

LA PLACE DE L'EAU POUR LE RAFRAÎCHISSEMENT DES VILLES

Stratégies d'arrosage de différents revêtements parisiens

SOPHIE PARISON (POST-DOCTORANTE, UNIVERSITÉ DE PARIS)

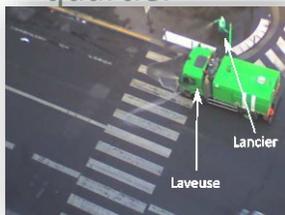
L'équipe Climat Energie en Milieu Urbain

Rafrâichissement urbain : du laboratoire à la ville

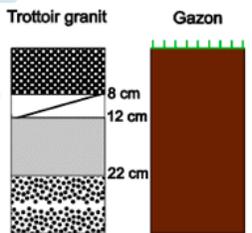


Facette urbaine *in situ*
(mur, toiture, revêtement)

Bâtiment, rue,
quartier

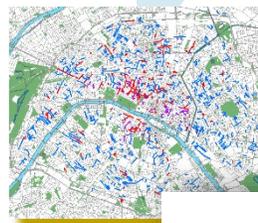


Matériaux urbains



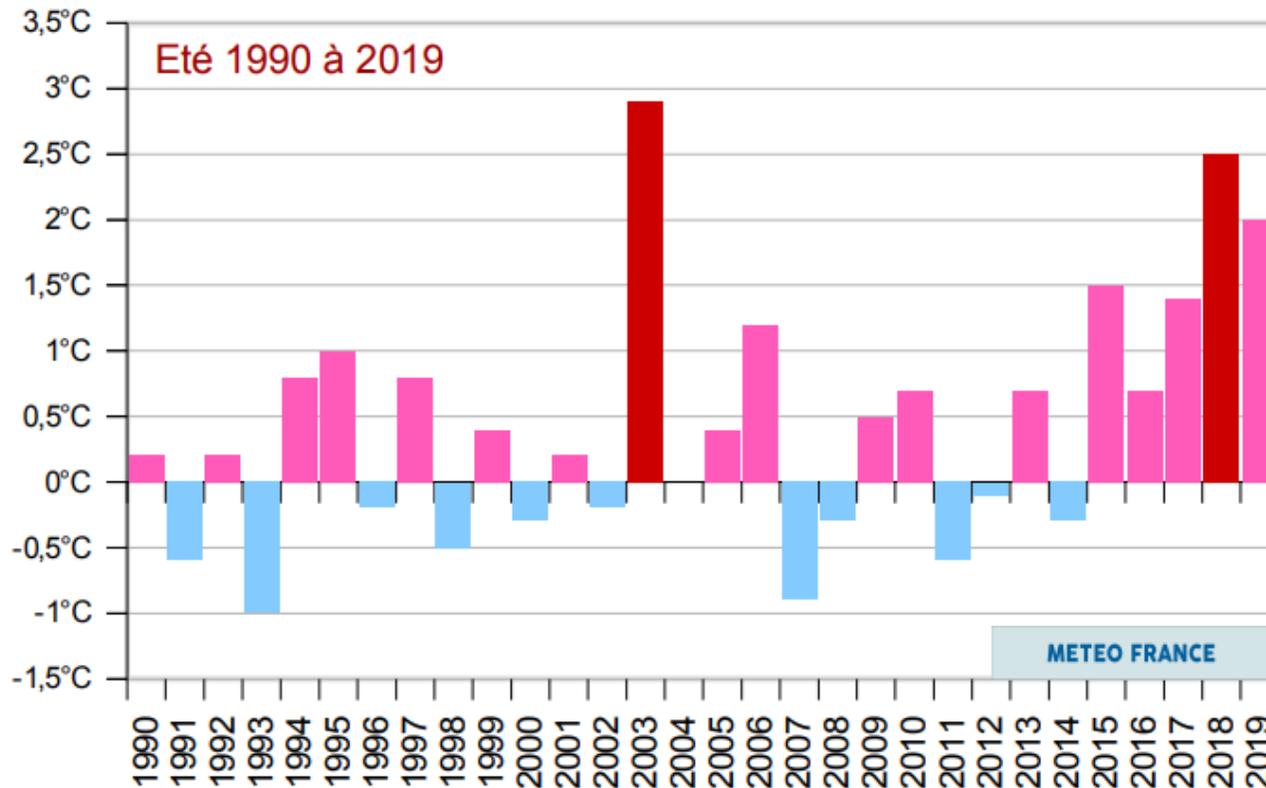
Rafrâichissement évaporatif

Ville,
agglomération



Ilot de chaleur urbain et canicules

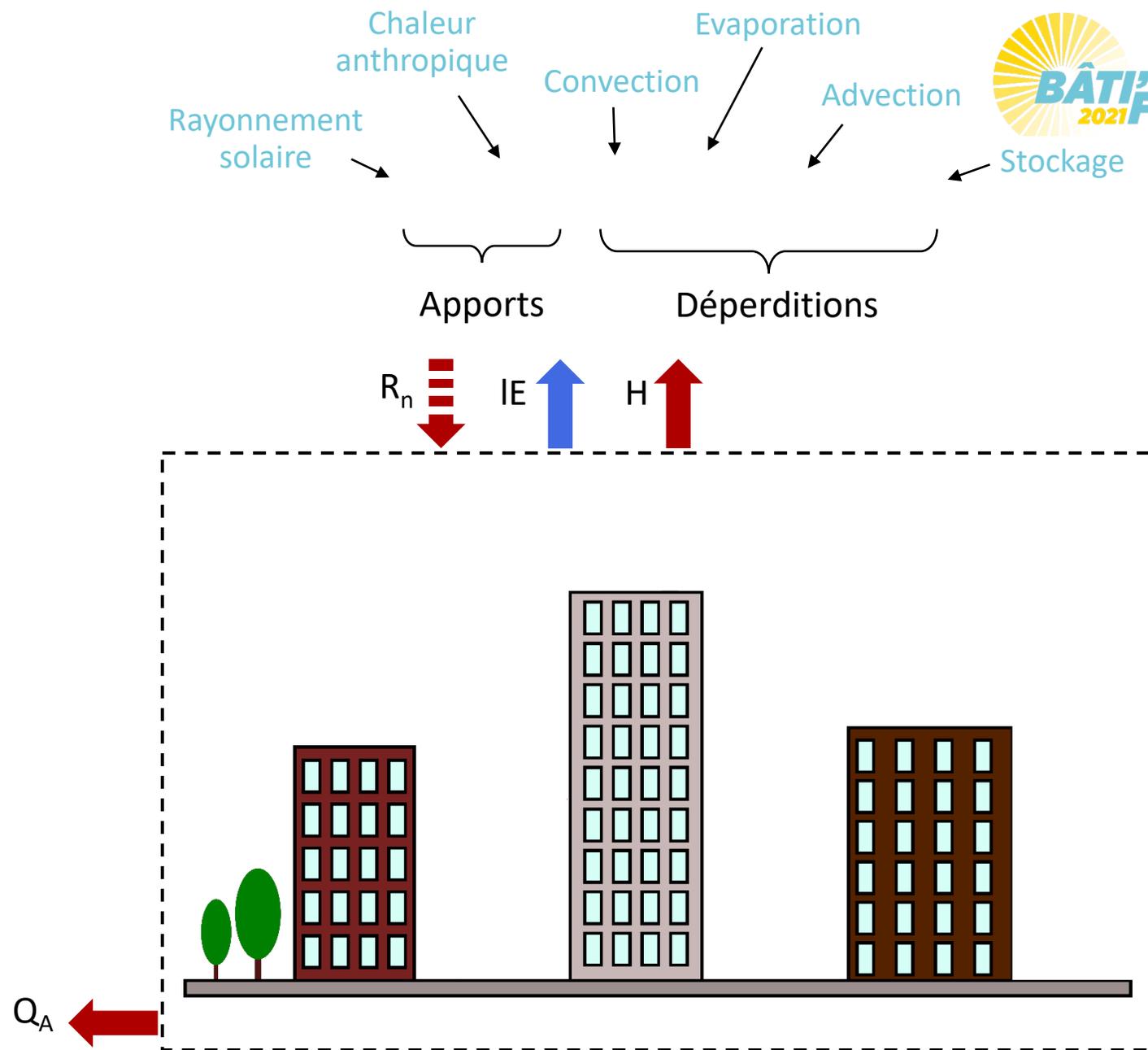
PARIS-MONTSOURIS (75) - Anomalie de température moyenne



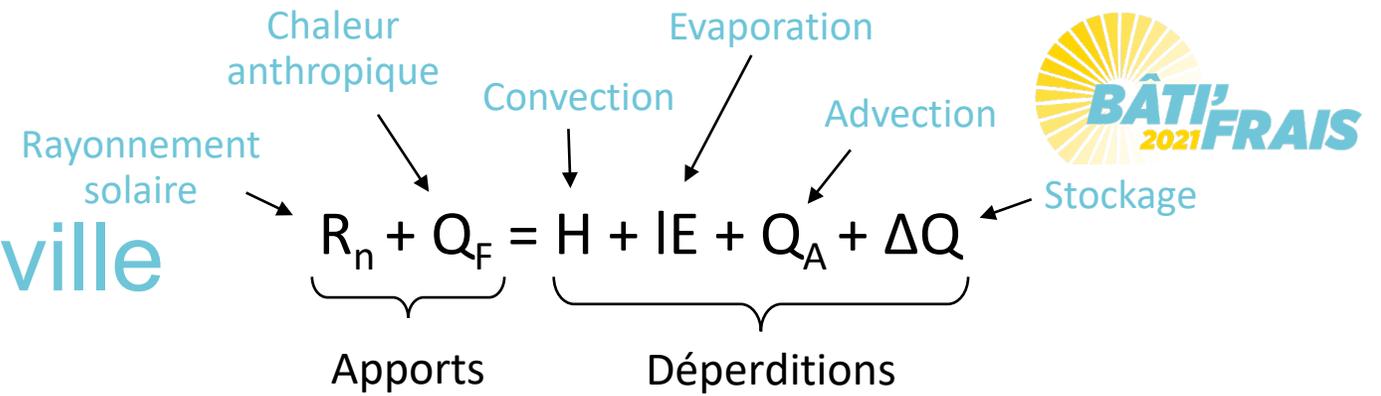
Source : Agence Parisienne du Climat

- Augmentation de la fréquence, durée et intensité des canicules
- Étés les plus chauds en France : 2003, 2018, 2019

Bilan d'énergie d'une ville



Mécanismes d'échauffement d'une ville



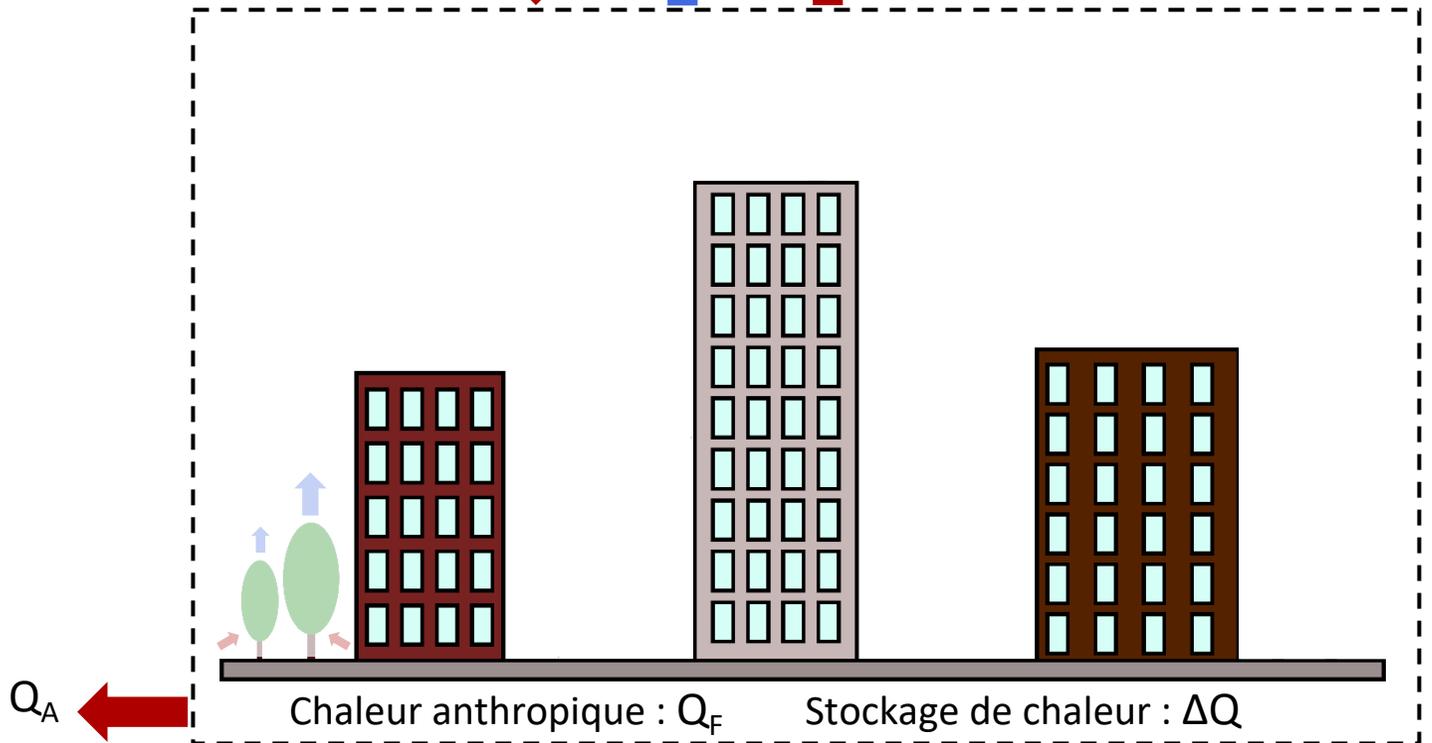
Piégeage radiatif



Obstruction du vent

Chaleur anthropique

Manque d'évapotranspiration



Solutions de rafraîchissement urbain

$$R_n + Q_F = H + IE + Q_A + \Delta Q$$

Piégeage radiatif

Obstruction du vent

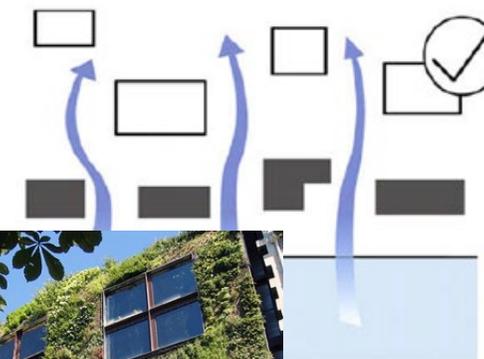
Chaleur anthropique

Manque d'évapotranspiration

Villes réfléchissantes



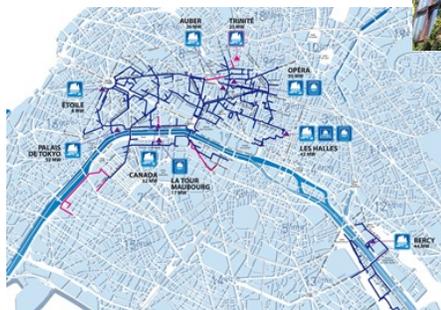
Perméabilité aéraulique



Efficacité énergétique



Végétalisation et arrosage



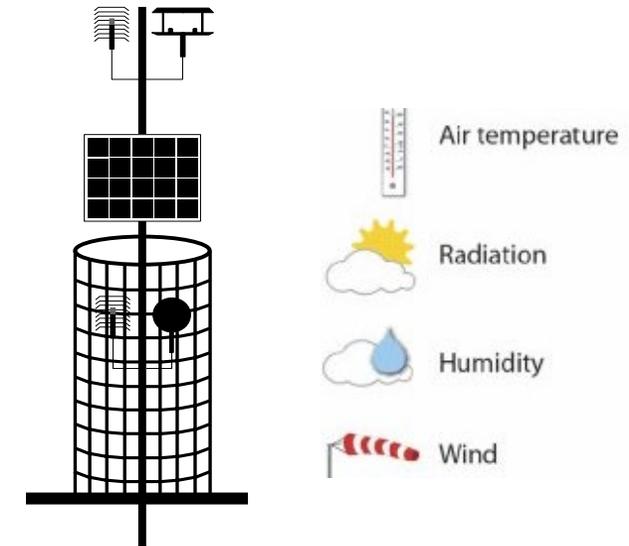
Réseau Climespace à Paris



L'arrosage urbain à l'eau non potable

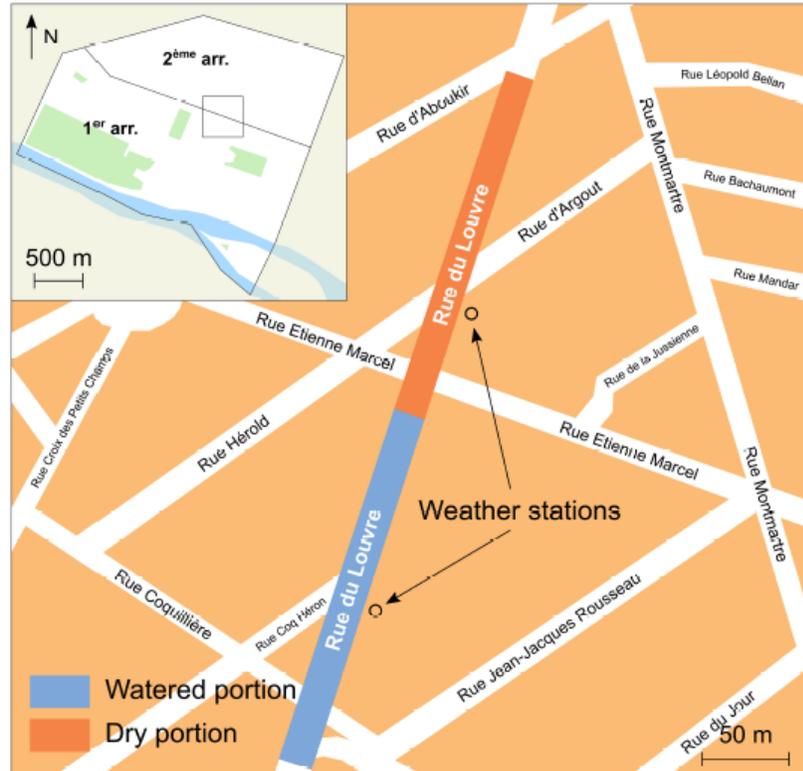
Arrosage urbain à la rue du Louvre (Paris, Juin 2016)

Station météo



Stress thermique de piétons ?

