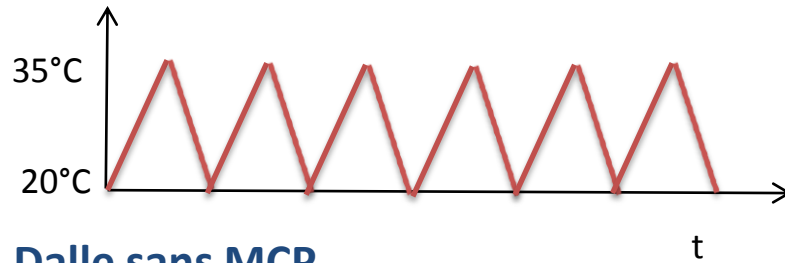


	Plancher sans MCP	Plancher sans MCP
Tmax (°C)	25.4 ± 0.1	24.4 ± 0.1
Tmin (°C)	22.9 ± 0.1	23.7 ± 0.1
ΔT (°C)	2.6 ± 0.1	0.6 ± 0.1

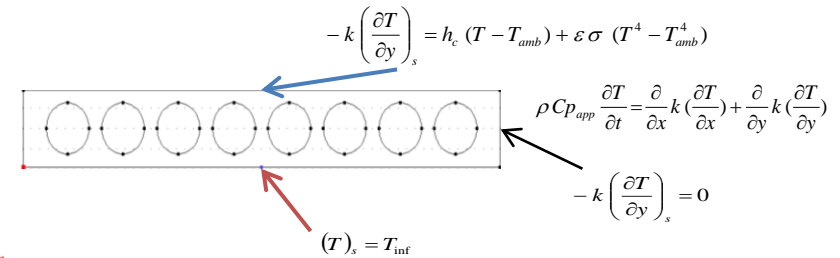
L. Royon & al.
Energy & Buildings 2013

Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

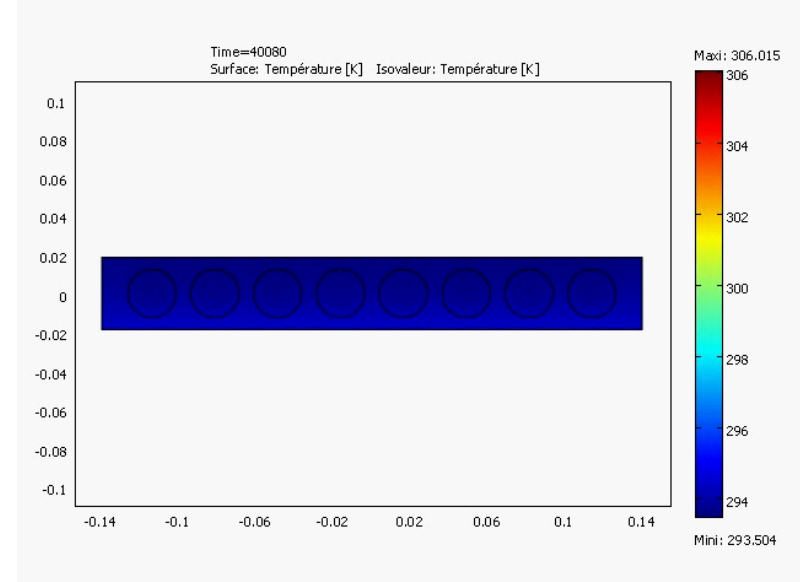
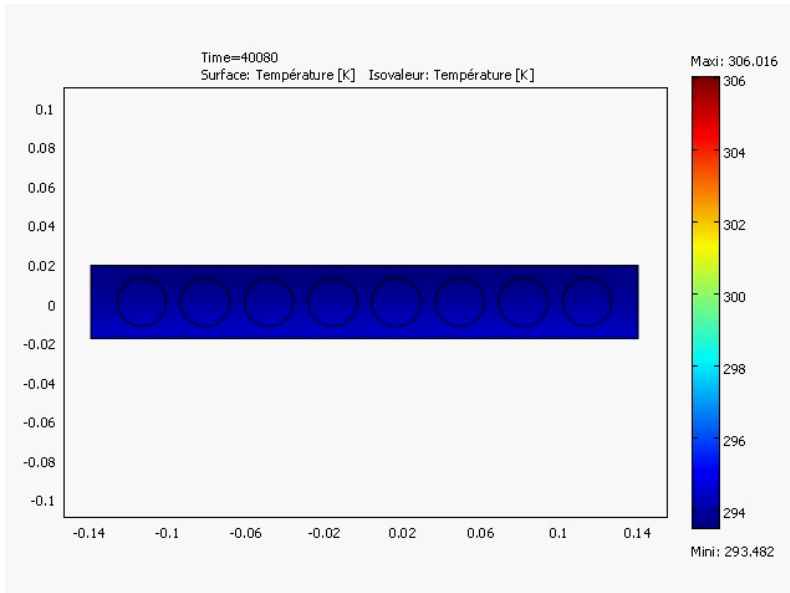
Simulation numérique (sous Comsol Multiphysics)



Dalle sans MCP

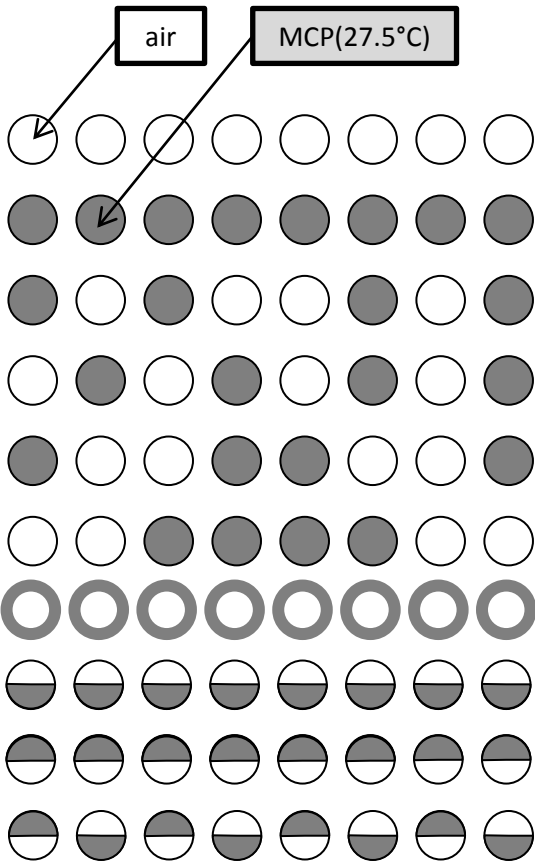


Dalle avec MCP



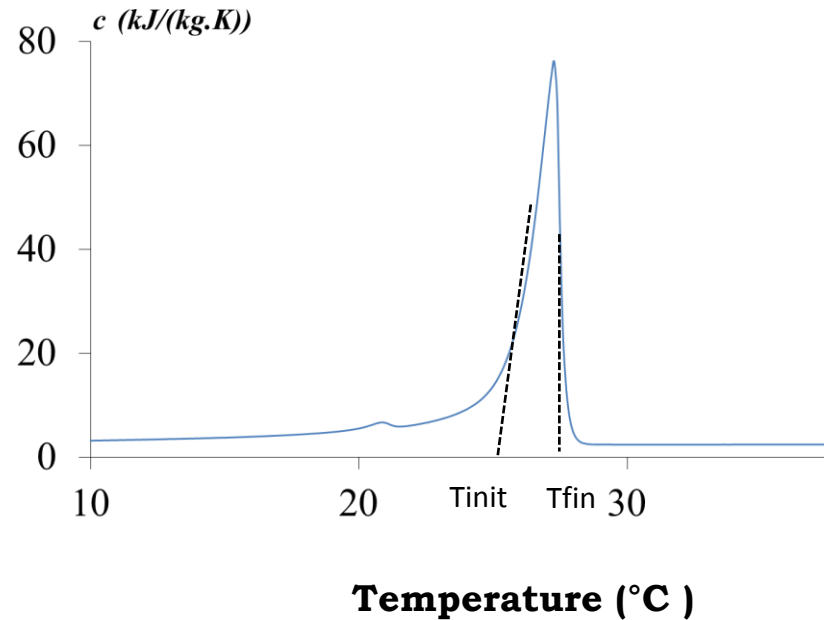
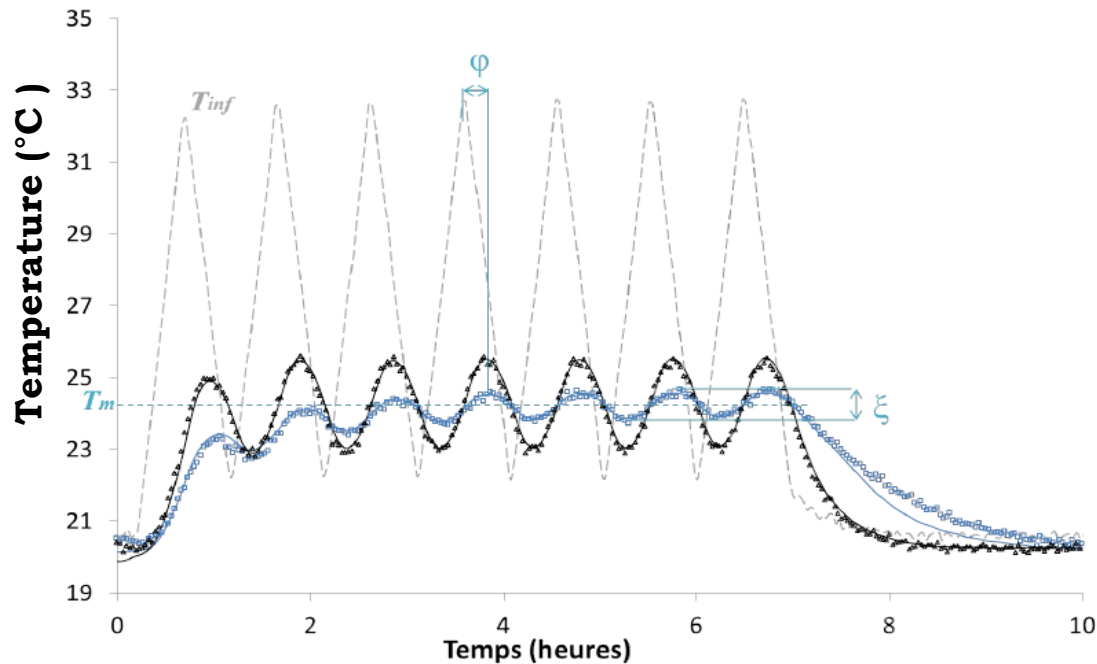
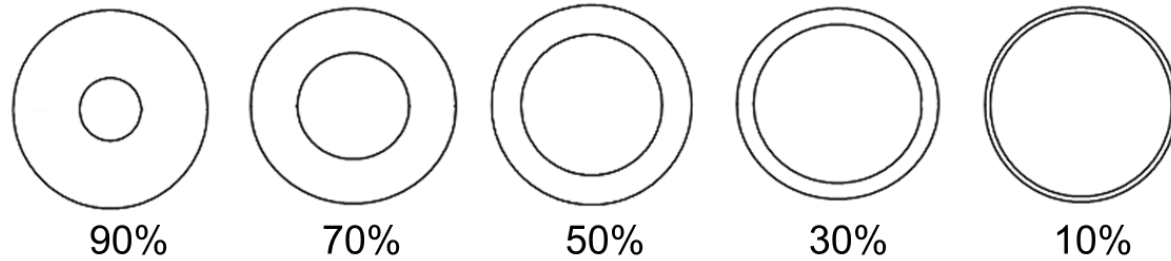
Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