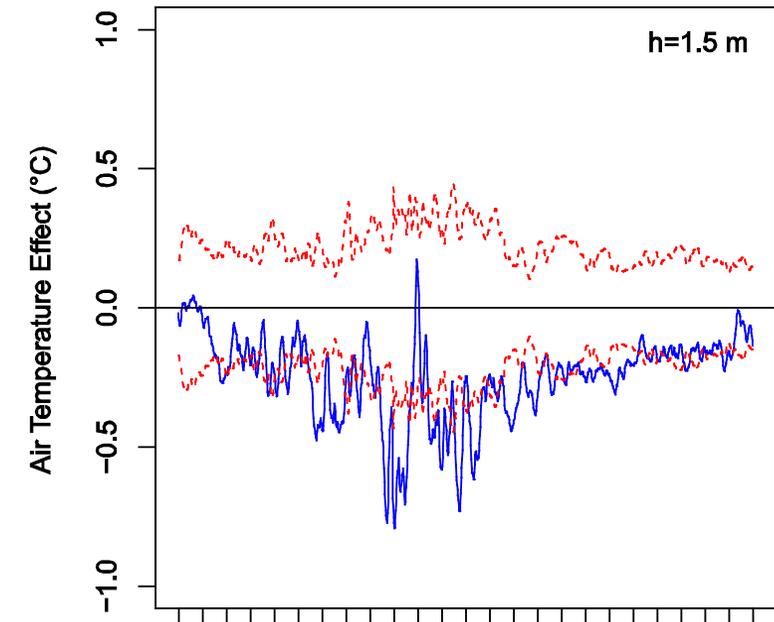
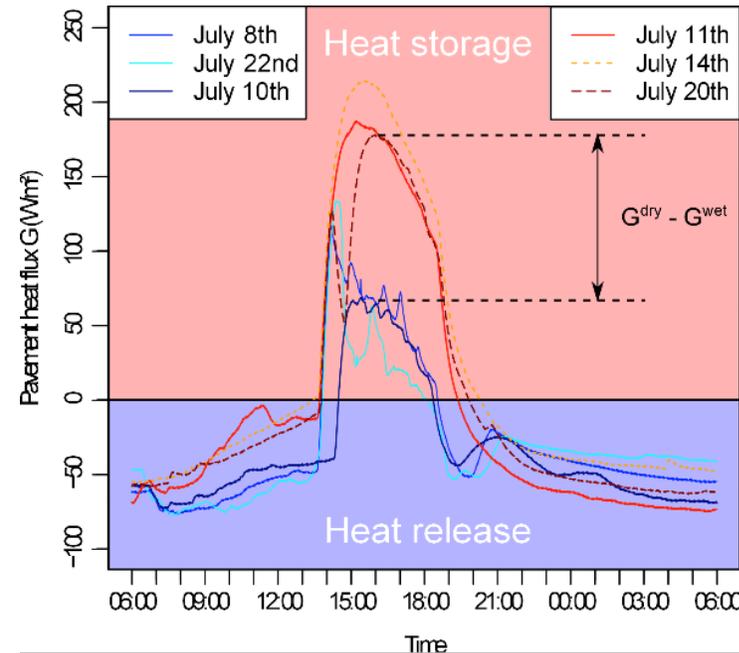
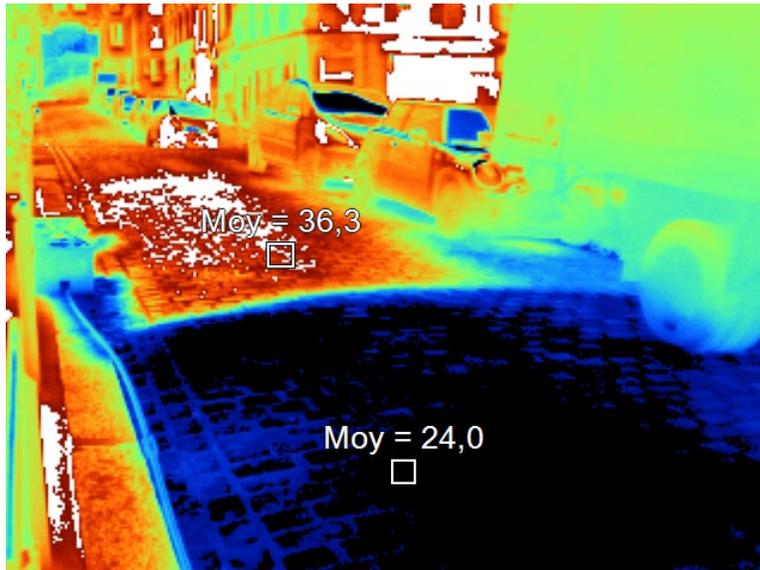
Protocole et site d'arrosage



Watering protocol	Portion watered	Period	Frequency
From 2013 to 2015	Road and sidewalk (100% of the street width)	6:30 am to 12 pm	1 to 2 hours
		2 pm to 6:30 pm	30 minutes
From 2016 to 2018	Road only (66% of the street width)	7 am to 11:30 pm	1.5 hours
		2 pm to 6:30 pm	30 minutes

2 protocoles :
 Chaussée + Trottoir (100%)
 Chaussée uniquement (66%)

Effets mesurés de l'arrosage urbain



Effets thermiques

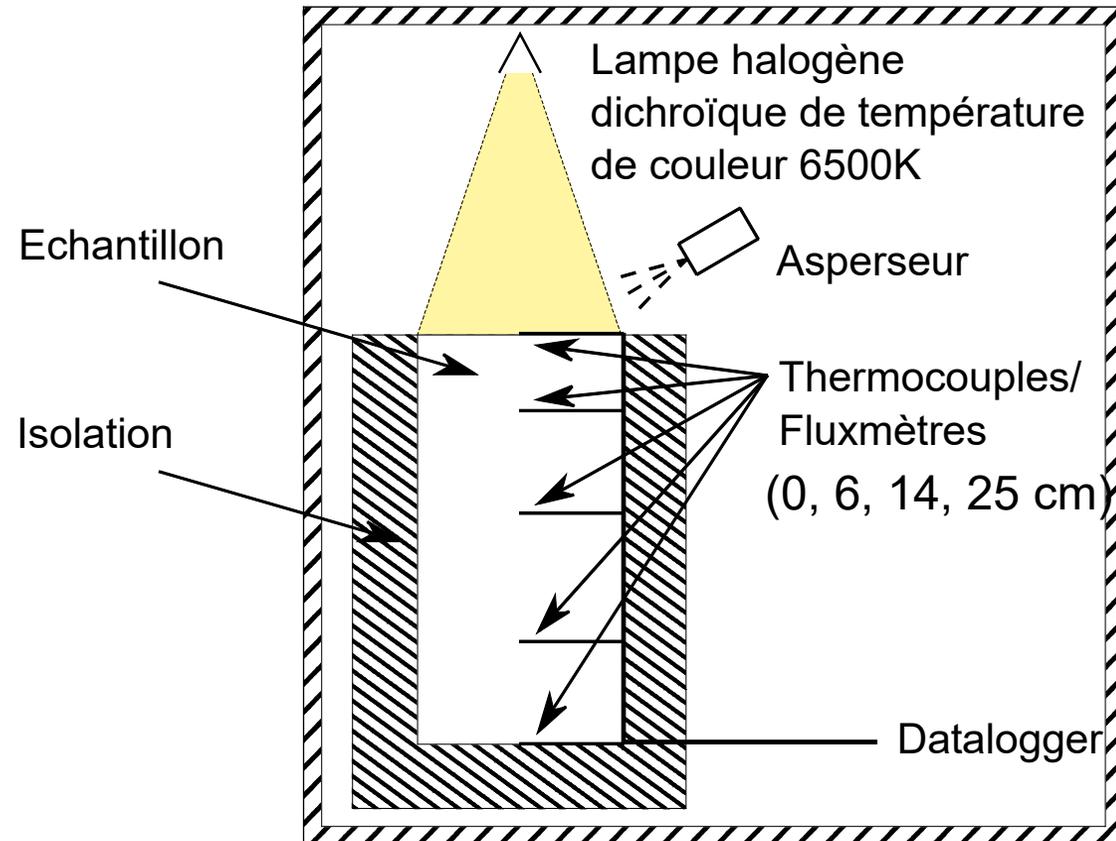
- Réduction de la température de surface de 10 à 15°C au soleil
- Stockage de chaleur fortement réduit

Effets microclimatiques

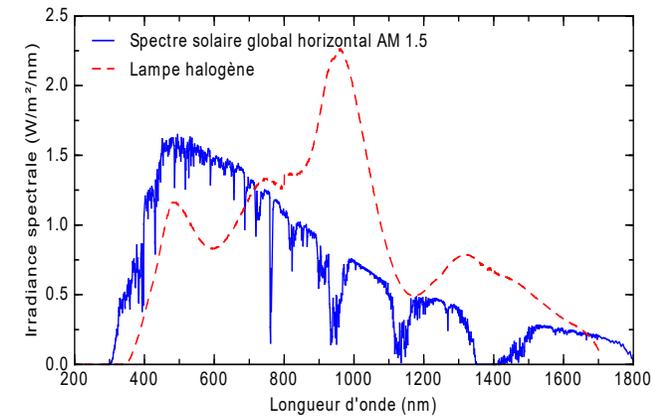
- Réduction de la température ressentie de 2° à 3°C
- Rafraîchissement principalement produit par évaporation du film d'eau

Hendel et al. (2014 & 2015) ; Parison et al. (2020)

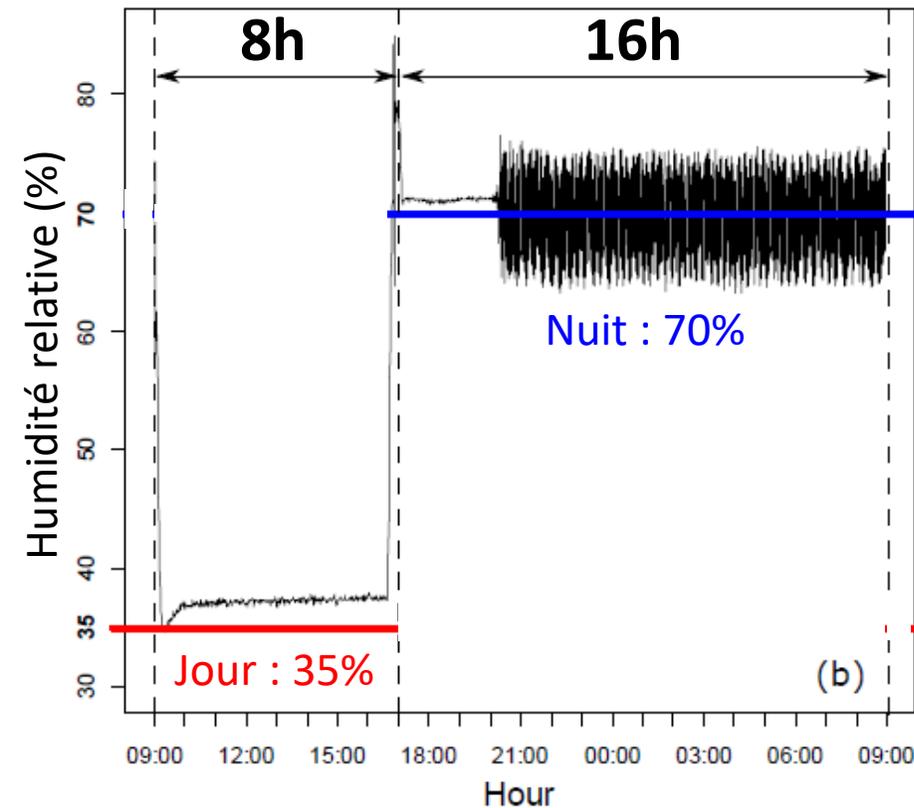
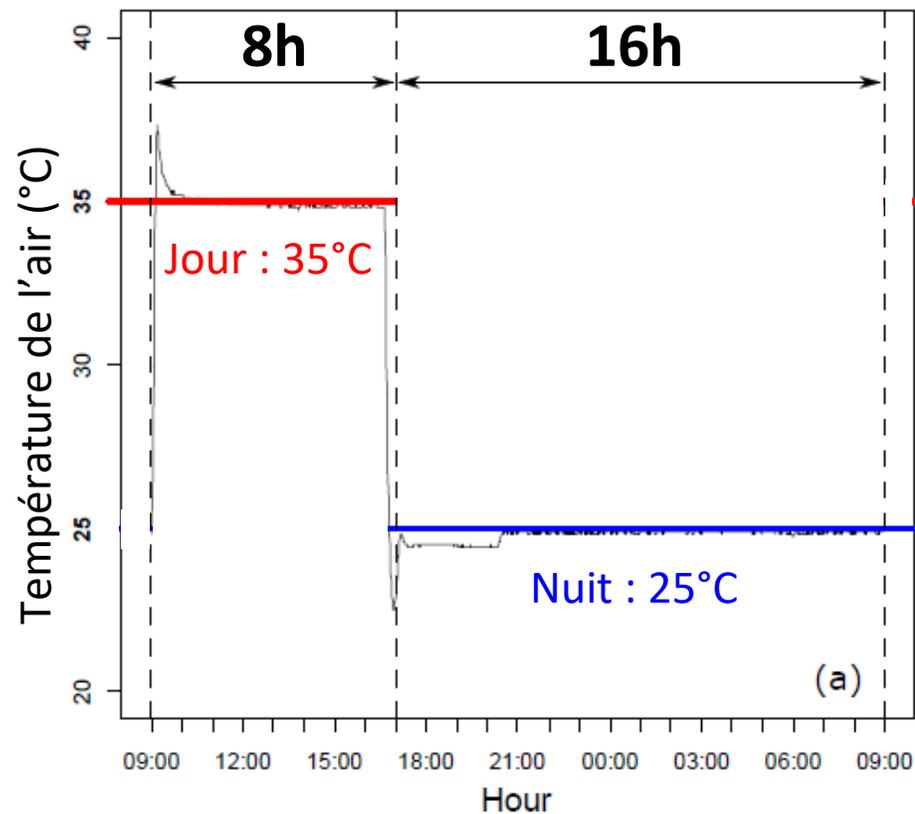
Dispositif expérimental



Enceinte climatique

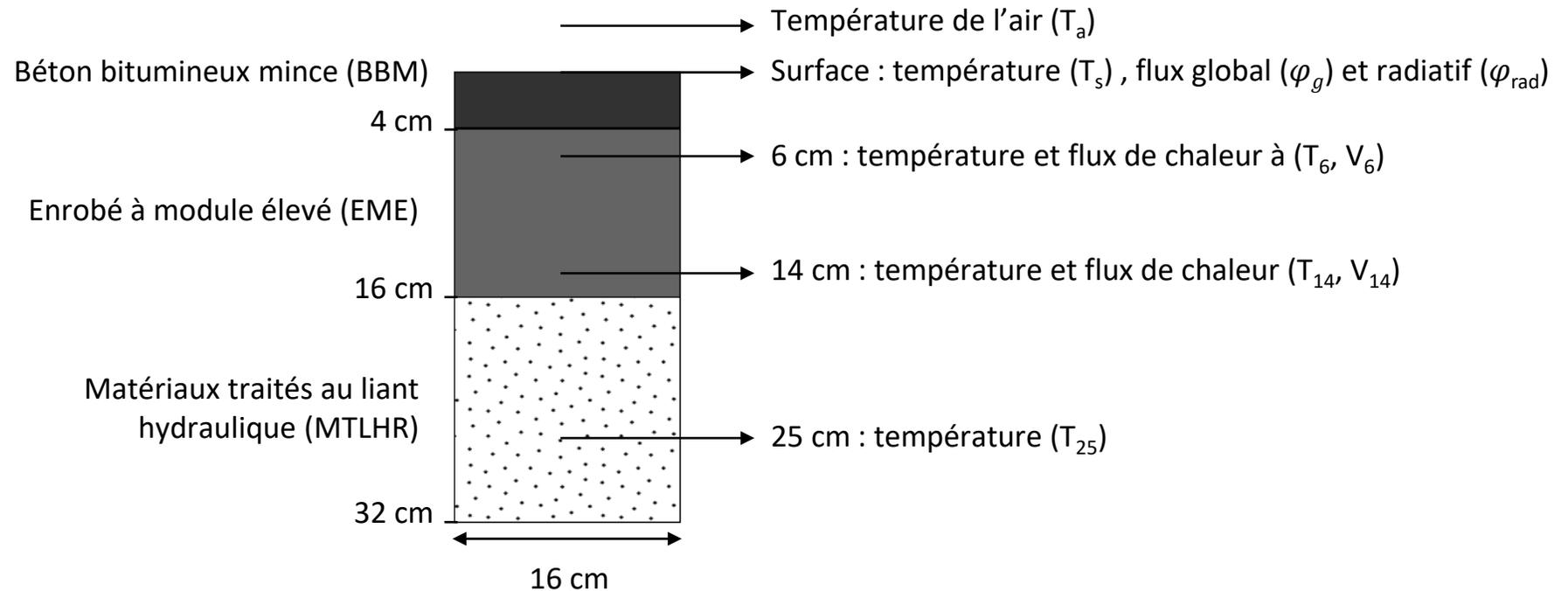


Caractéristiques d'un cycle climatique



- | | Jour | Nuit |
|--|----------------------|----------------------|
| • Rayonnement solaire (S) (0,3 – 3 μm) : | 930 W/m ² | 0 W/m ² |
| • Rayonnement IR (L) (3 – 100 μm) : | 450 W/m ² | 450 W/m ² |