Simulation numérique (sous Comsol Multiphysics)



Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmax - Tmin	Déphasage (min)	E _{max} (kJ/m)	E _{min} (kJ/m)	E _{max} - E _{min}	% paraffine fondue
25.86	21.28	4.58	193	2798	510	2288	-
24.65	23.28	1.37	303	6729	3220	3509	23.6
24.96	22.56	2.40	208	4626	1901	2725	25.2
24.97	22.55	2.42	208	4634	1845	2789	25.1
25.00	22.49	2.51	193	4644	1877	2767	24.7
25.18	22.36	2.82	238	4620	1844	2776	25.6
24.66	22.60	2.06	328	5183	1566	3617	48.0
25.05	22.27	2.78	268	5793	2256	3537	56.6
24.71	22.58	2.13	259	3579	1488	2091	0.52
24.71	22.48	2.23	238	4682	1875	2807	29.18

Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase



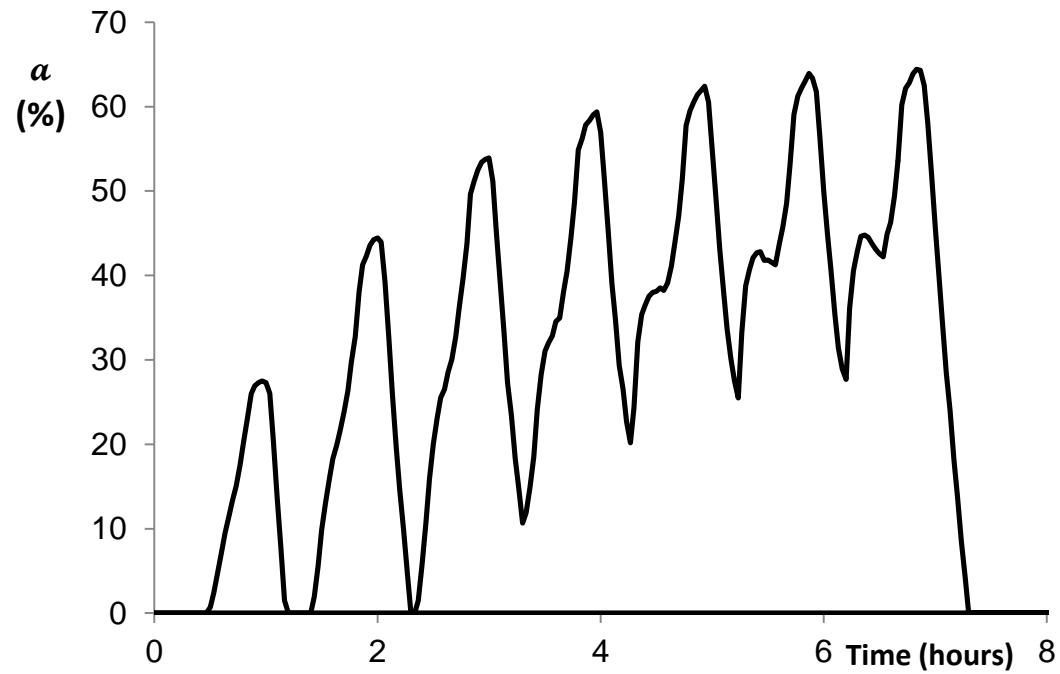
3 parameters T_m ξ ϕ

activité a of the PCM

$$T_{init} (25,8^{\circ}\text{C}) < T < T_{fin} (28^{\circ}\text{C})$$

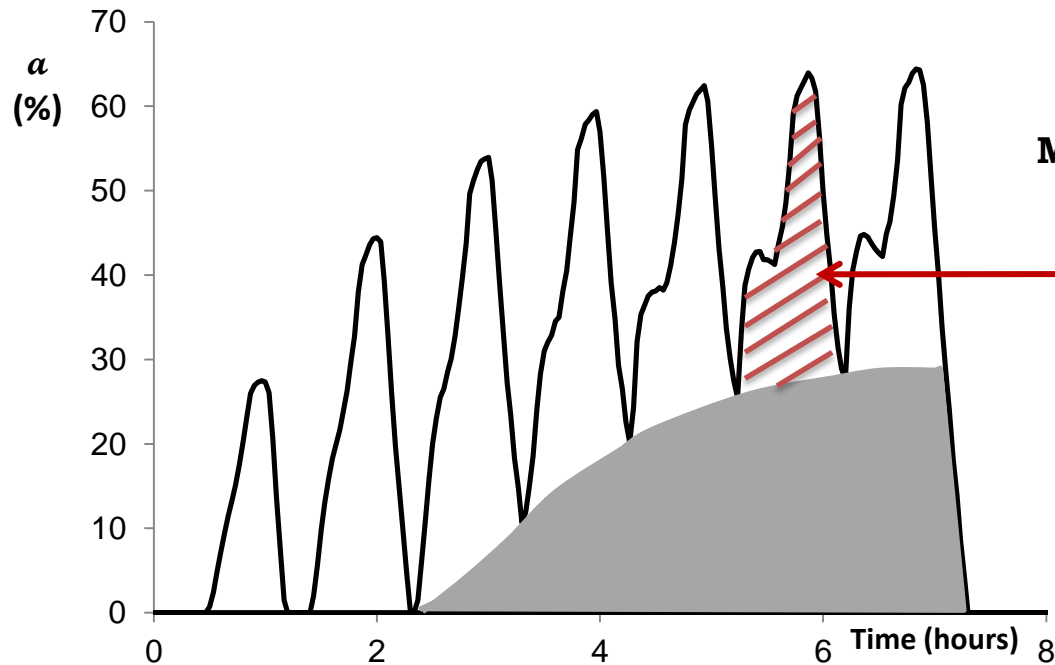
Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

Instantaneous activity of PCM



Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

Instantaneous activity of PCM

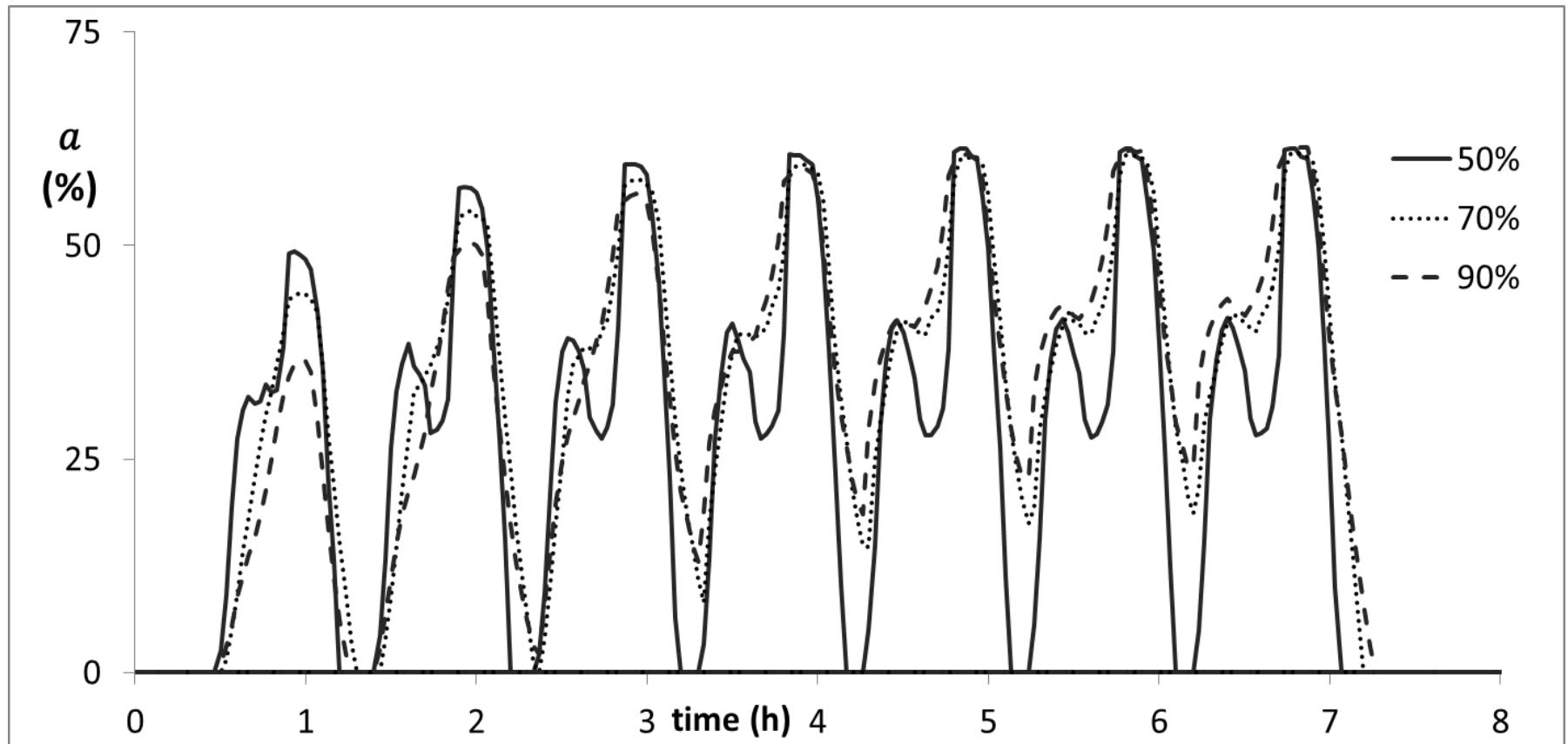


Mean activity indicator

$$\bar{a} = \frac{1}{t_c} \int_{t_0}^{t_0+t_c} a dt$$

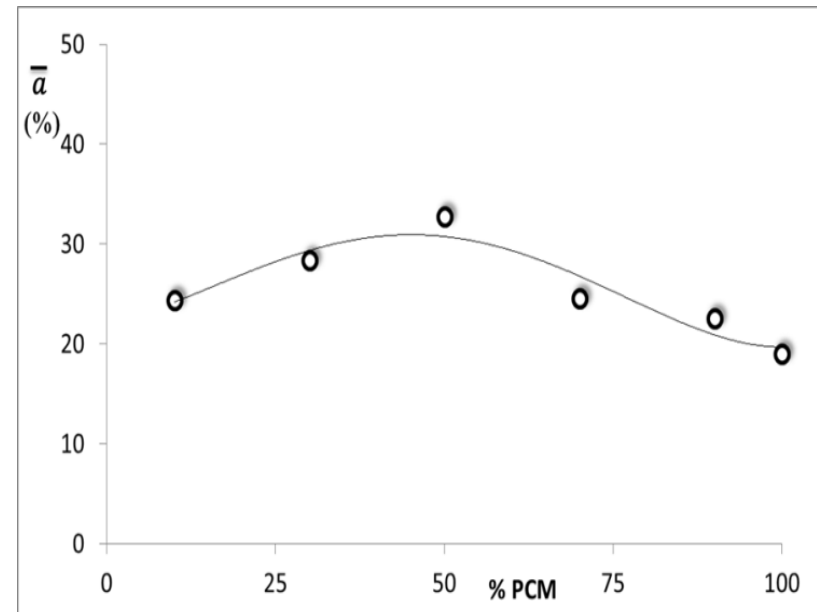
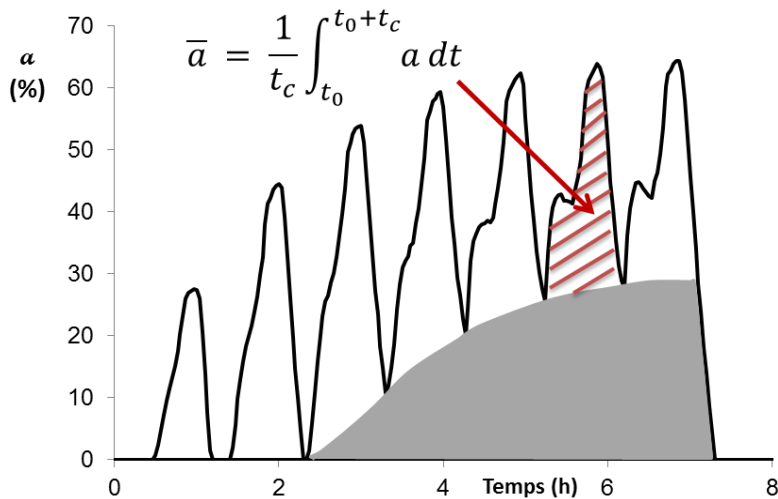
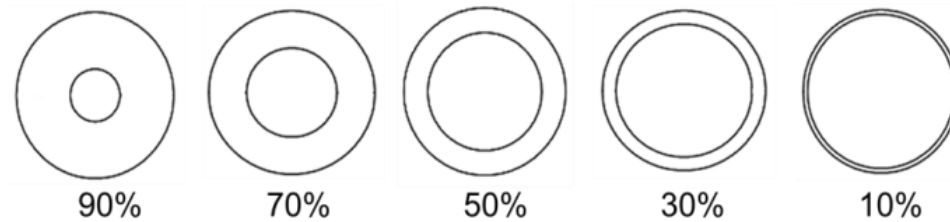
Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

Instantaneous activity of PCM



Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

Dalle alvéolaires avec remplissage concentrique de MCP



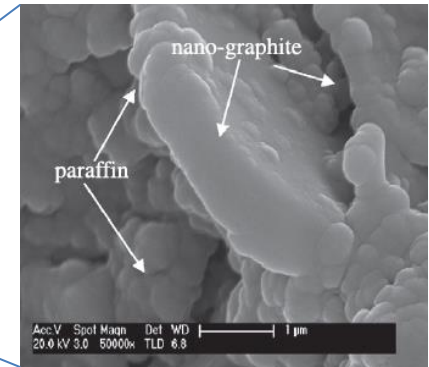
Echelle « Système »

Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

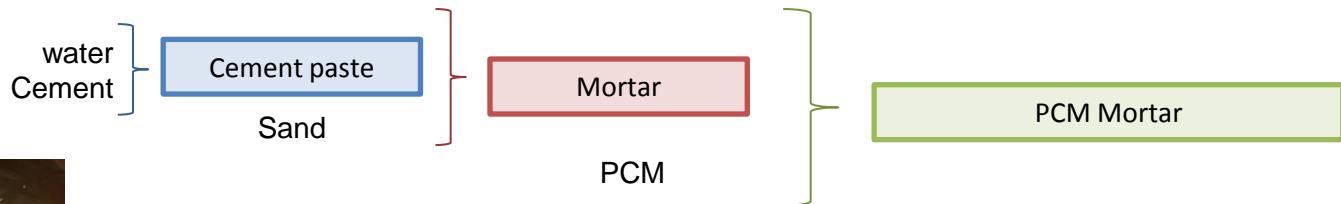
Perspectives

- Améliorer la conductivité thermiques du MCP

Ajout de Nano-graphite (NG)



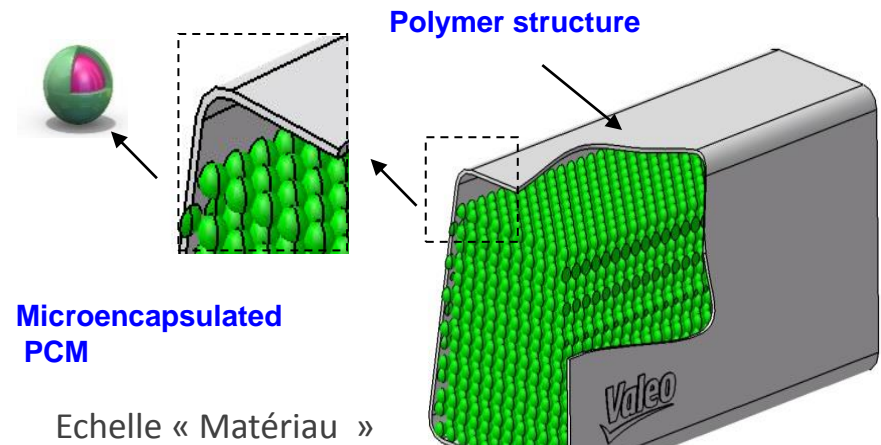
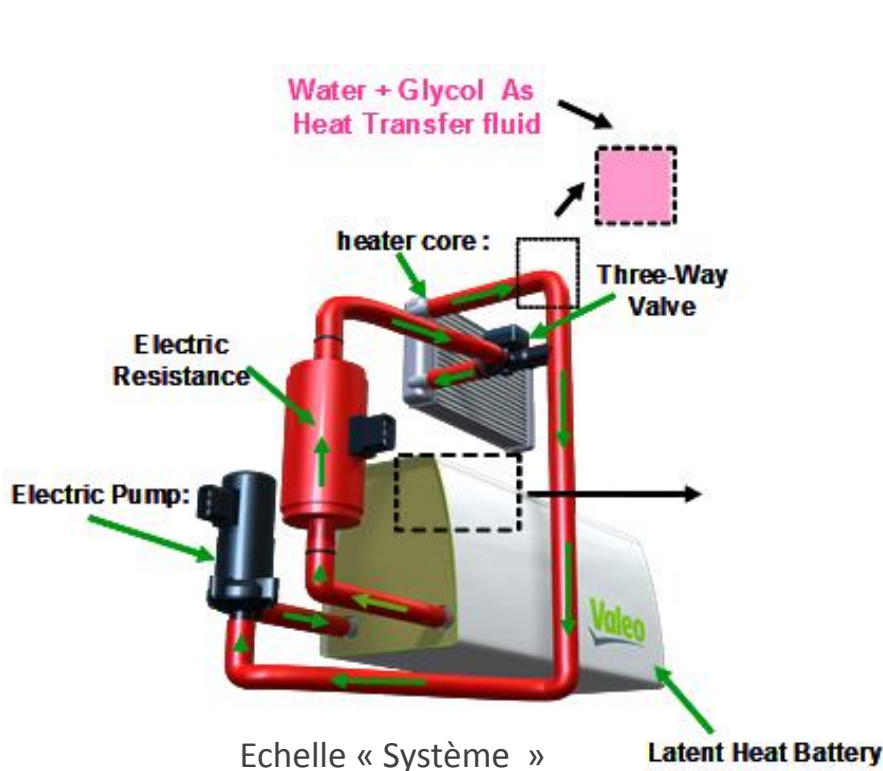
- Développer des bétons composites