Structure de chaussée classique



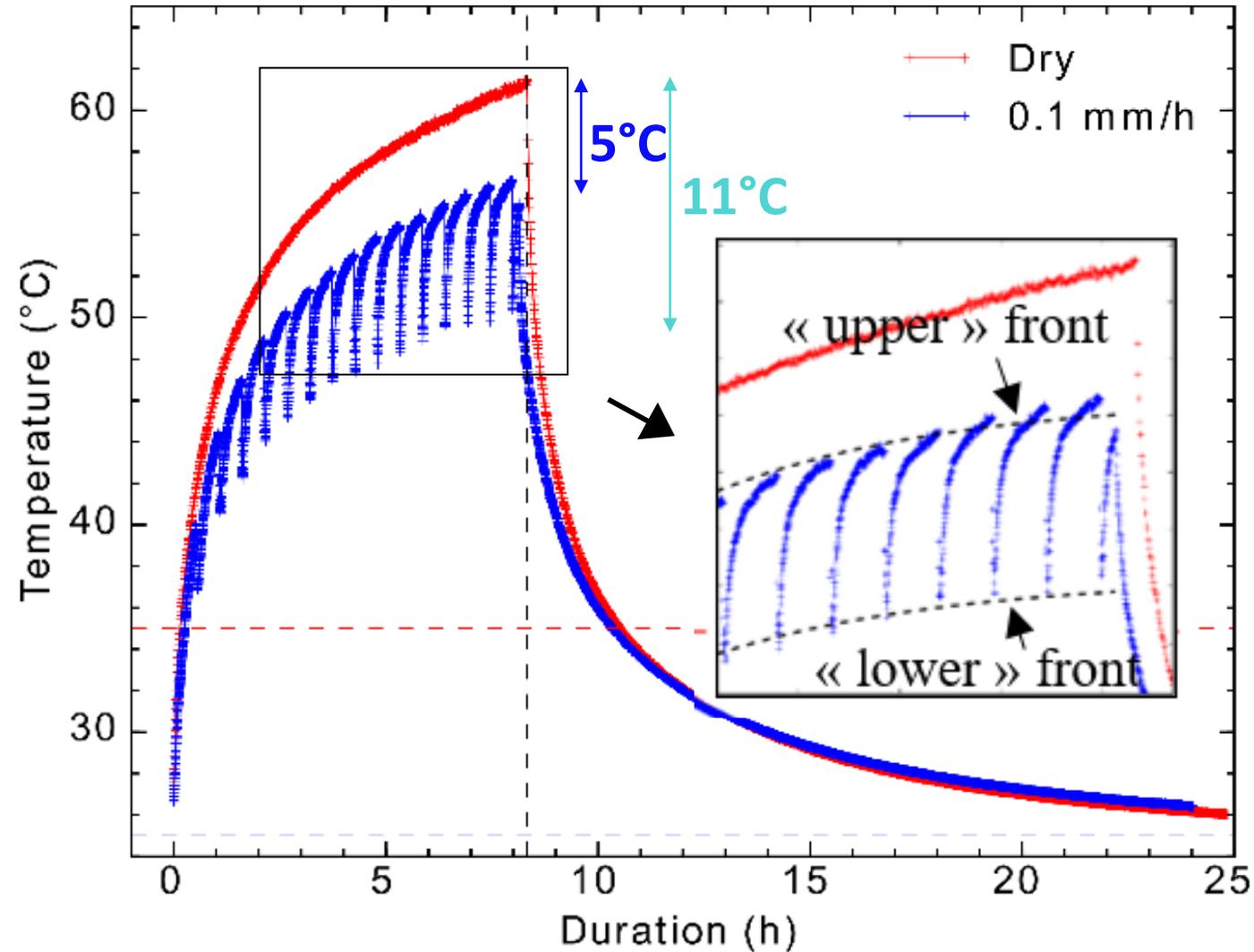
Photographie de la surface de la chaussée



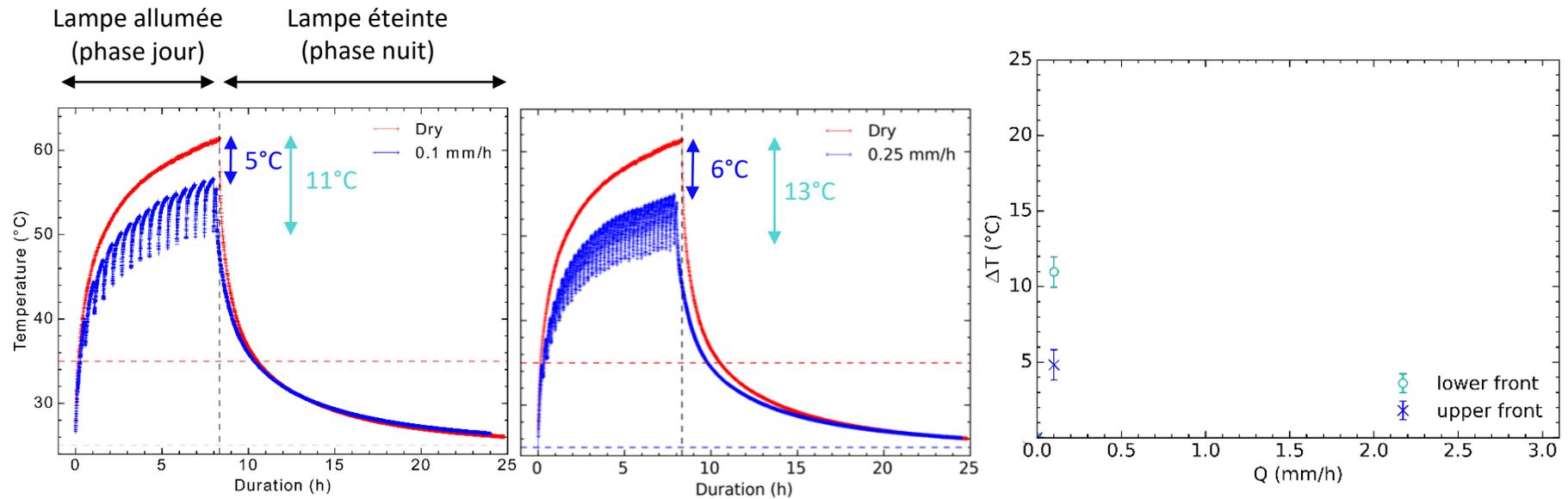
Albédo (sec) : 7,6% Albédo (mouillé): 5,7%

Emissivité: 0,99

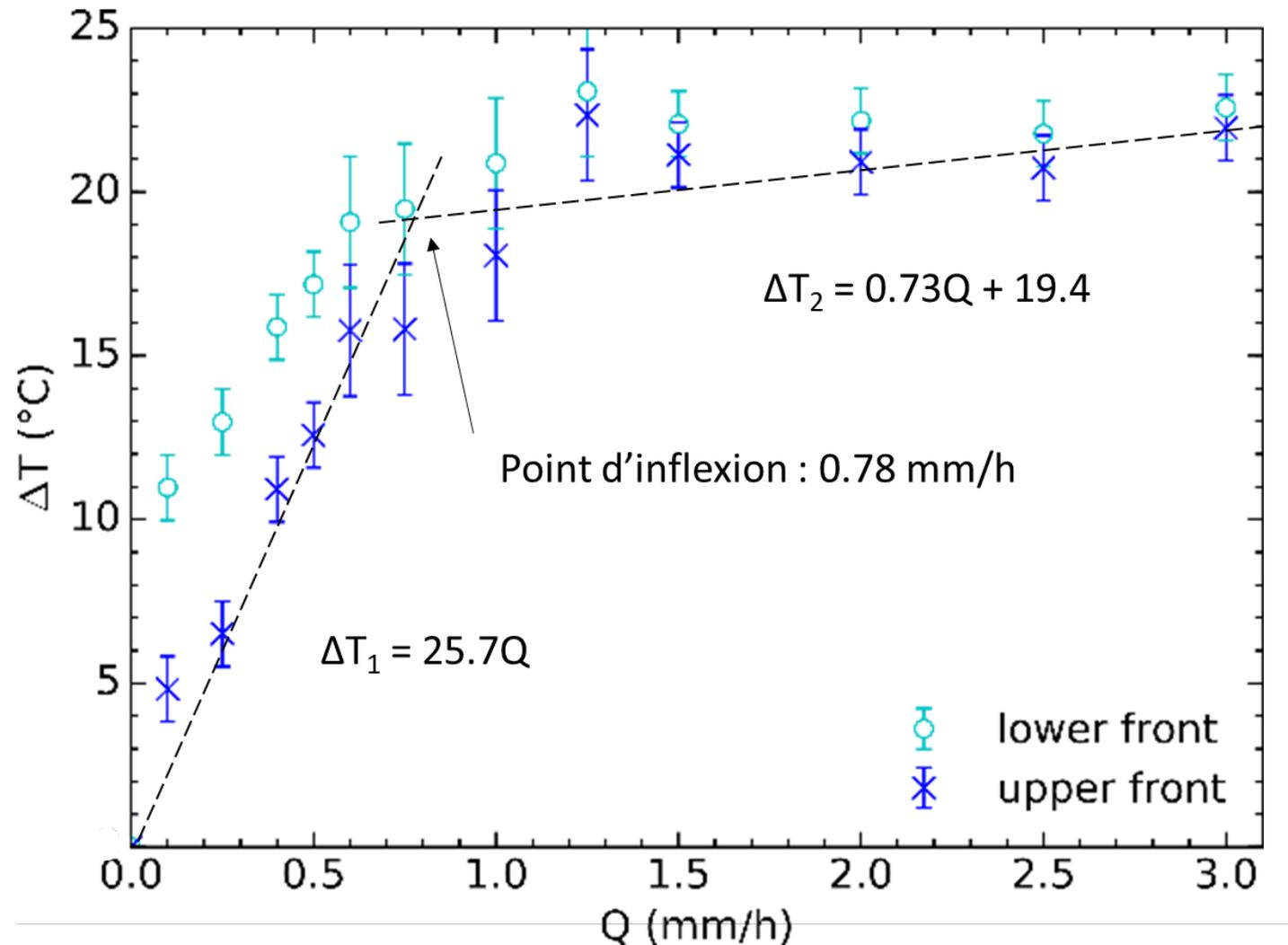
Température de surface



Température de surface



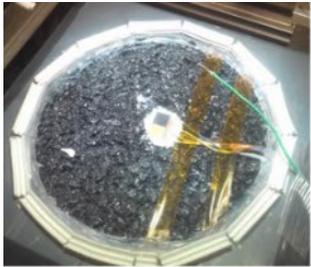
Différence de température de surface sec-arrose



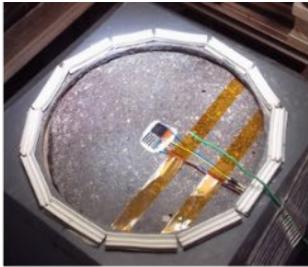
Echantillons de revêtements testés

6 revêtements traditionnels parisiens :

Chaussée
classique



Trottoir
asphalte



Stabilisé



Trottoir granit



Pavés

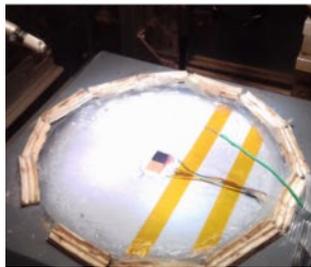


Gazon



6 revêtements innovants (réfléchissants, perméables) :

Peinture
thermo-chromique



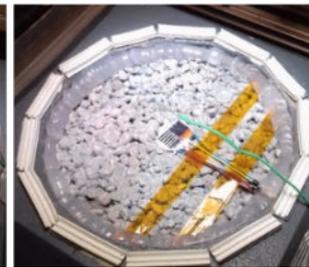
Peinture réfl.
proche IR



Béton de laitier



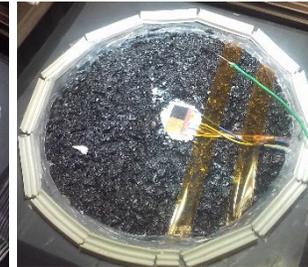
Béton
perméable 1



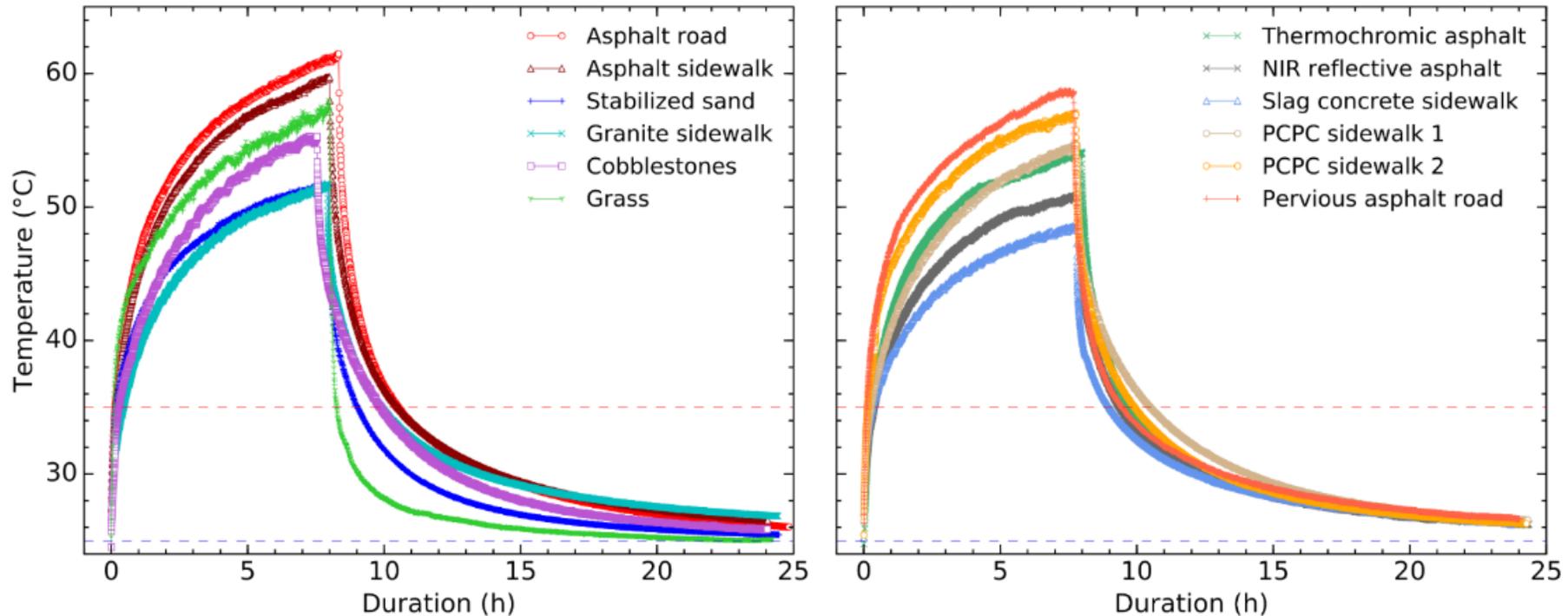
Béton
perméable 2



Enrobé
perméable



Températures de surface (sans arrosage)

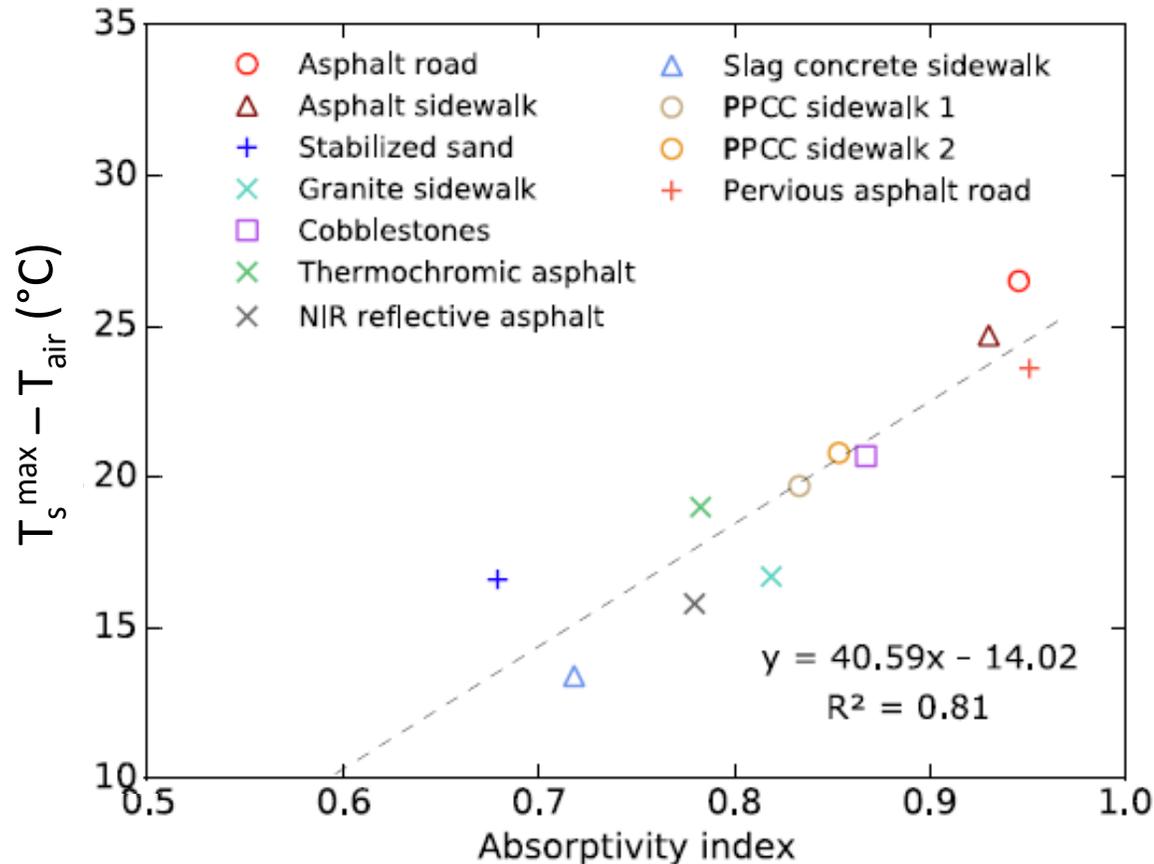


- Le plus frais : béton au ciment de laitier (48°C)
- Le plus chaud : chaussée classique (62°C)
- Gazon sec : 58°C (40°C si arrosé) (Hendel et al. 2018)
- Peintures thermo-chromique et réfléchissante PIR : -5,7° et -8,9°C