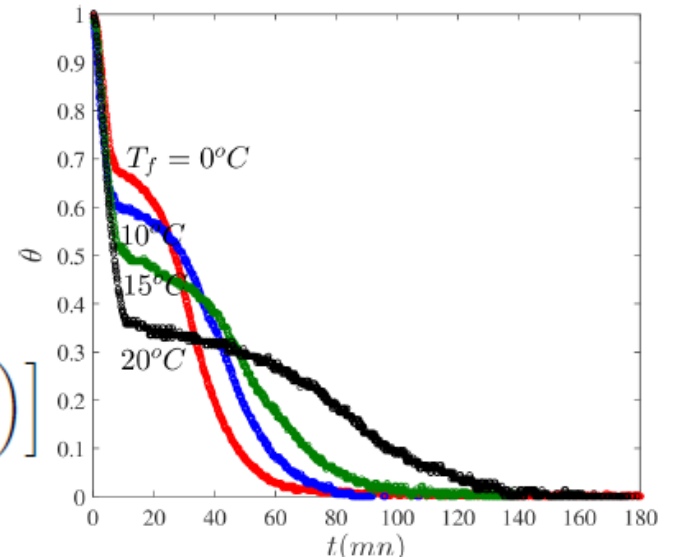
Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

Projet en cours

- **Projet VEGETO (F.U.I.)** partenariat : Valeo et MCI



$$\theta = \frac{1}{2} \left[e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \beta(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \right] \left[1 + \tanh \left(\alpha - \left(\frac{t}{\tau_3} \right) \right) \right]$$



Enjeux sociétaux sur l'énergie et le climat

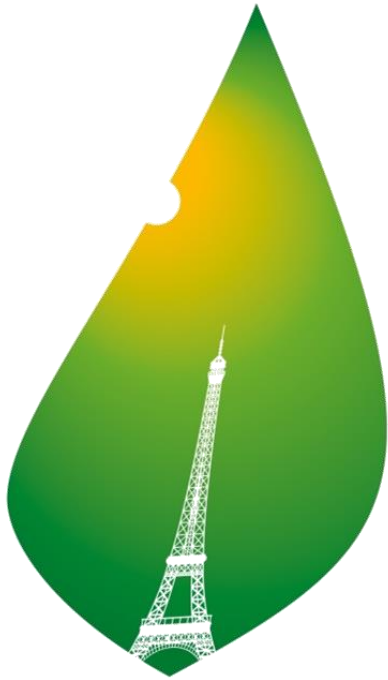
3 solutions pour lutter contre le réchauffement climatique

Matériaux biomimétiques pour la récupération de la vapeur d'eau atmosphérique et climatisation passive par échange radiatif

Régulation et gestion de l'énergie thermique par l'utilisation de matériaux à changement de phase

Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique en milieu urbain

Négociations autour du changement climatique



COP21 • CMP11
PARIS 2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE

Deux objectifs

- Réduire les émissions de GES
→ Limiter l'amplitude des changements climatiques
- S'adapter aux changements inévitables

**Adaptation des villes au réchauffement
climatique et canicules**

Gestion de la ressource en eau

Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique

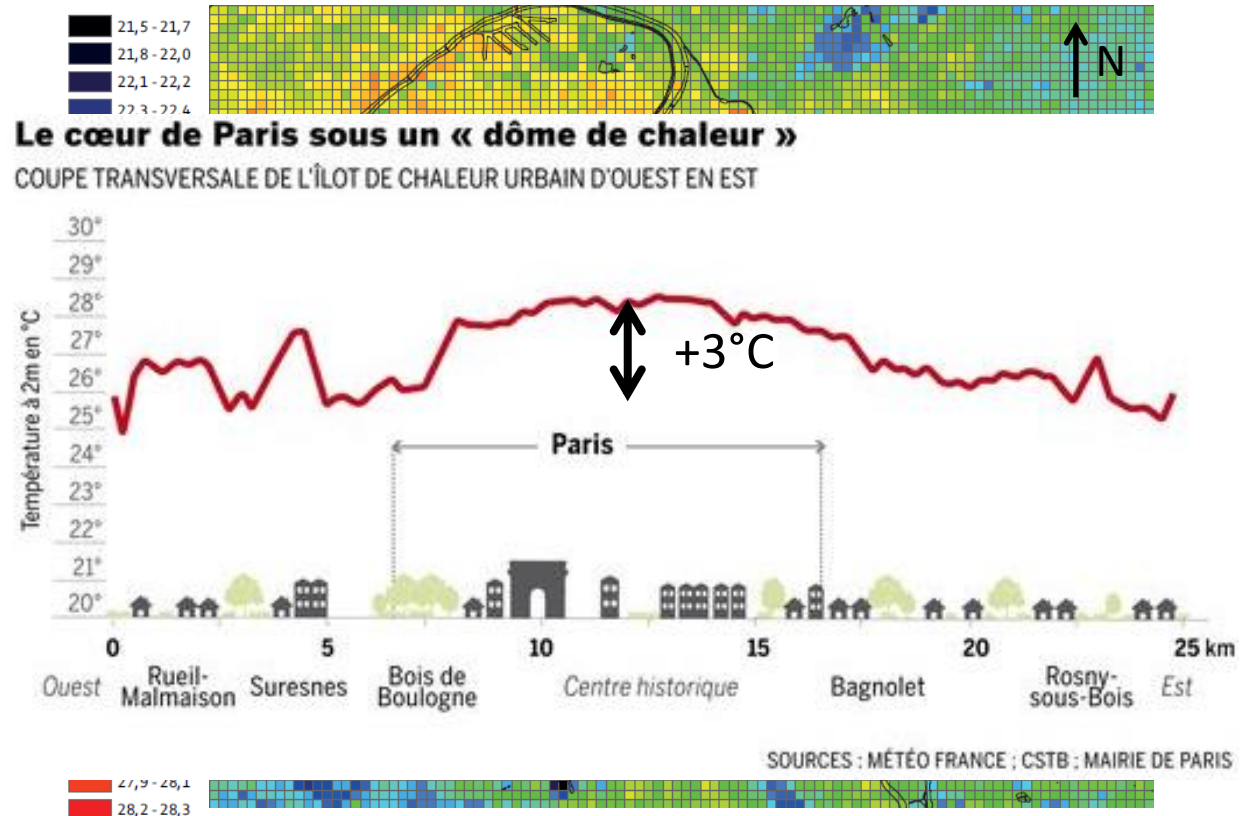
Ilot de chaleur urbain (ICU)

Phénomène local de réchauffement des villes

Ordre de grandeur :
 $T_{ville} - T_{rural} = +3^{\circ}\text{C}$

Amplifié pendant les canicules...

$\Delta T = +8^{\circ}\text{C}$ en 2003



Simulation de la température de l'air à 2 m à 6h le 10 Août 2003
Source: Météo-France & CSTB 2012

Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique

ICU : Mécanismes

Piégeage radiatif

Faible évapotranspiration

Obstruction du vent

Chaleur anthropique

Villes réfléchissantes



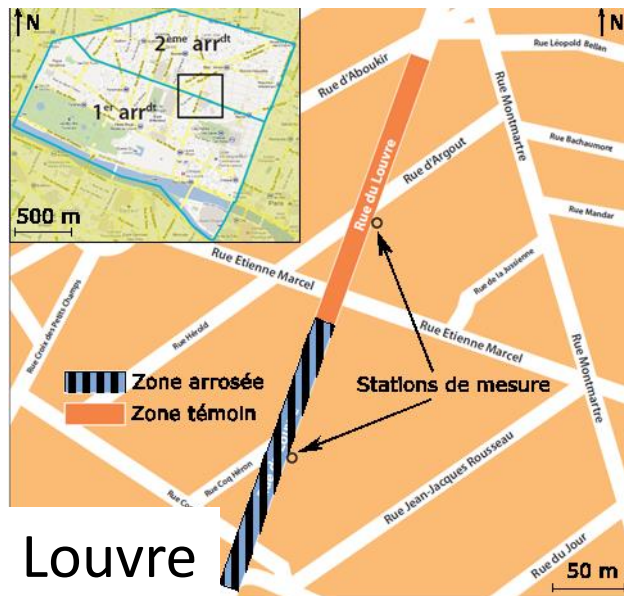
Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique

L'arrosage urbain comme moyen de limitation des îlots de chaleur urbains et d'adaptation au changement climatique

Procédé : rafraîchissement évaporatif

Moyen : réseau d'eau non potable

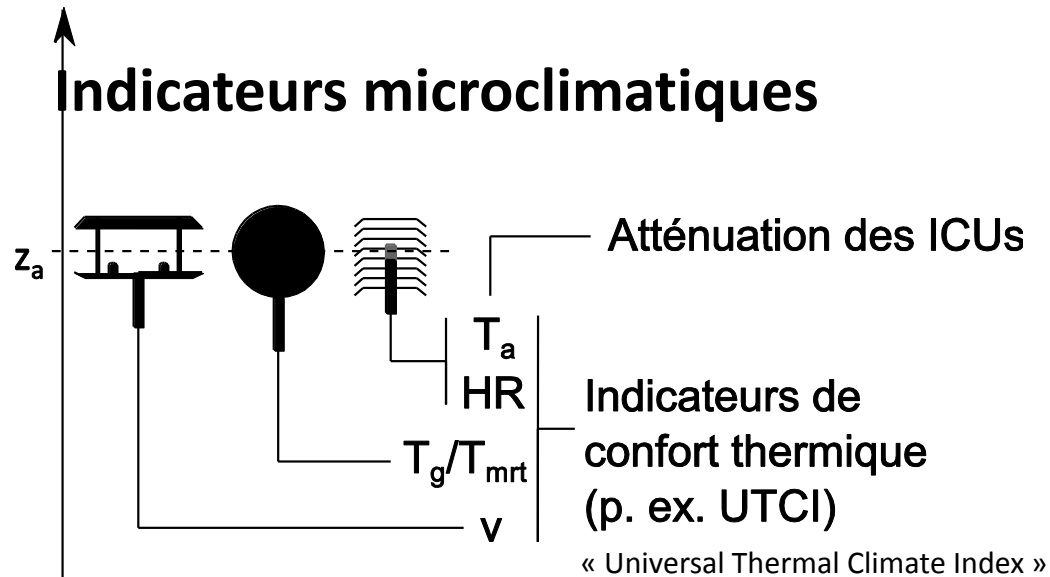
Laboratoire : ville de Paris



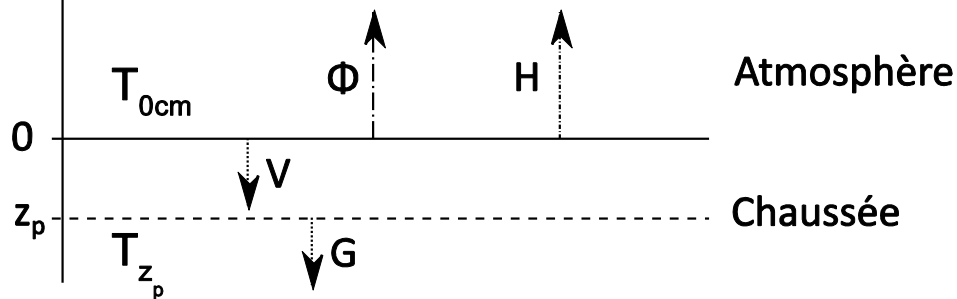
En période caniculaire et en milieu urbain dense, quels sont les effets rafraîchissants microclimatiques et thermiques de l'arrosage urbain et quelle est sa consommation d'eau ?