Augmentation de la température vs absorptivité

Indice d'absorptivité de la surface :
$$a = \frac{(1-\alpha)S + \epsilon L}{S+L}$$

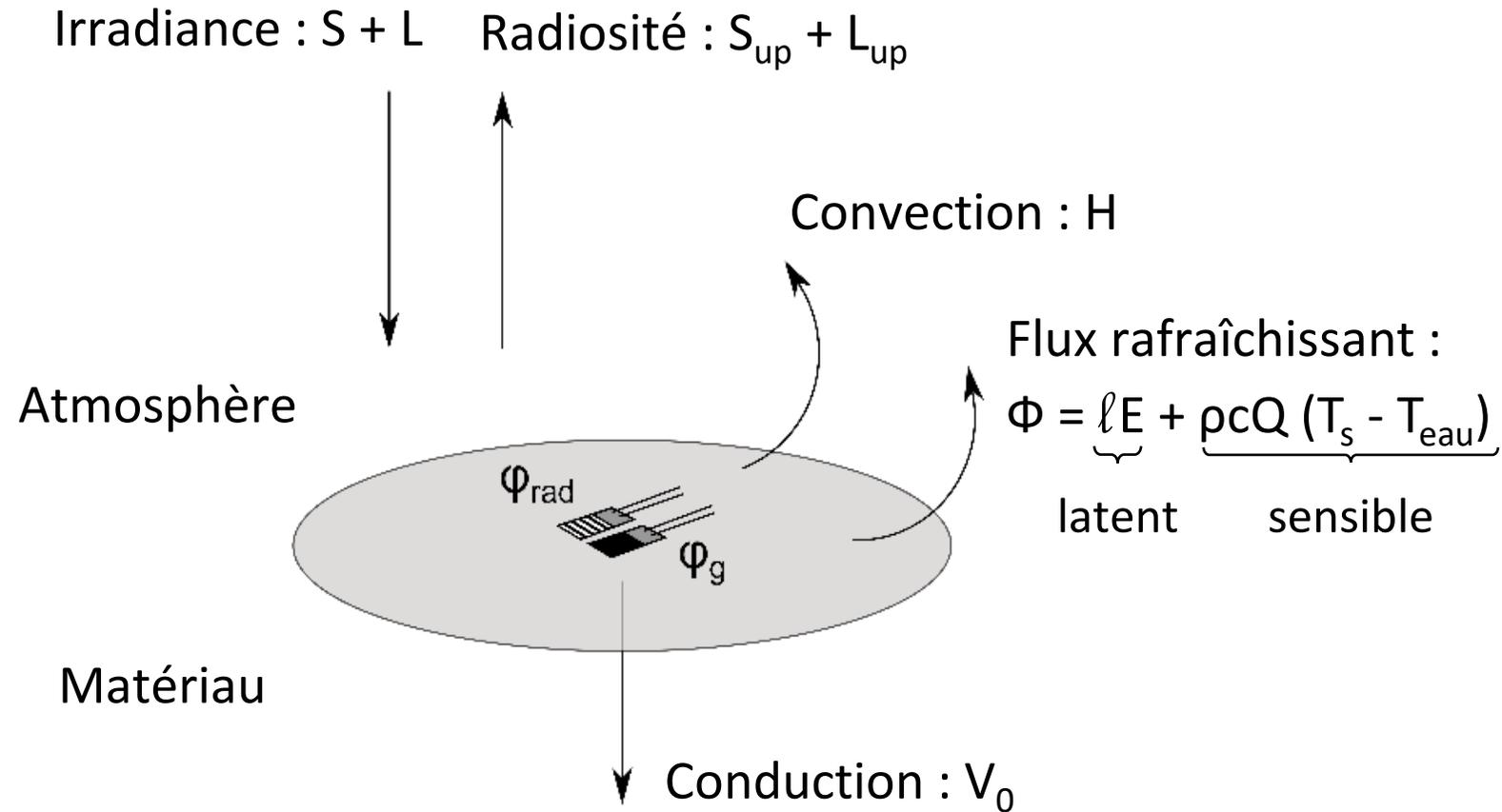
Incertitudes : 0,5°C (ordonnée), 1 - 5% (abscisse)



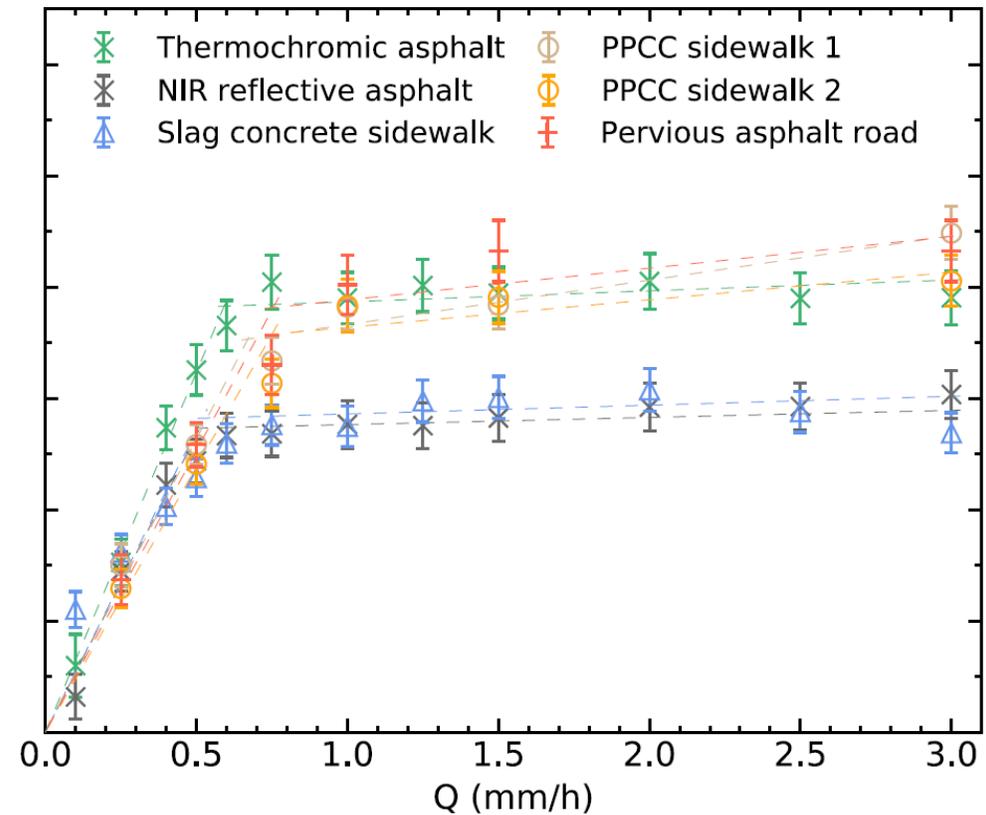
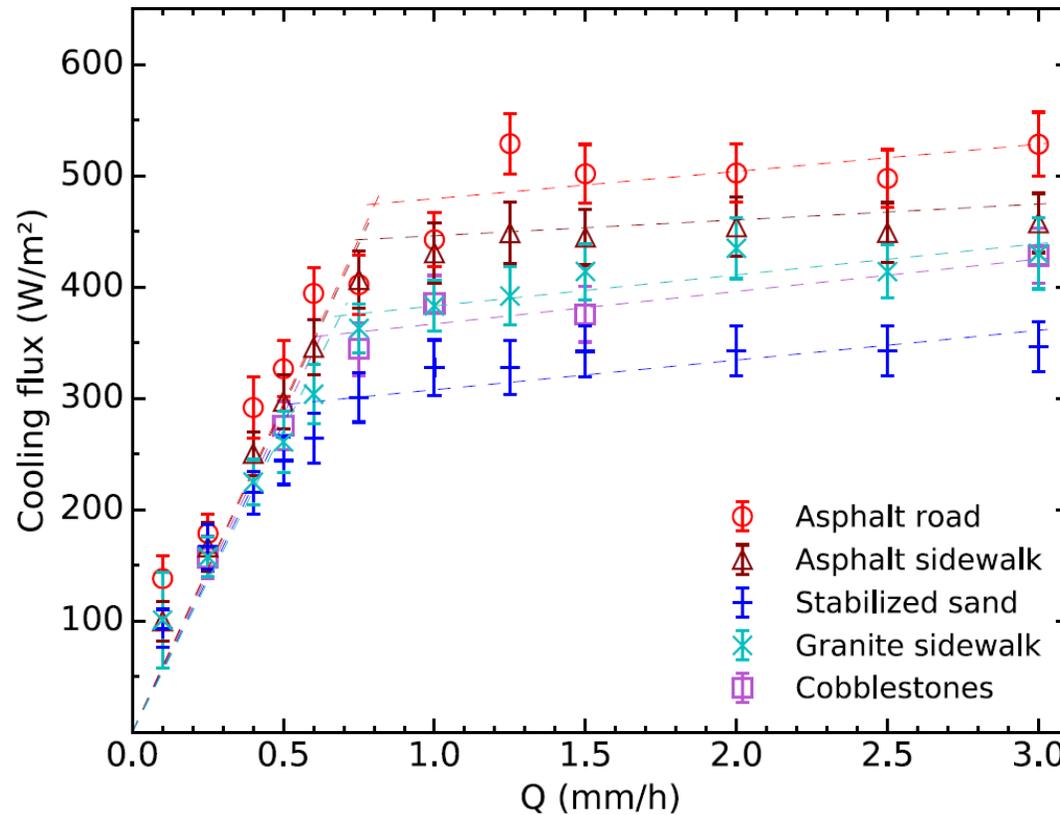
+ 4,6°C pour 0,10 d'absorptivité en plus

A émissivité fixe : + 3°C pour 0,10 d'albédo en moins

Bilan thermique de surface

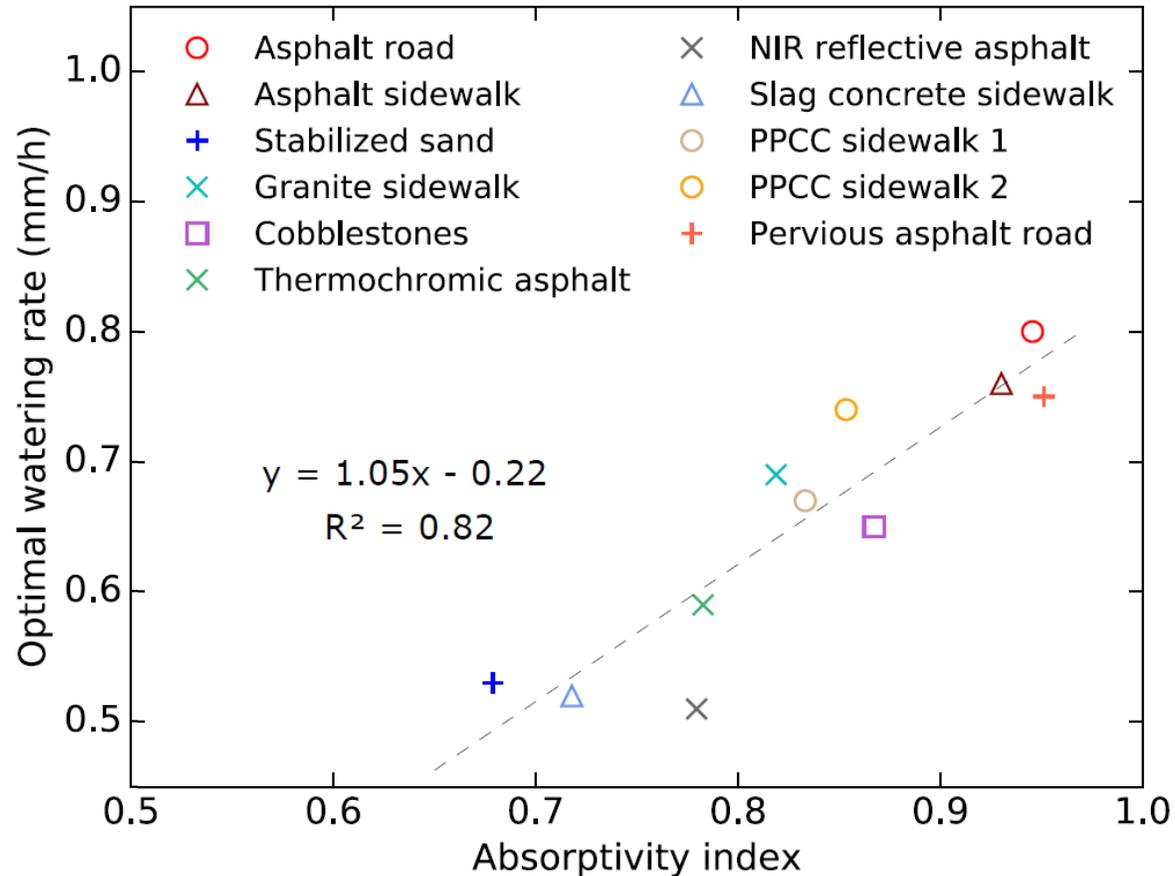


Flux rafraîchissants en fonction du débit



Débits optimaux d'arrosage vs absorptivité

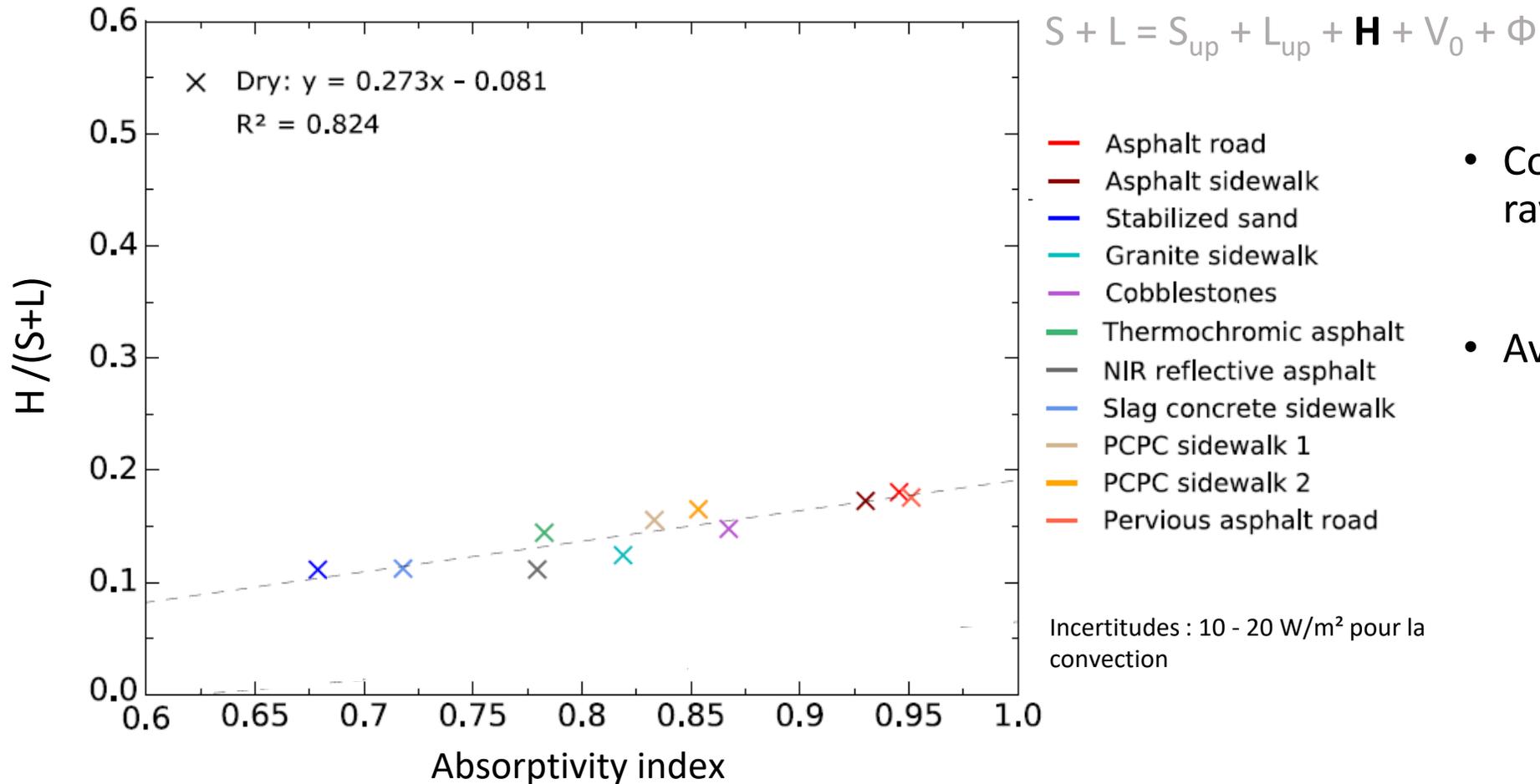
Incertitudes : ~0,05 mm/h (ordonnée), 1 - 5% (abscisse)



Prédiction du débit optimal connaissant l'albédo et l'émissivité

$$Q_{\max} = 0,83 \text{ mm/h pour } a = 1$$

Répartition des apports solaires sur la convection



- Convection : 11% à 18% du rayonnement incident
- Avec arrosage : 2% à 5%

Faisabilité technique ? Consommation d'eau ?

→ Consommation d'eau

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



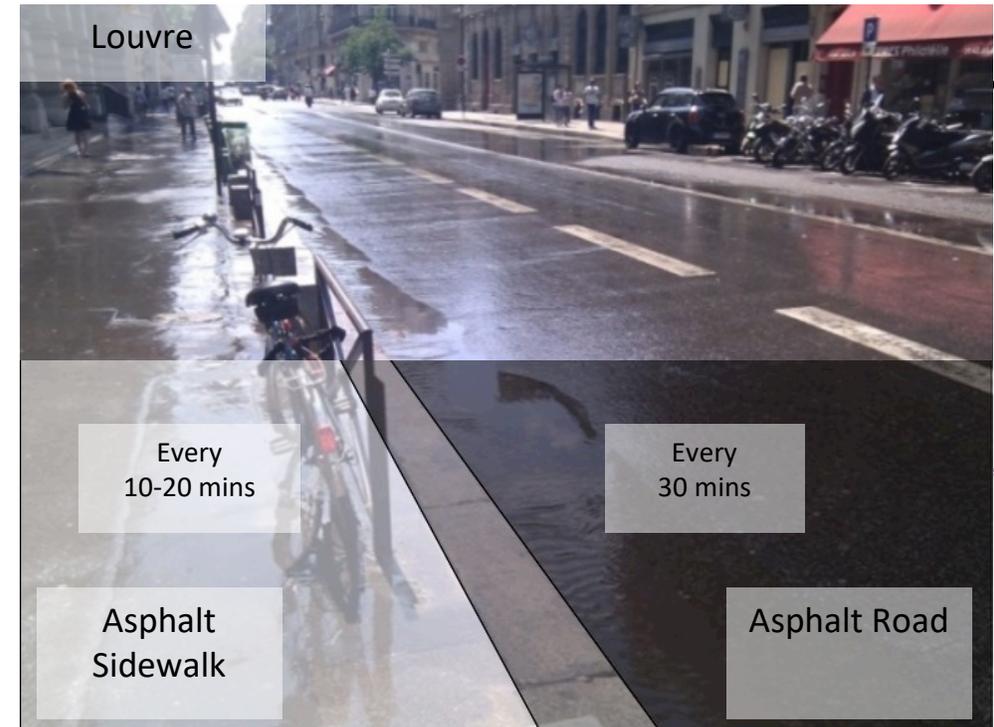
56 000 m³/jr soit 25 L/jr par pers
(30% de la production actuelle ENP)

→ Système d'arrosage ?

- Coût ?
- Faisabilité technique ?

→ Où ?

- Matériaux ? Configuration de rue ?
- Intérêt ? Présence de personnes ?





Cartographie de zones à fort potentiel de rafraîchissement

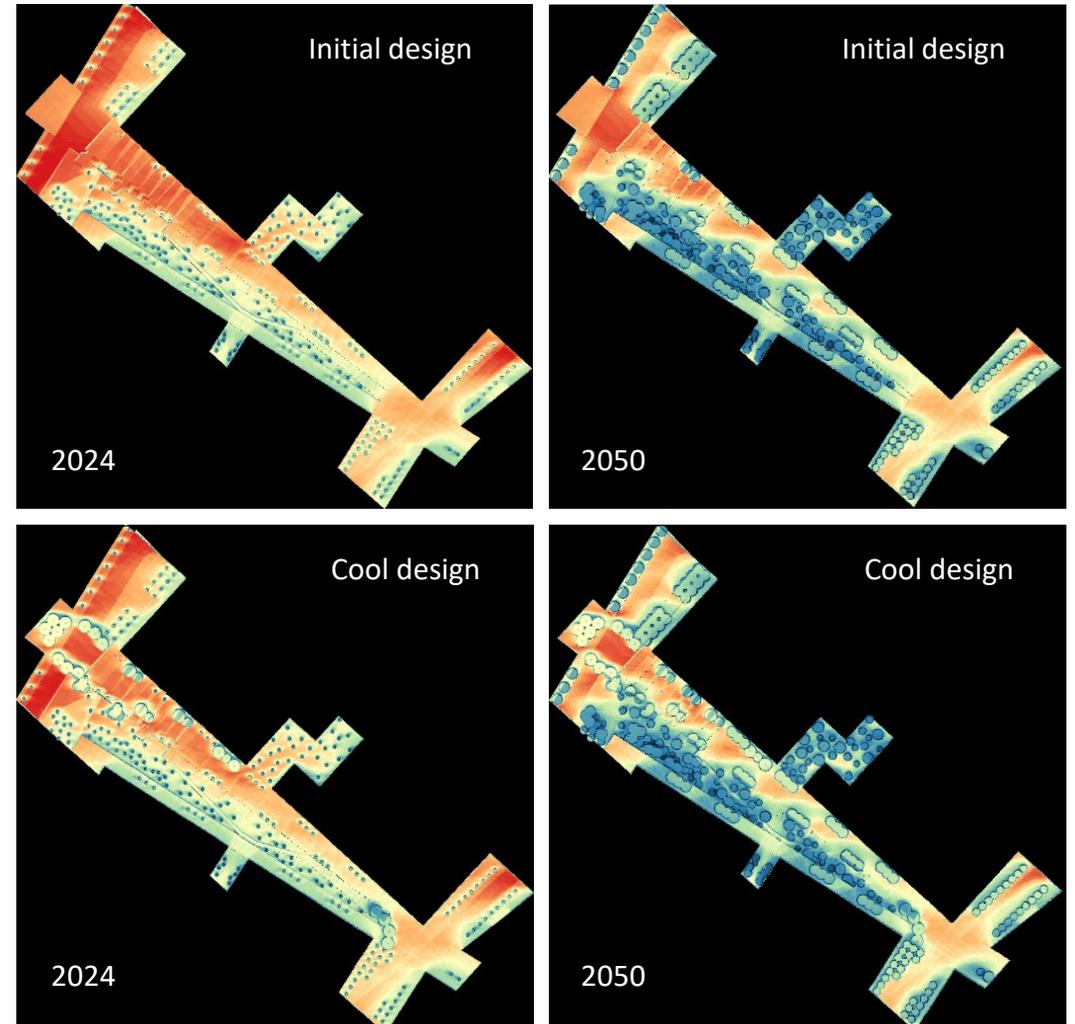


Support d'aide à la décision pour les collectivités : quelles zones doivent être ciblées en priorité ?

ensoleillement, température de l'air, présence de parcs, fontaines, etc. indicateurs socio-économiques etc.), critères opérationnels (arrosage) etc.

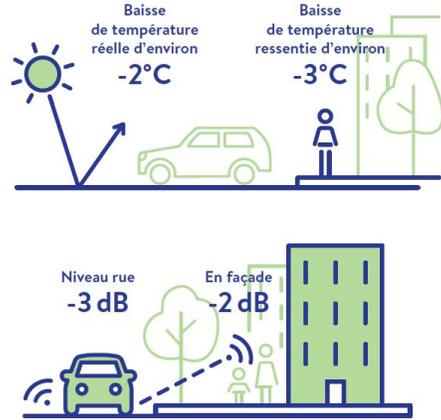
Quelles zones cibler en priorité ?

- ➔ Où dois-je rénover/aménager en premier lieu ?
Où concentrer mes efforts ?
- ➔ Comment penser mon projet de rafraîchissement pour en maximiser l'effet ?
- ➔ Pour quel effet quantitatif ?
(mesure)



Hendel et al., *unpublished*

Autres projets



Démonstrateur Eiffage



Cours d'école « ilots de fraîcheur » : évaluation microclimatique

Revêtements « innovants » frais
Projet Life Cool and Low Noise Asphalt



Lisière d'une Tierce Forêt





Merci de votre attention

Sophie Parison

Post-doctorante en climat et rafraîchissement urbain

Université de Paris

Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain (LIED)

UMR 8236 CNRS

sophie.parison@u-paris.fr

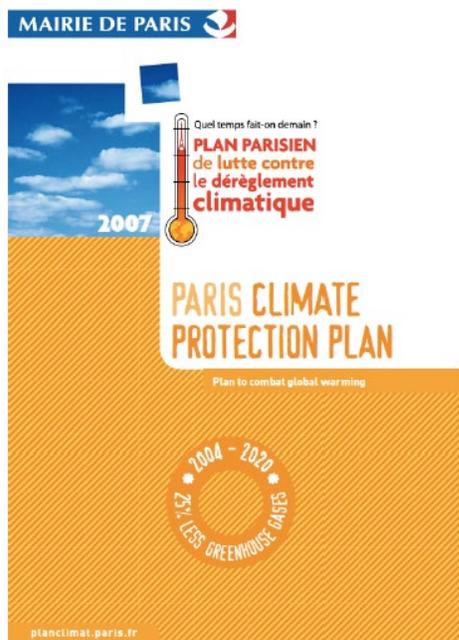
sophieparison@gmail.com



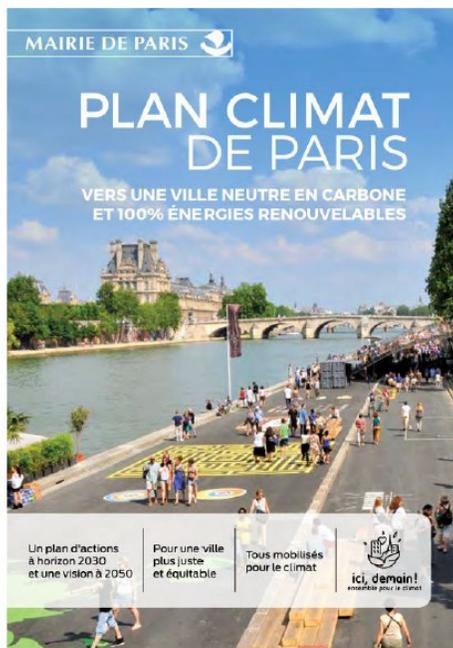
Annexes

Prise de conscience à la Ville de Paris

Plan Climat 2007



Plan Climat 2017



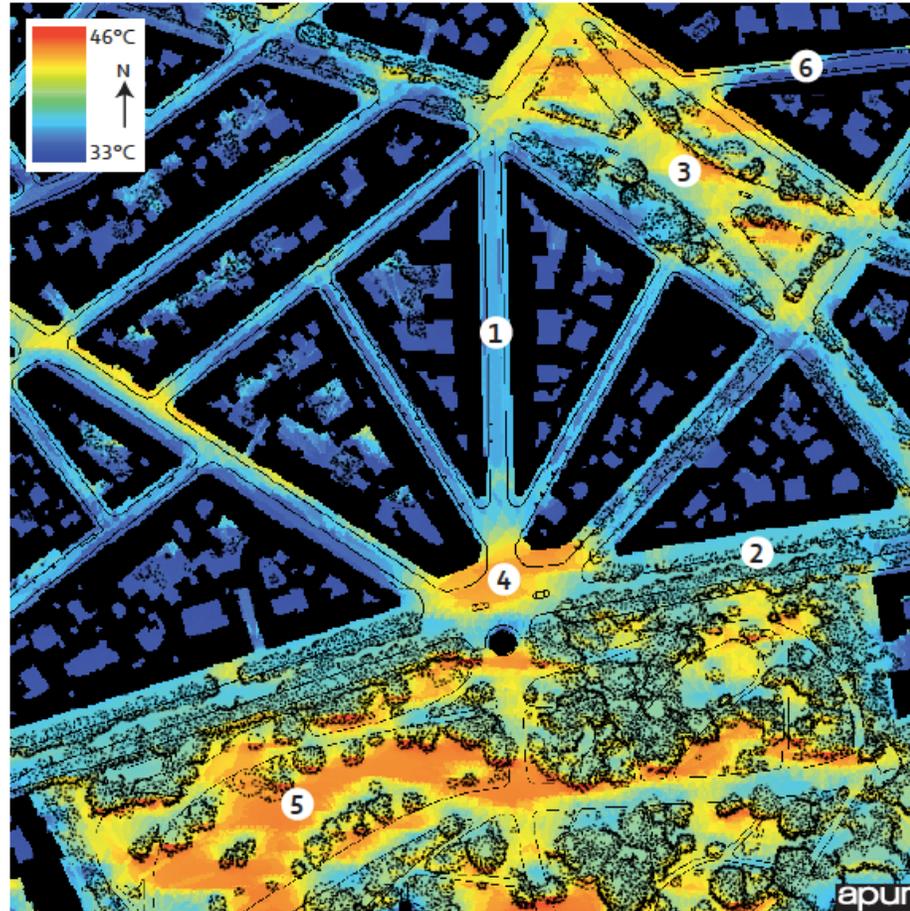
- Atténuation du changement climatique
- Nécessité d'adaptation :
 - « Zones ouvertes au public et plus fraîches que l'environnement proche »
 - Solutions aidant à « réduire la température »
- Etudes et expérimentations :
 - EPICEA, Arbre et Climat, îlots et parcours de fraîcheur, Cours d'école OASIS, Asphalt Cool & Low Noise Asphalt, etc.

Plan Climat 2012

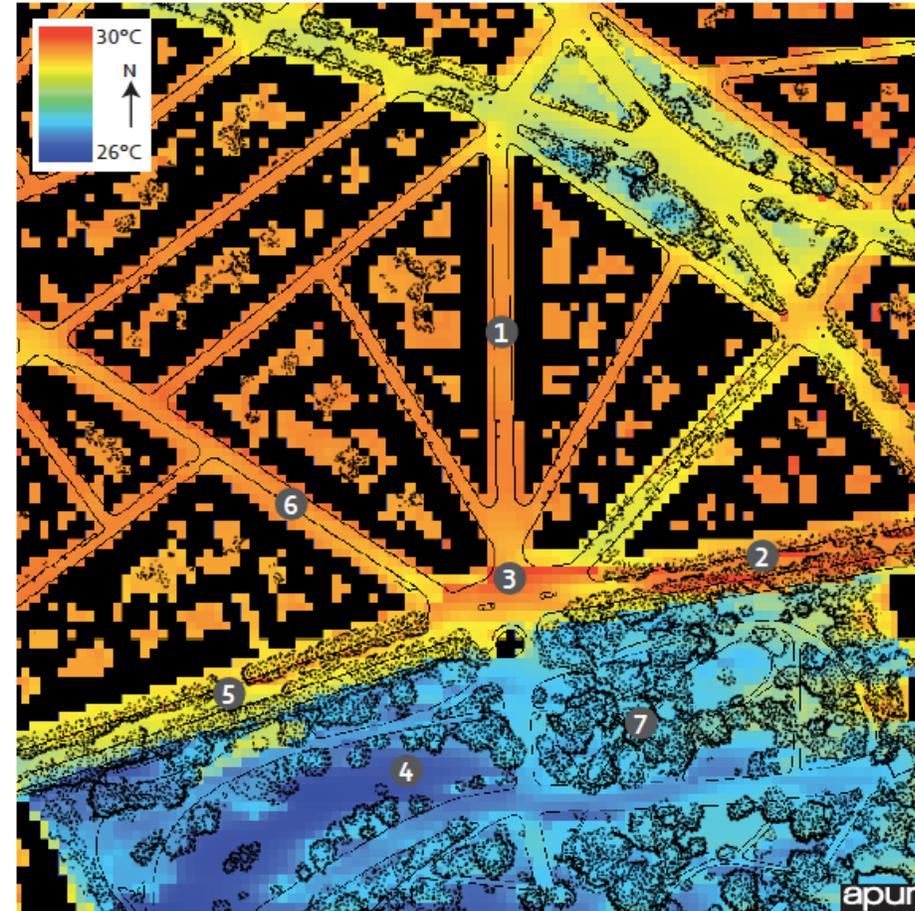


Evolution temporelle de l'ICU

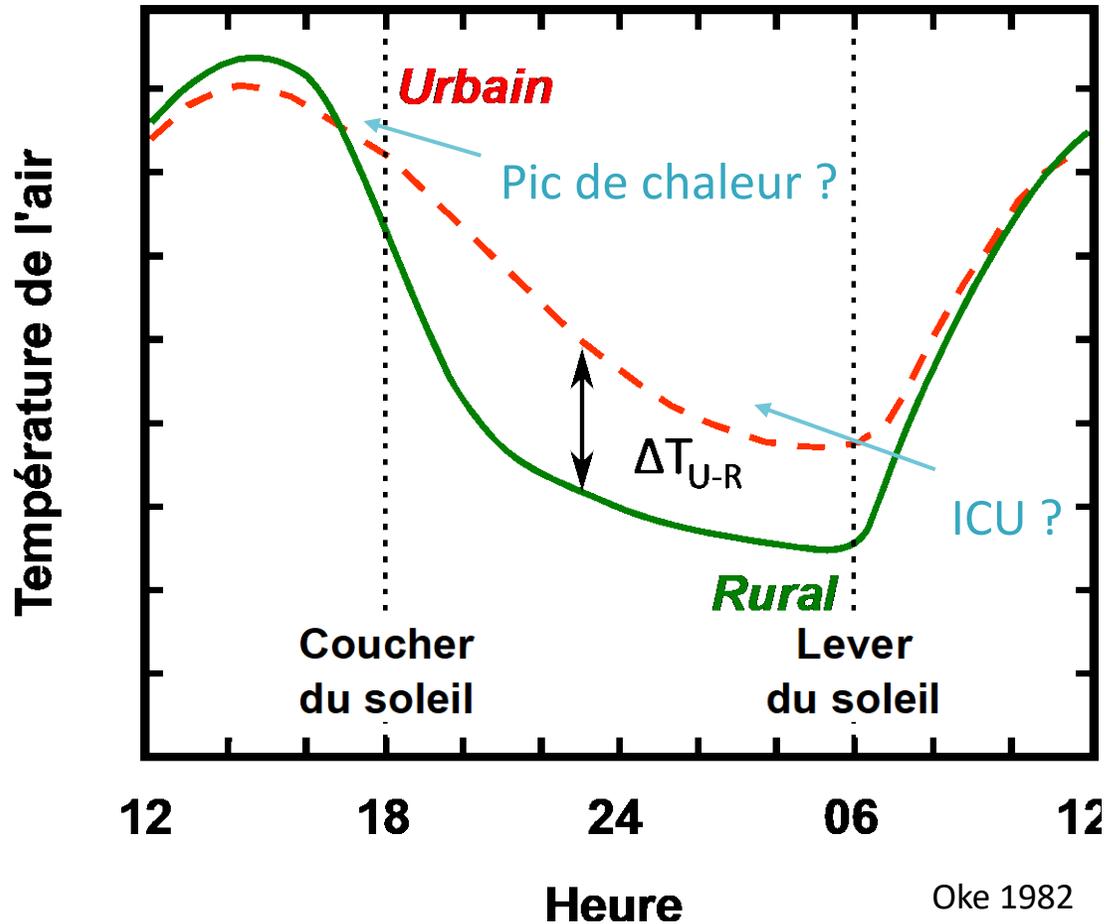
Jour



Nuit



Objectif ?