Indicateurs de rafraîchissement

Indicateurs microclimatiques

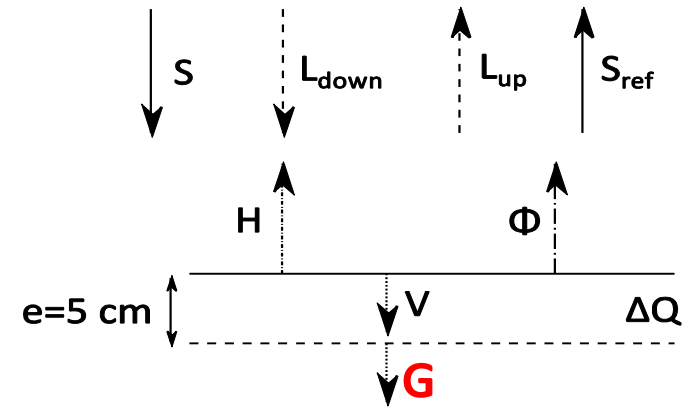


Indicateurs thermiques



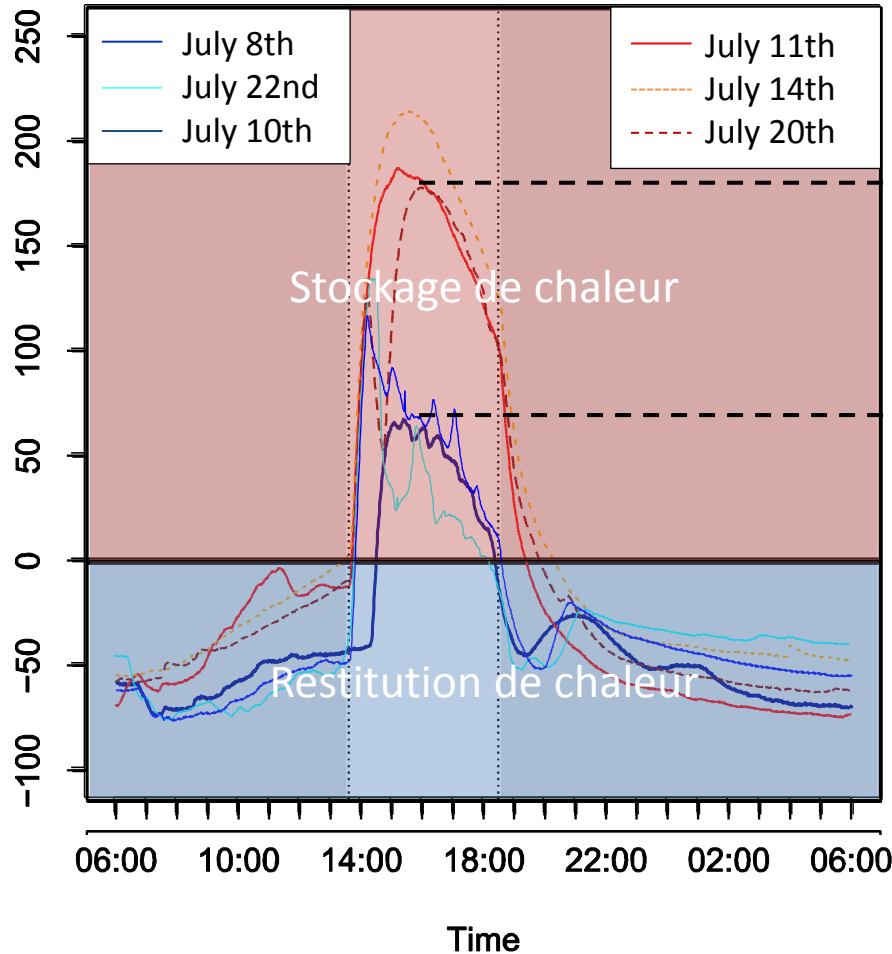
Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique

Effets sur le flux de chaleur G



Journées arrosées

Journées de références



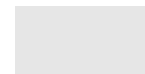
$$G^{dry} - G^{wet}$$

Entre 15h et 18h30 :

$\Delta G = -100$ à -150 W/m^2 en moyenne



L'arrosage réduit fortement le stockage de chaleur sensible



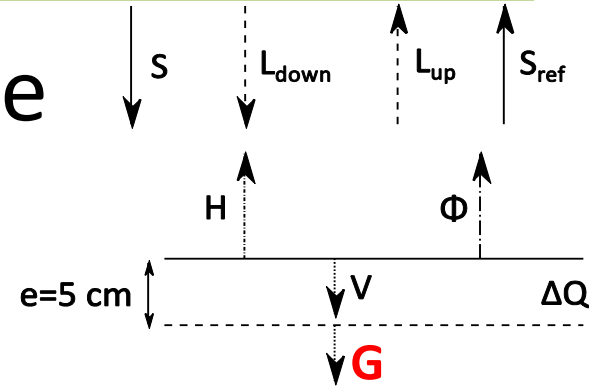
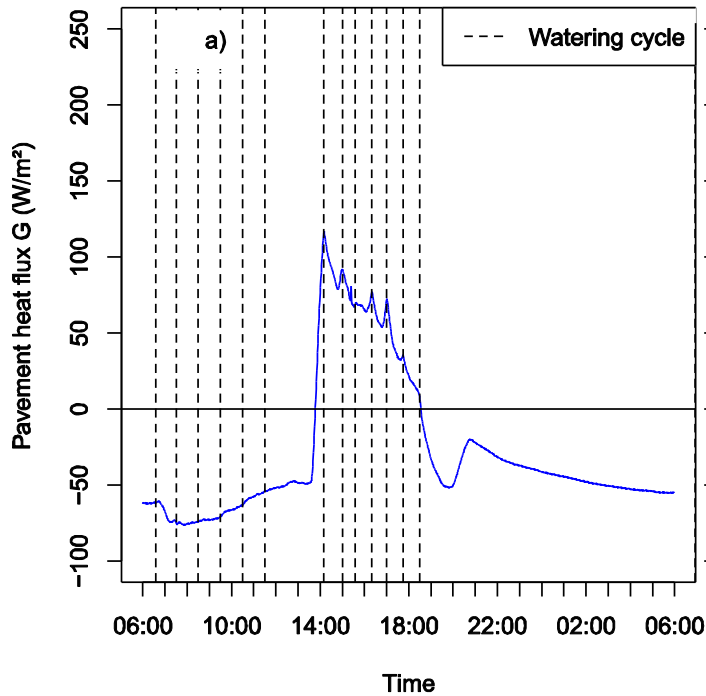
Période d'ombre ou de nuit

Impact de la fréquence d'arrosage

8 juillet 2013

7h-12h puis 14h30-18h

Arrosage toutes les 45 min

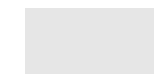
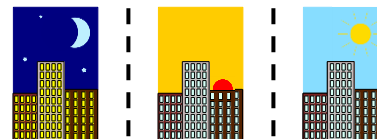
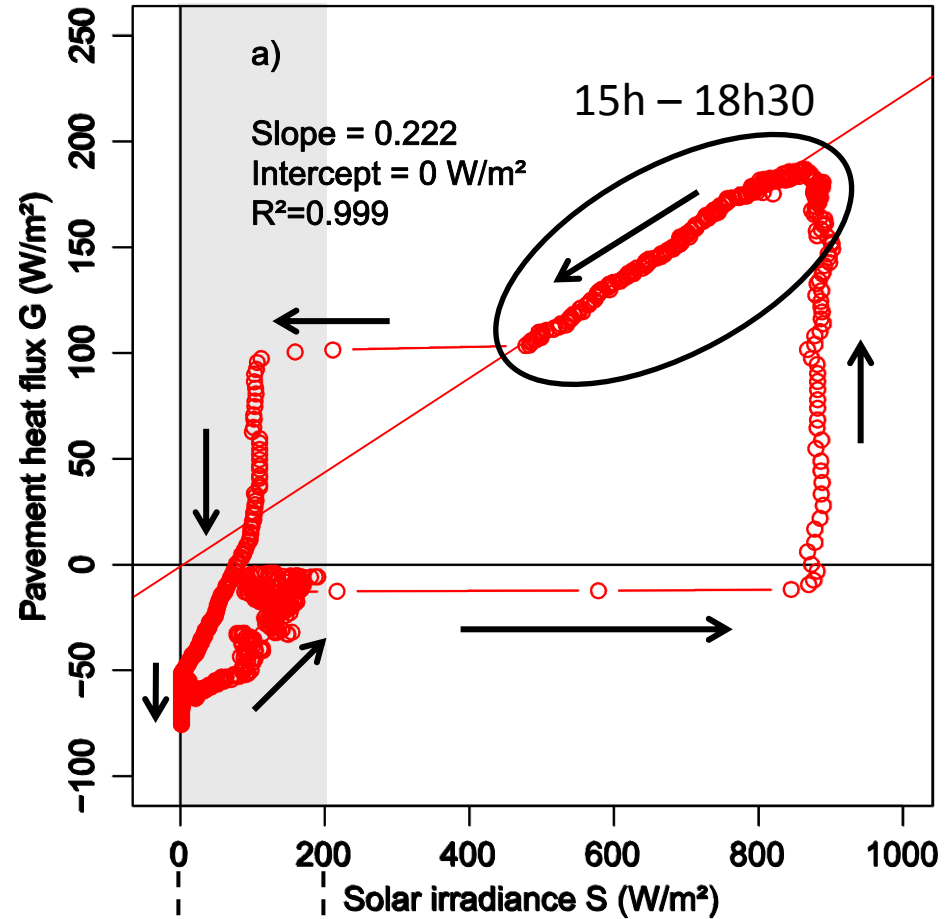
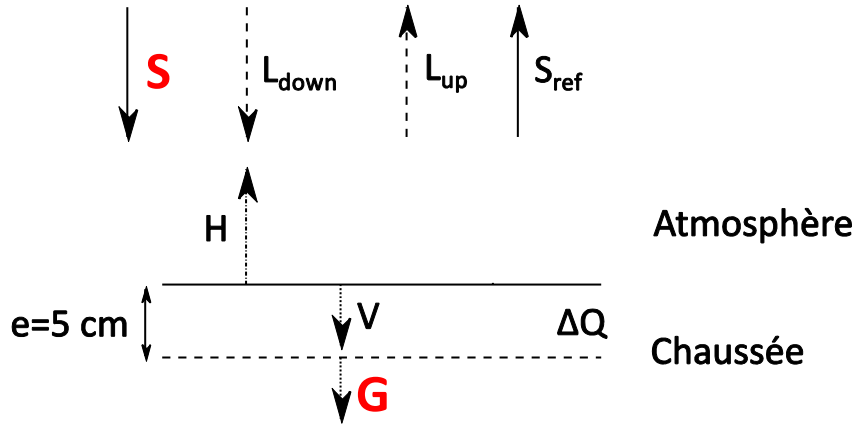


Arroser toutes les 30 minutes empêche le séchage de la chaussée

Le premier pic de flux peut être évité en arrosant juste avant l'ensoleillement direct

G en fonction de S

11 juillet 2013

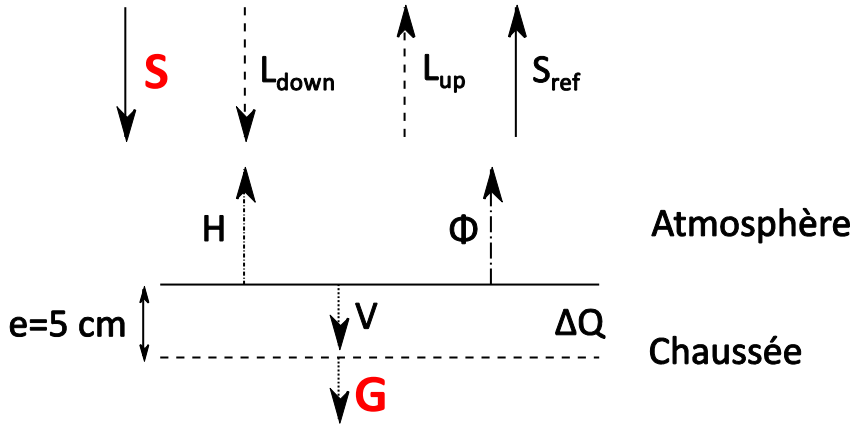


Période d'ombre

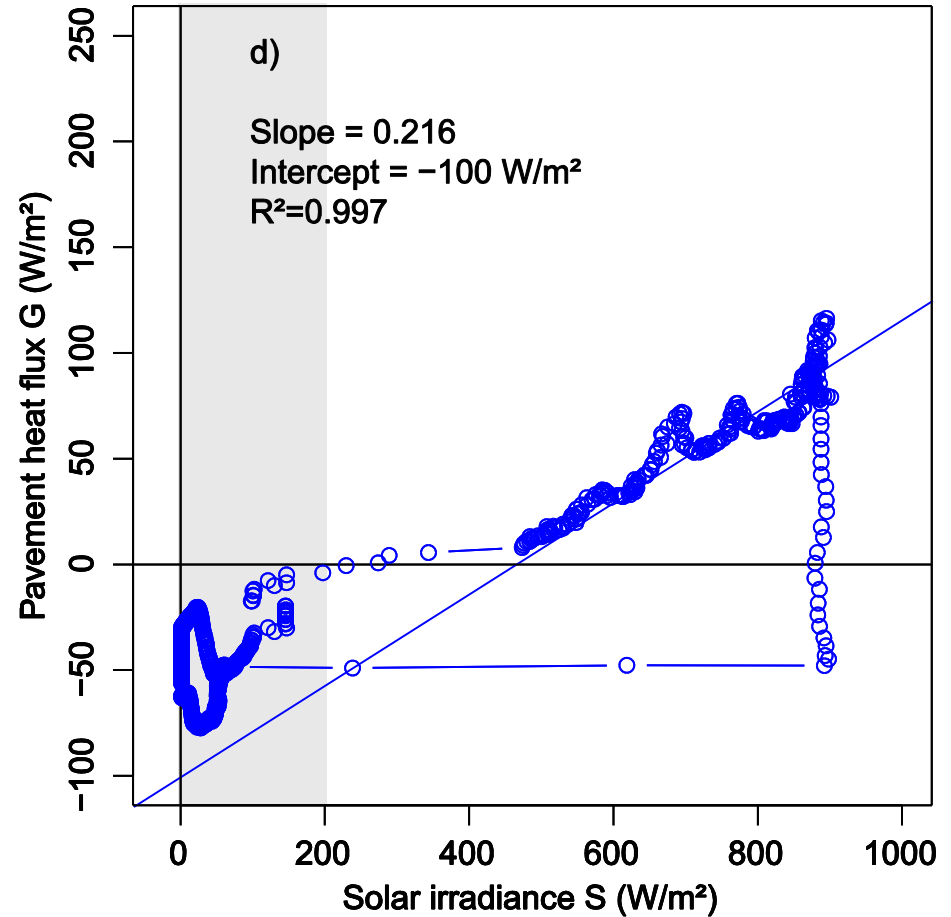
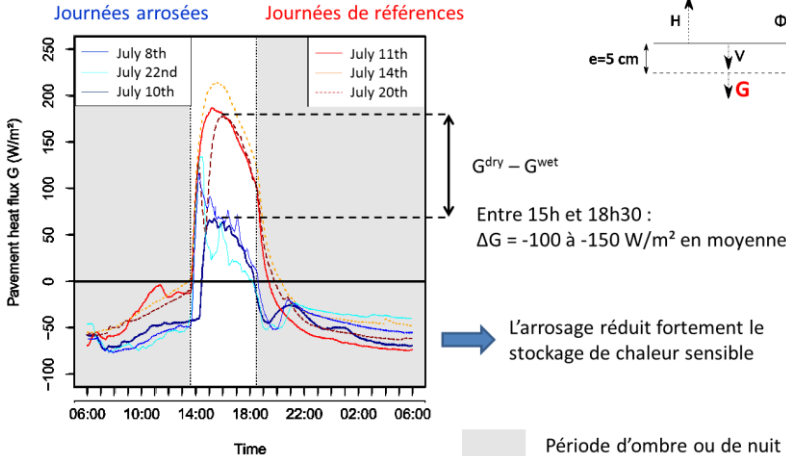
Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique

G en fonction de S

8 juillet 2013



Effets sur le flux de chaleur G

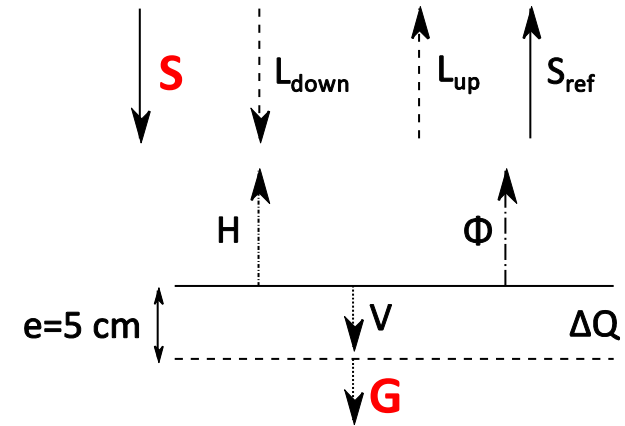
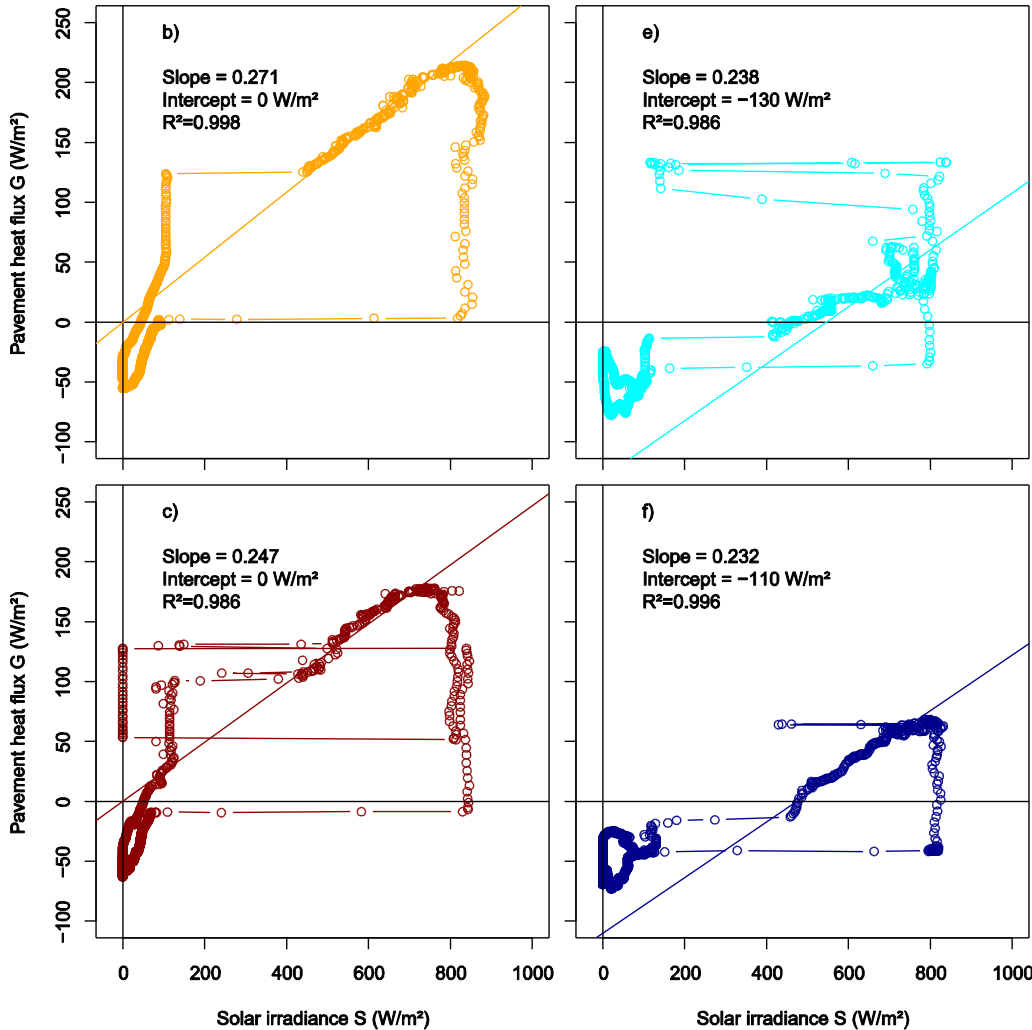


Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique

G en fonction de S

Journées de références

Journées arrosées



L'après-midi entre 15h et 18h30 :



$$G = \beta S + G_0$$

avec β compris entre 0,22 et 0,27

Référence

Arrosage

$$G_0 = 0$$

$$-100 \text{ W/m}^2 \geq G_0 \geq -150 \text{ W/m}^2$$

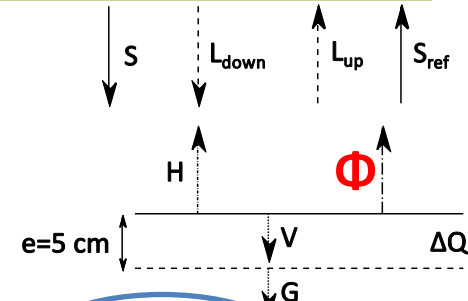
L'après-midi entre 15h et 18h30 :



$$G^{\text{dry}} - G^{\text{wet}} = V^{\text{dry}} - V^{\text{wet}} = -G_0$$

Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique

Estimation du flux rafraîchissant Φ



$$\Phi = h \left(T_S^{dry} - T_S^{wet} + T_a^{wet} - T_a^{dry} \right) + \sigma \left(\epsilon_{dry} T_S^{dry^4} - \epsilon_{wet} T_S^{wet^4} \right) - V^{dry} - V^{wet} \quad (7)$$

$$lE + c\rho \frac{V_s}{t_0} \underbrace{(T_S^{wet} - T_W)}_{10^\circ \text{ à } 15^\circ \text{C}} = h \left(T_S^{dry} - T_S^{wet} \right) + \underbrace{T_{air}^{wet} - T_{air}^{dry}}_{-2^\circ \text{ à } 0^\circ \text{C}} + \sigma \left(\epsilon_d T_S^{dry^4} - \epsilon_w T_S^{wet^4} \right) - G_0 \quad (8)$$

-100 à -150 W/m²

Valeur

Volume d'eau

Flux advectif

23-35 W/m²

Flux évaporatif

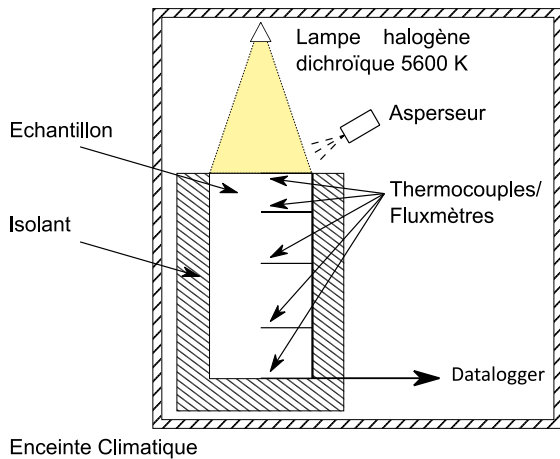
198-256 W/m²

80-85% du
rafraîchissement
produit par 15-20%
de l'eau arrosée

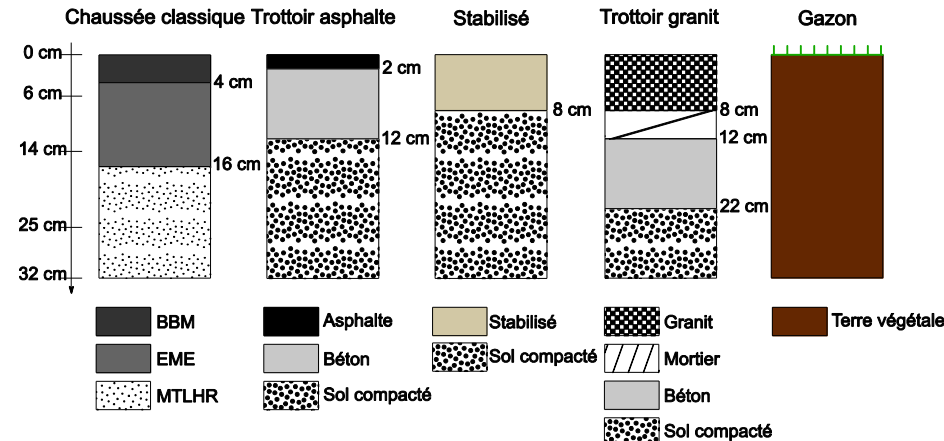
Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique