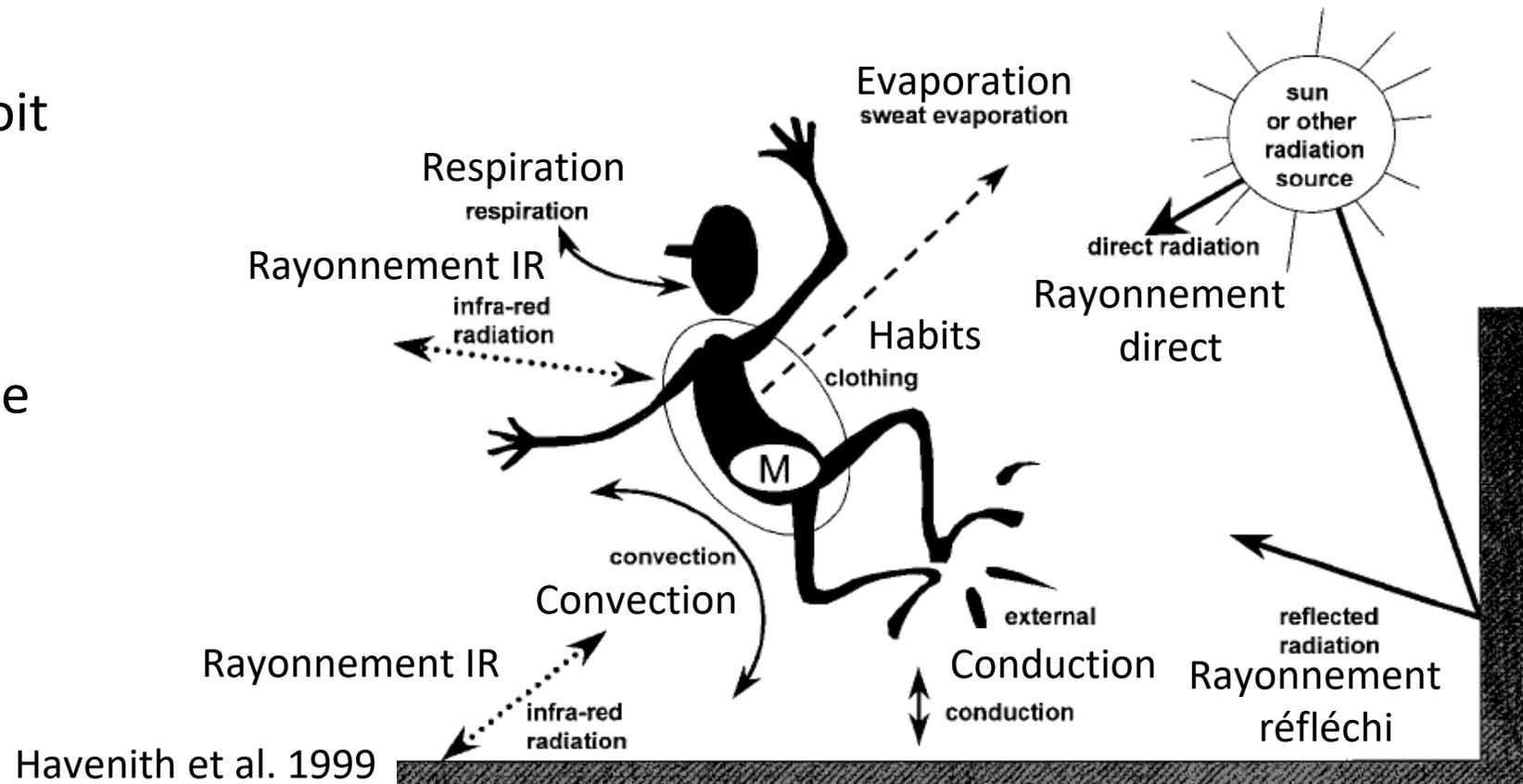


- Quel but ?
(santé publique, limitation chaleur entrante : ombrage, etc.)
- Quel site ?
(rue encaissée, place ouverte, etc.)
- Quel potentiel de rafraîchissement ? (exposition, etc.)
- A quel moment ?
(nuit, jour)

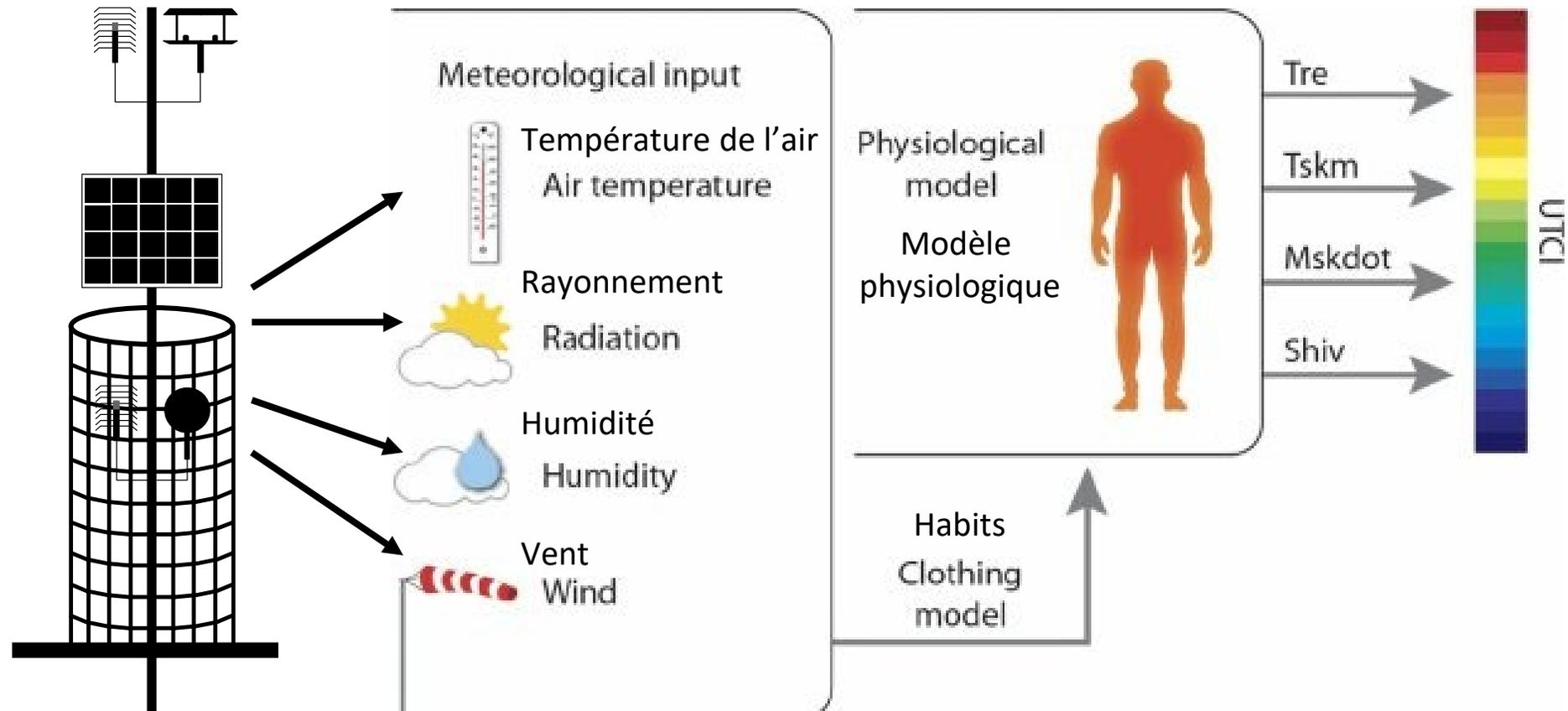
Notion de stress thermique

→ Etat physiologique dans lequel le corps humain doit fournir un effort pour réguler sa température.

Il dépend des échanges de chaleur avec l'environnement que le corps doit compenser.



Estimation du niveau de stress thermique



Bilan thermique de surface

$$\Phi = \Delta H_{\text{sec-arr}} + \Delta V_{0, \text{sec-arr}} - \Delta R_{n, \text{sec-arr}}$$

$\Delta V_{0, \text{sec-arr}}$: mesurée directement
(capteurs à -6 cm)

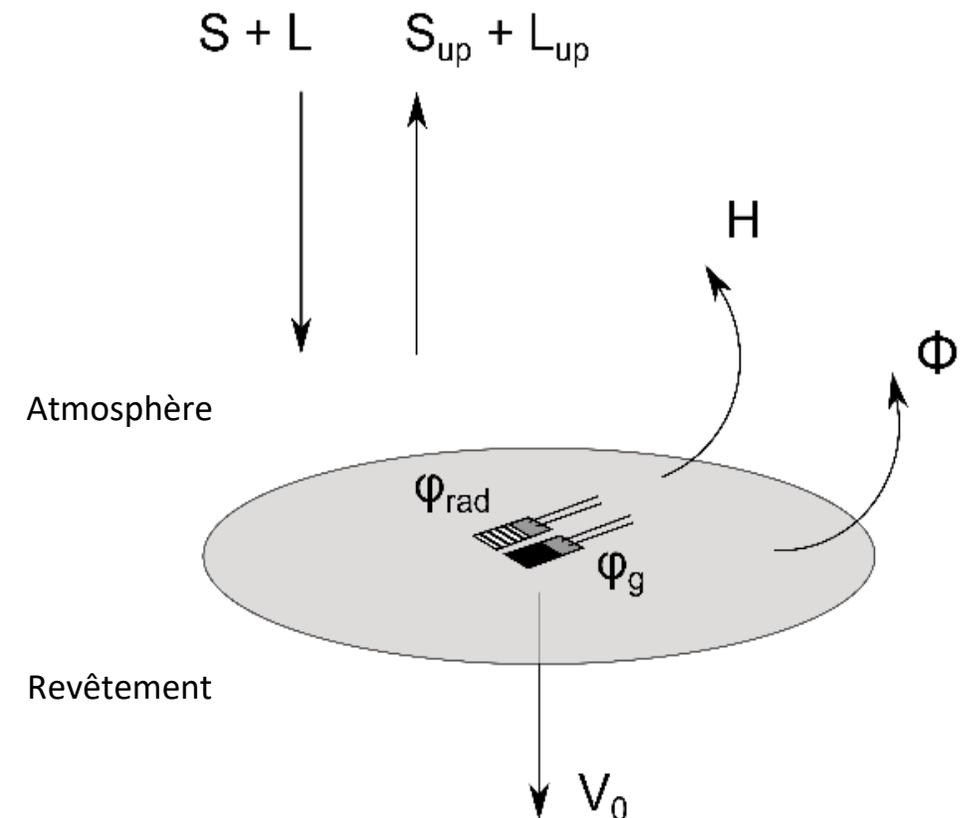
$$H = h (T_s - T_a)$$

$$\Delta H_{\text{sec-arr}} = h (T_{s, \text{sec}} - T_{s, \text{arr}})$$

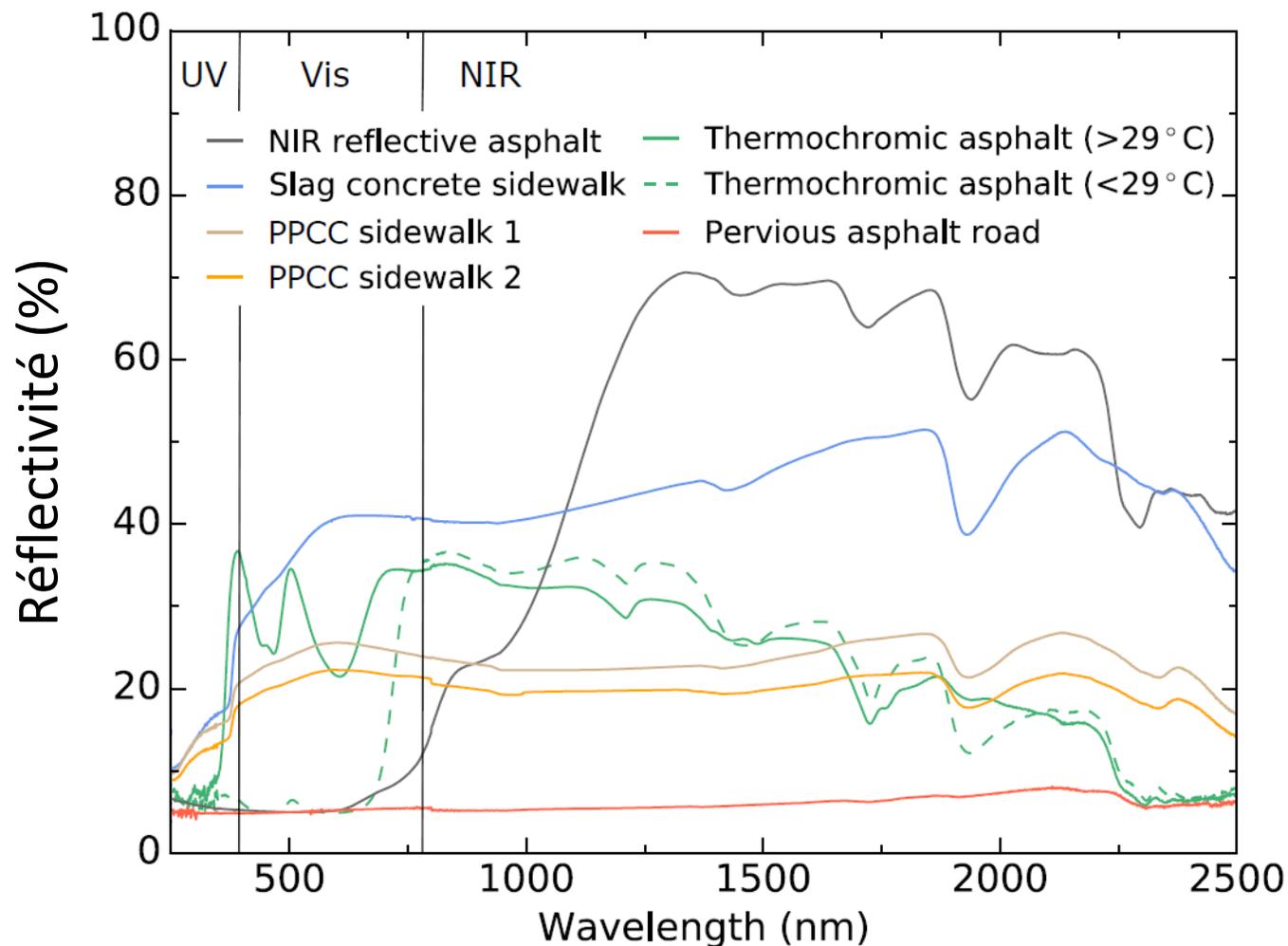
$$R_n = S + L - (S_{\text{up}} + L_{\text{up}})$$

$$R_n = (1 - \alpha) S + \varepsilon (L - \sigma T_s^4)$$

$$\Delta R_{n, \text{sec-arr}} = \sigma (\varepsilon_{\text{arr}} T_{s, \text{arr}}^4 - \varepsilon_{\text{sec}} T_{s, \text{sec}}^4) + (\varepsilon_{\text{sec}} - \varepsilon_{\text{arr}}) L + (\alpha_{\text{arr}} - \alpha_{\text{sec}}) S$$



Albédo des échantillons



Albédo :