Etude revêtements parisiens (APUR) : comportement thermo-climatique

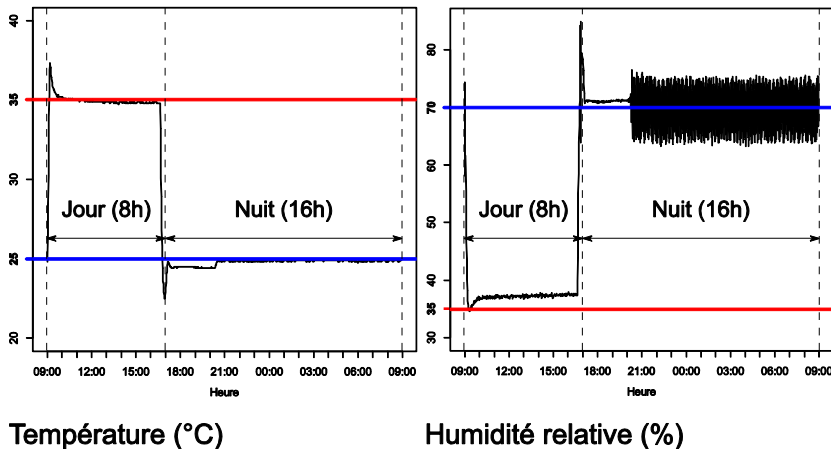
Schéma du dispositif



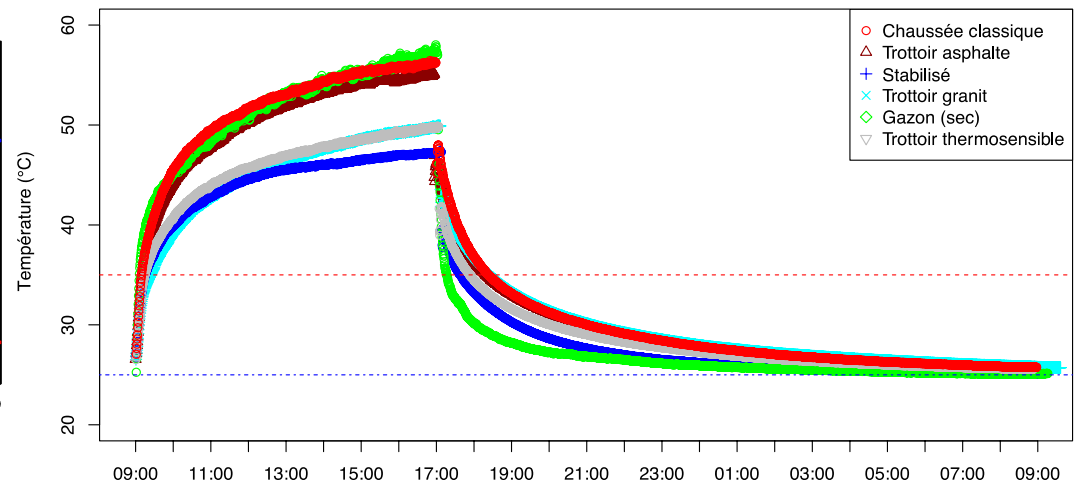
Composition des échantillons



Consigne de l'enceinte climatique



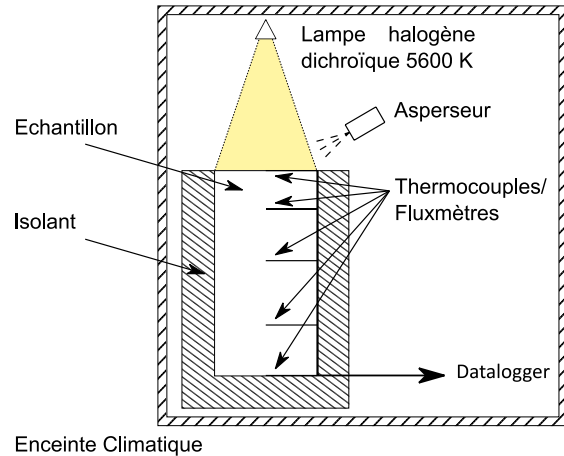
Résultats : Température de surface



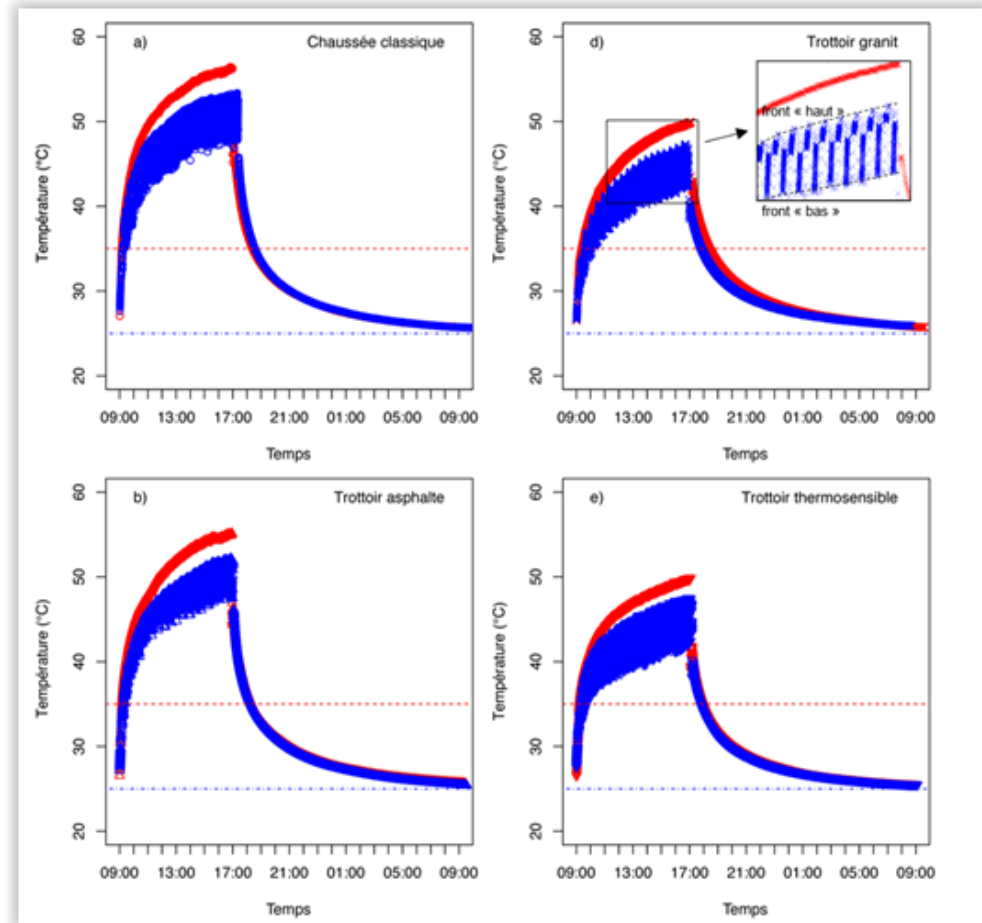
Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique

Etude revêtements parisiens (APUR) : influence de l'arrosage

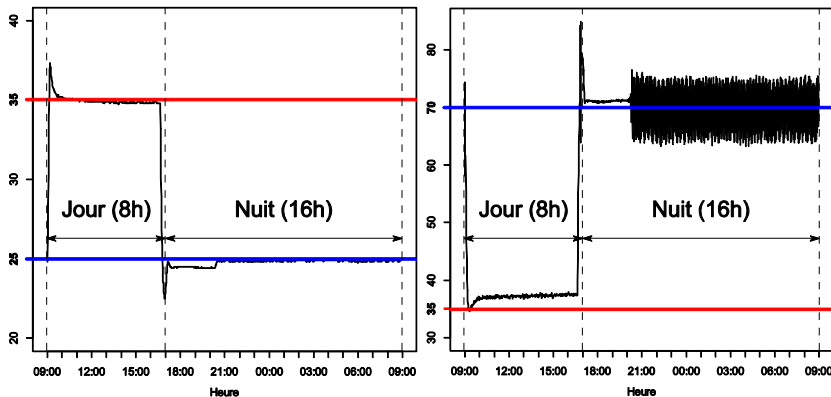
Schéma dispositif



Températures avec et sans arrosage



Consigne de l'enceinte climatique



Température (°C)

Humidité relative (%)

Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique

Faisabilité d'un arrosage généralisé ?

→ Consommation d'eau

Arrosage optimisé pour Louvre : 2,2 mm/jr
25 km² de chaussées et trottoirs Parisiens

→ Système d'arrosage ?

- Faisabilité technique ?
- Coût ?

→ Quelles surfaces ?

- Type de matériau ?

Exemples de revêtements de l'espace public à Paris



Photos : APUR

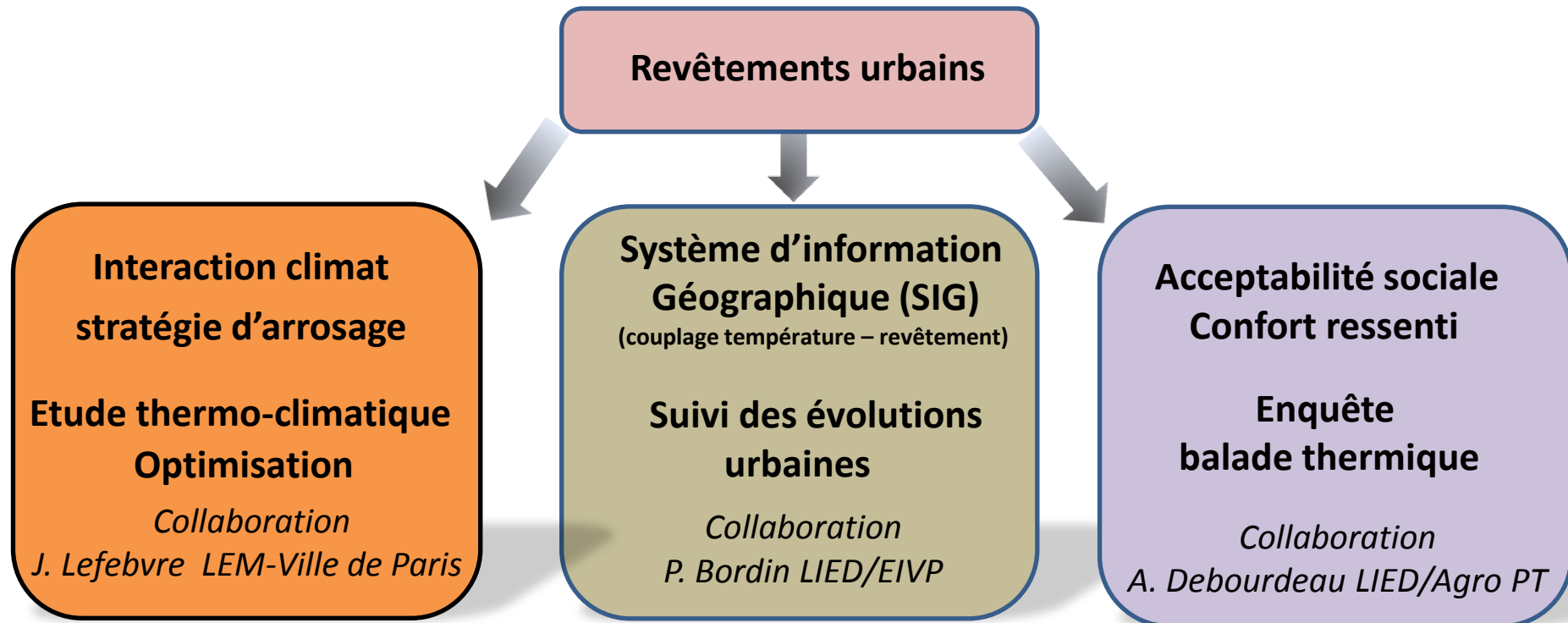


Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique

Quelles stratégies d'arrosage adopter ?

Quel est le choix des matériaux à préconiser ?

En partenariat avec la Ville de Paris



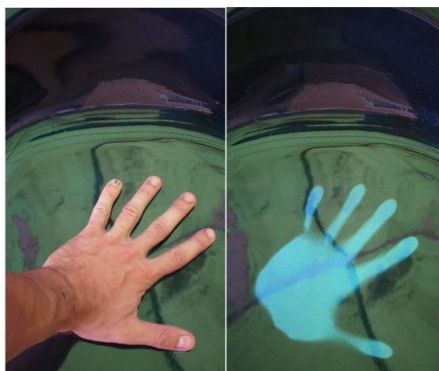
Technique de rafraîchissement et revêtements innovants pour l'adaptation au changement climatique

nouveaux revêtements et carte d'arrosage

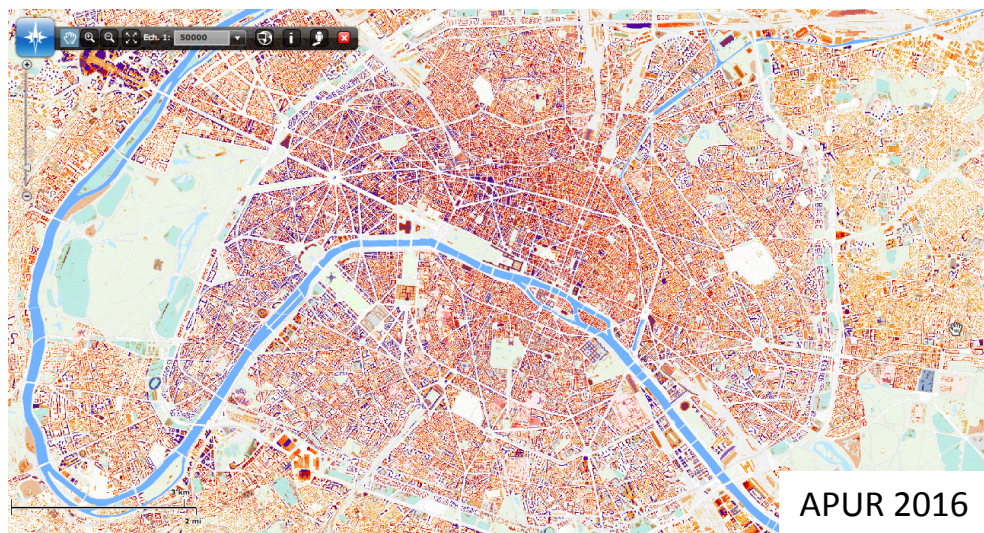
Matériaux perméables



Peintures thermosensibles



Cartographie : où arroser en cas de canicule ?



APUR 2016

Critères à l'étude :

- Fréquentation piétonne
- Ensoleillement au sol
- Type de revêtement
- ...

UNIVERSITÉ
— PARIS-EST

ÉCOLE DOCTORALE — PARIS-EST
Sciences, Ingénierie et Environnement

Journée scientifique de l'École Doctorale

Science, Ingénierie et Environnement

Merci de votre attention