Enrobé perméable : 0,063

Béton perméable 1 : 0,203

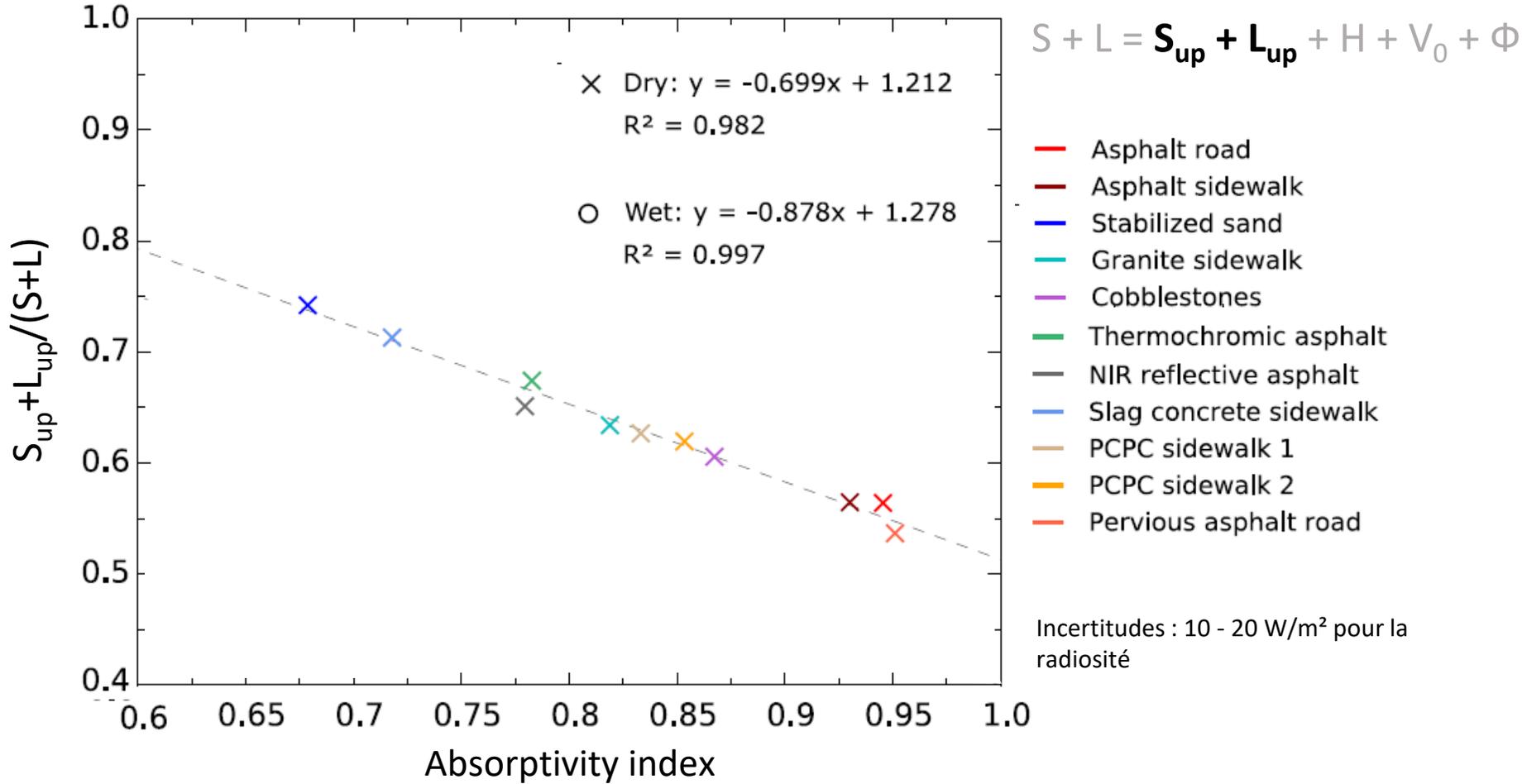
Béton perméable 2 : 0,233

Peinture PIR : 0,303

Peinture th-chr. : 0,308

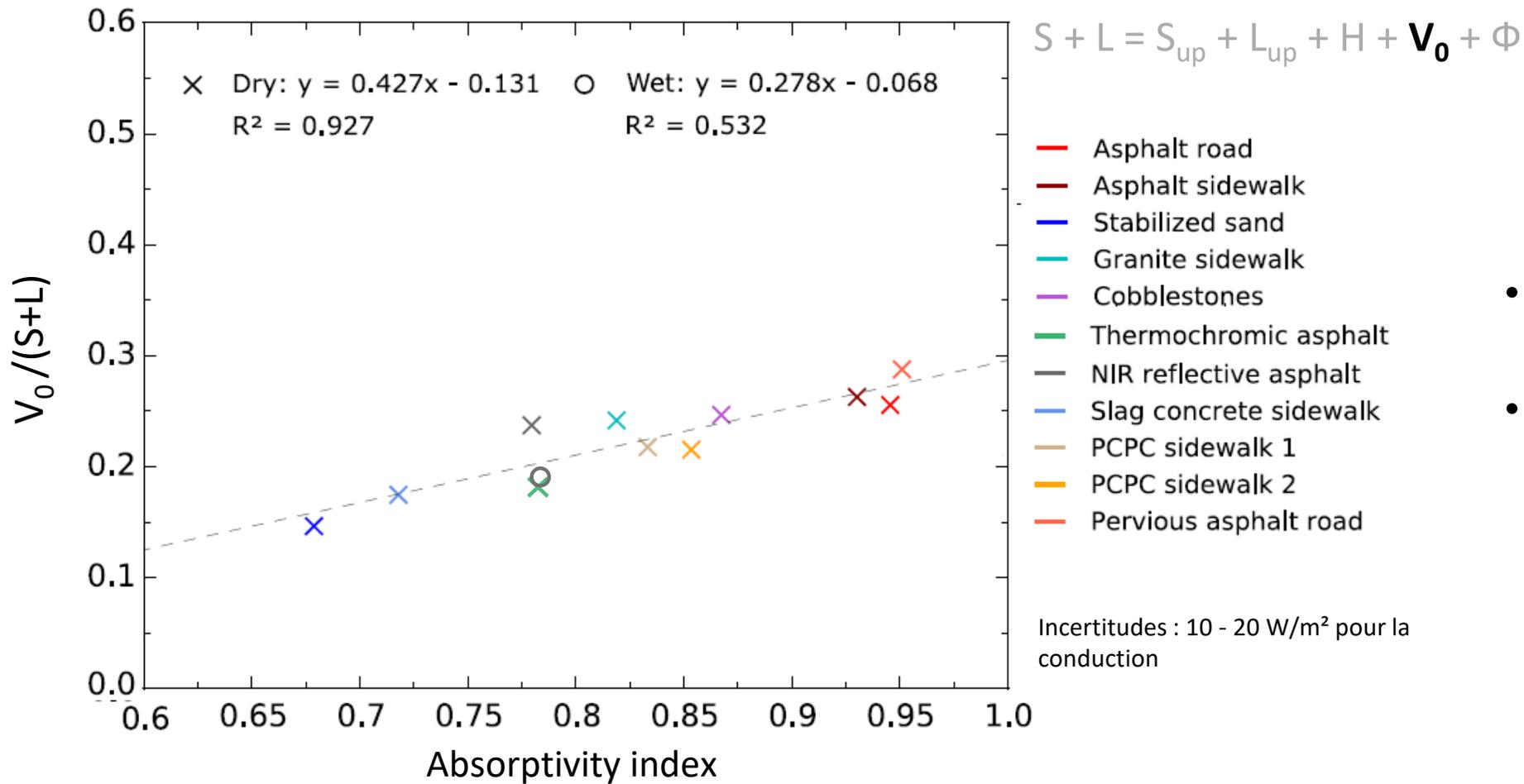
Béton laitier : 0,409

Répartition de l'irradiance : radiosité



- Radiosité : 56% à 74% du rayonnement incident
- Avec arrosage : 42% à 64%

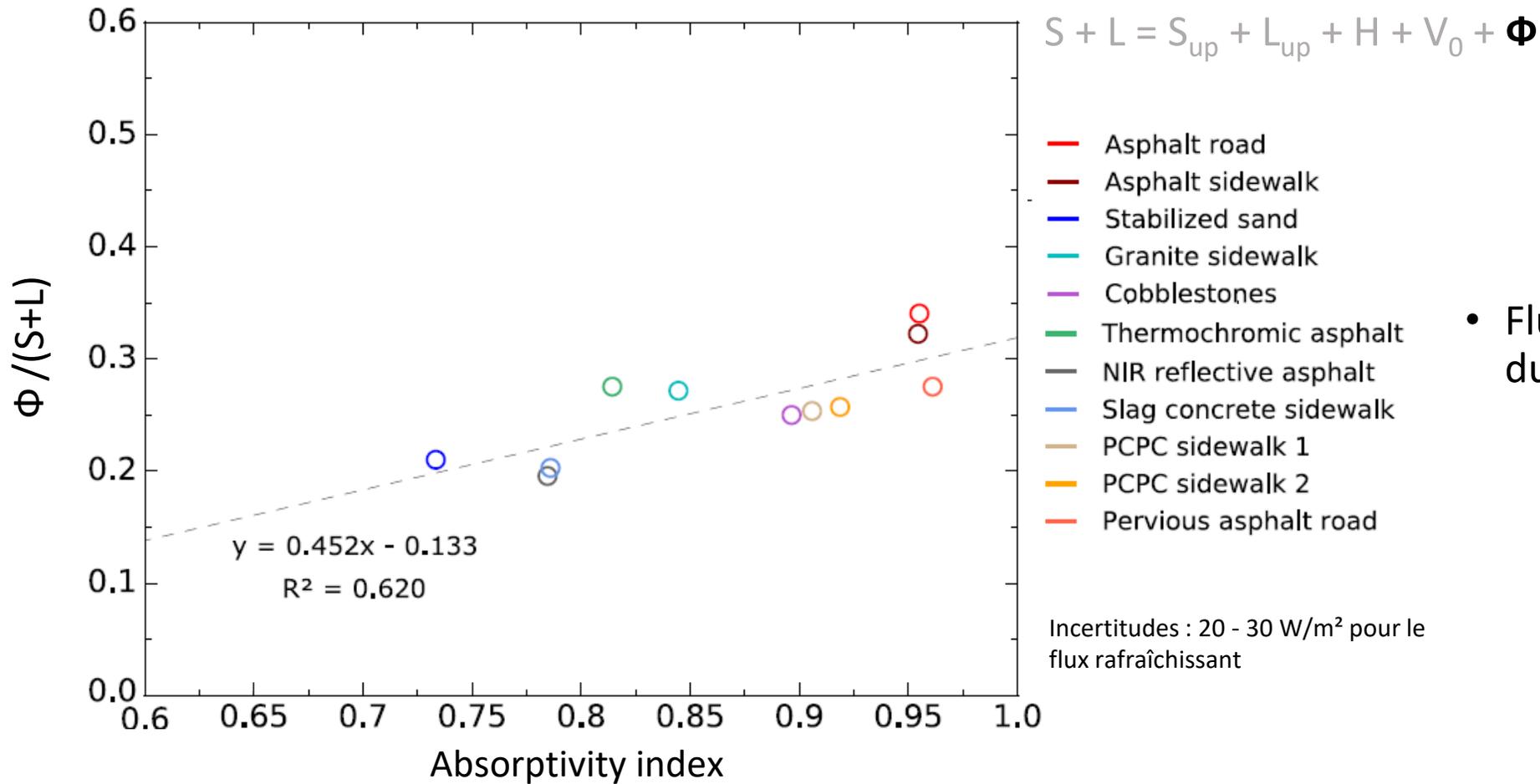
Répartition de l'irradiance : conduction



- Conduction : 15% à 26% du rayonnement incident
- Avec arrosage : 12% à 18%

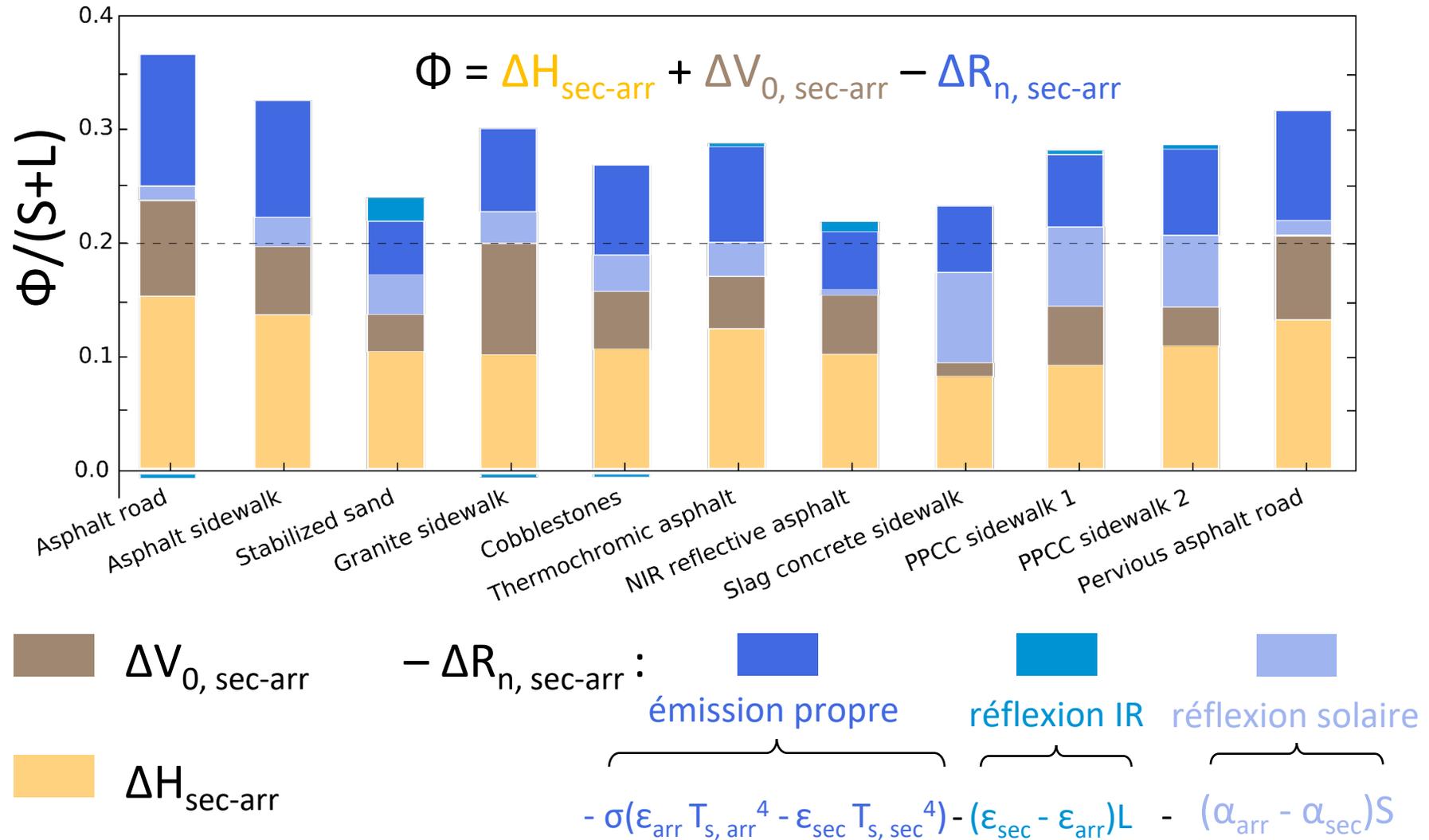


Répartition de l'irradiance : flux rafraîchissant



- Flux rafraîchissant : 22% à 35% du rayonnement incident

Constitution du flux rafraîchissant

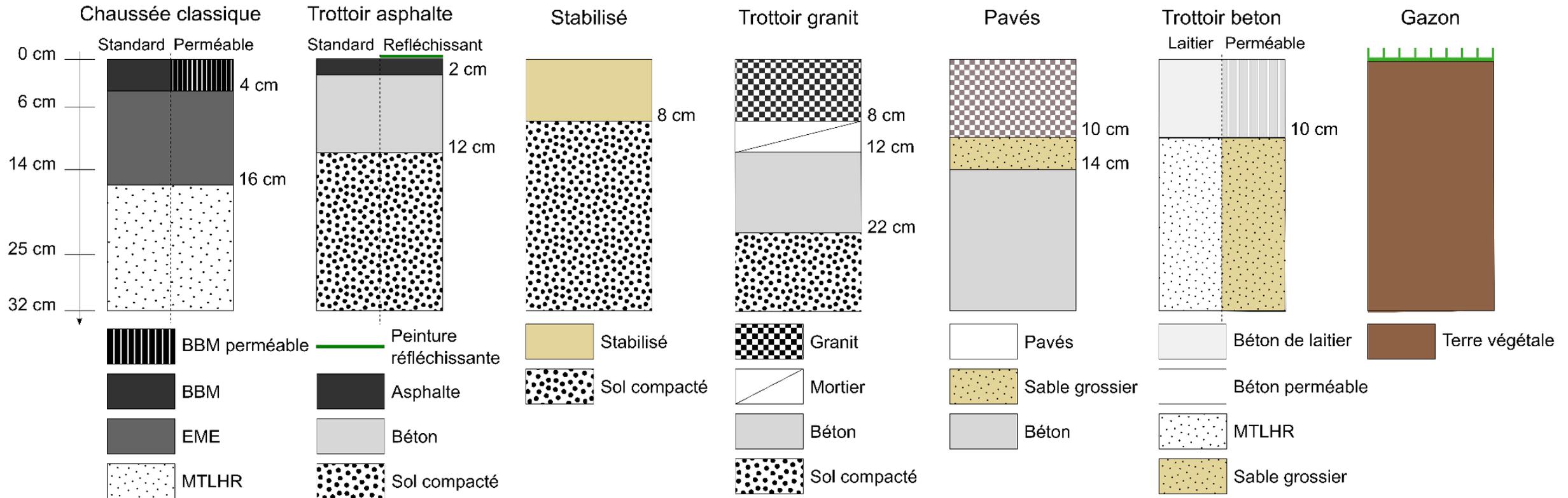


Confrontation des résultats avec le terrain (chaussée)

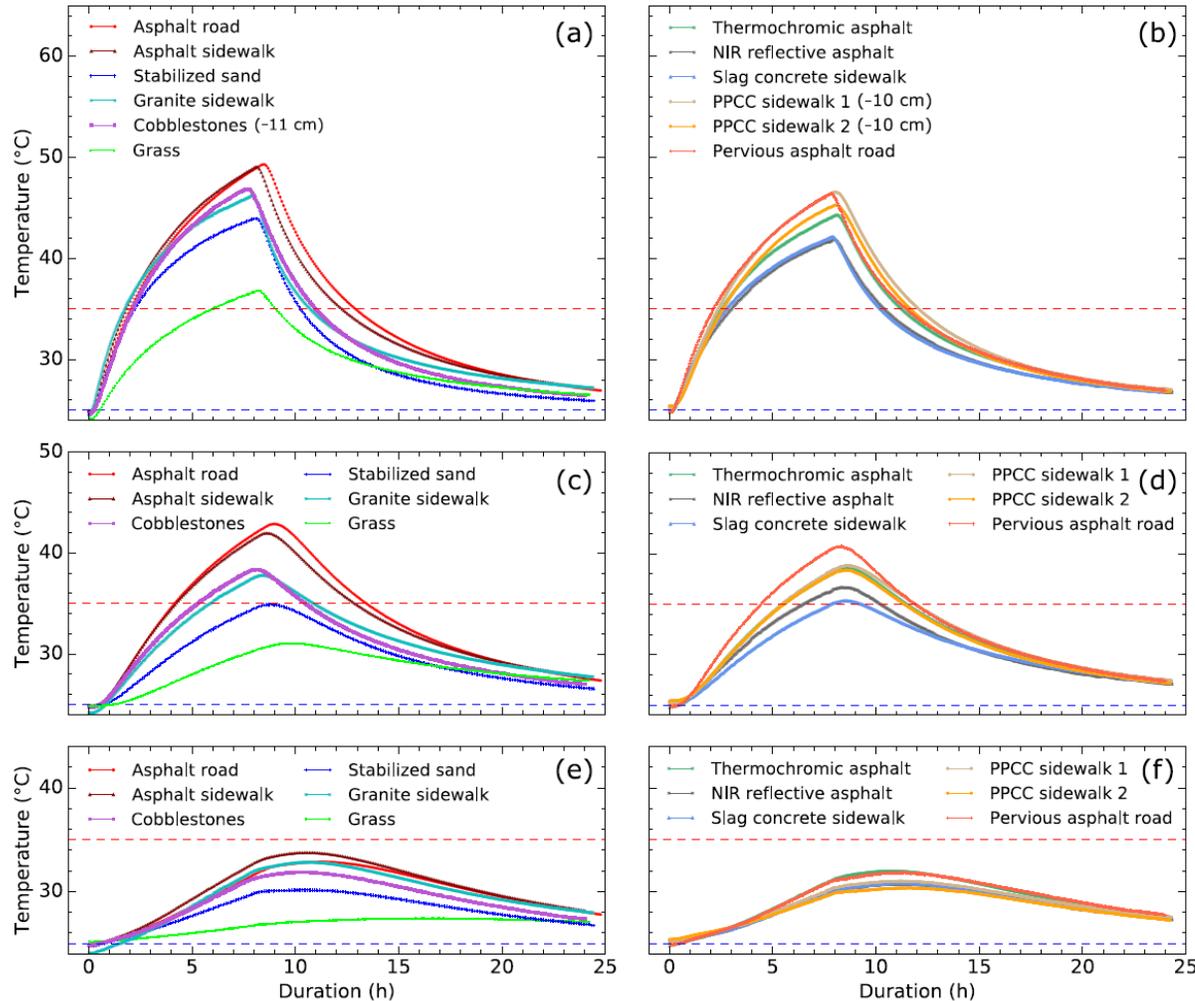
Terrain (Hendel et al. 2015)	Laboratoire (Parison et al. 2020)
R _n cumulé de jour 2,5 – 3,3 kWh/m ²	R _n cumulé de jour 5,1 kWh/m ²
Débit optimal 0,31 – 0,41 mm/h	Débit optimal 0,78 – 0,81 mm/h

- Bon accord entre le terrain et le laboratoire

Echantillons de revêtements testés

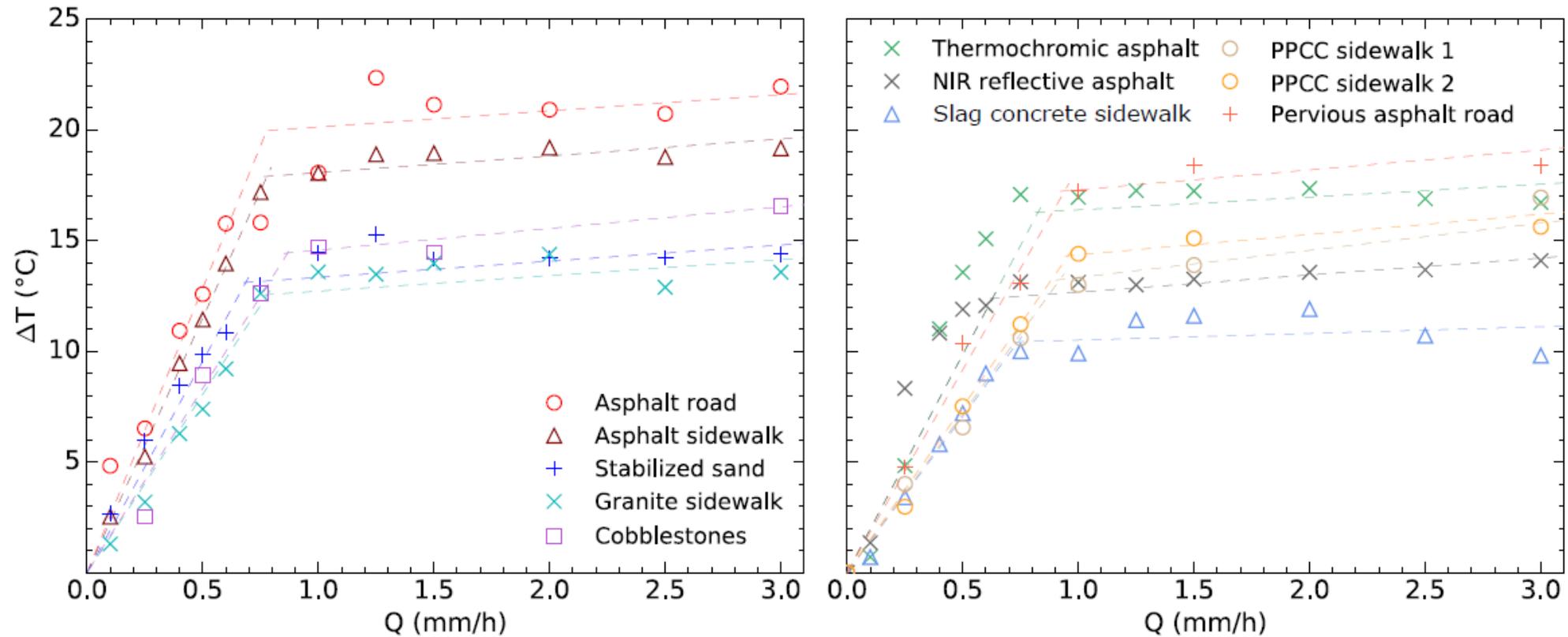


Températures en profondeur (sans arrosage)



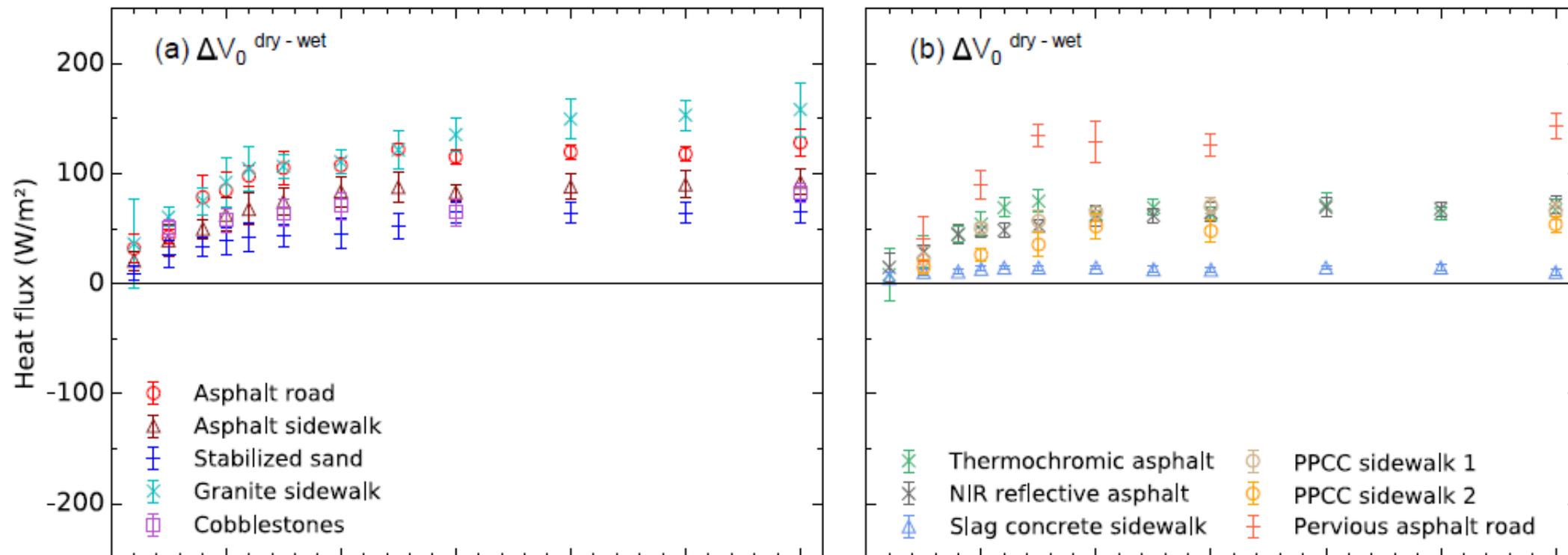
- Gazon : reste « frais » en profondeur (terre peu conductrice)
- Granit : aussi chaud qu'un asphalte (-25 cm) (forte effusivité et diffusivité)

Différences de température « sec - arrosé »



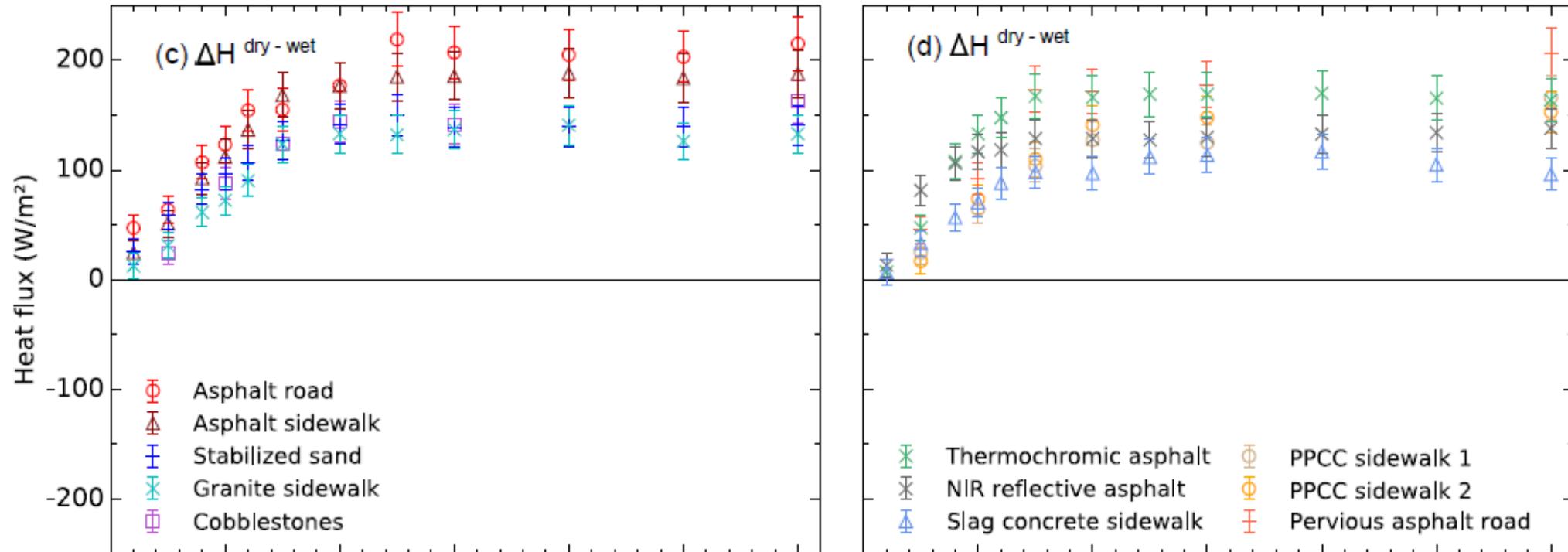
- Selon le matériau : réductions de 10° à 22°C

Différence « sec – arrosé » flux conductif



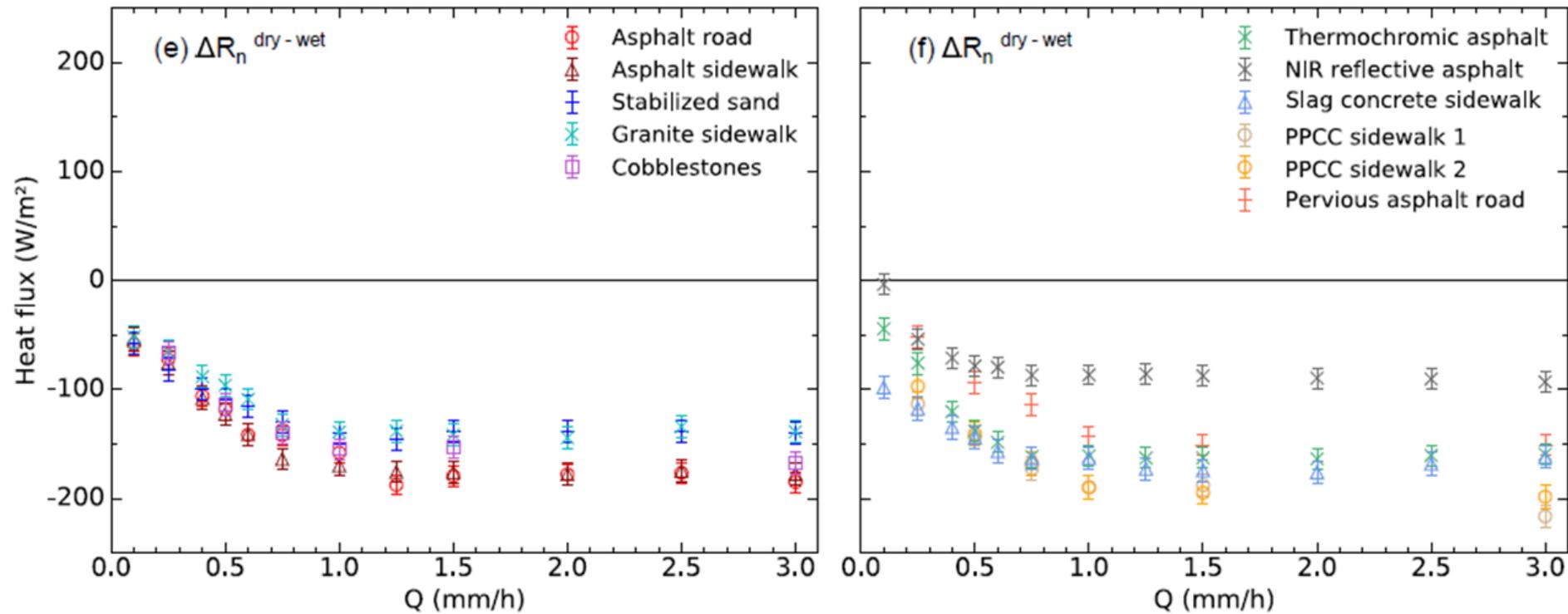
- Le trottoir granit est le plus impacté (grande conductivité)
- Le stabilisé et le béton au ciment de laitier sont peu impactés (faible conductivité, fort albédo)

Différence « sec – arrosé » échanges convectifs



- Proportionnel à la différence de température entre la surface et l'air ambiant (h identique pour toutes les structures).
- Les structures chauffant le plus sont donc plus impactées.

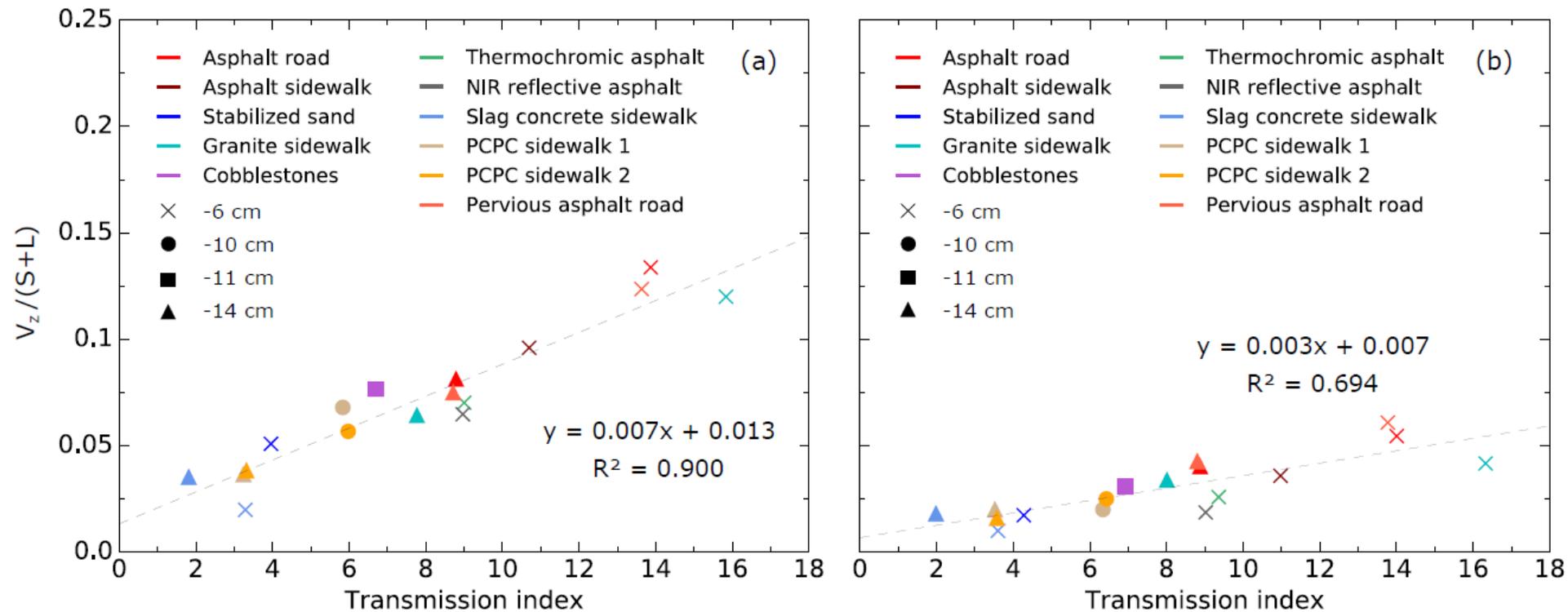
Différence « sec – arrosé » rayonnement net



- $$\Delta R_{n, \text{sec-arr}} = \underbrace{\sigma(\epsilon_{\text{arr}} T_{s, \text{arr}}^4 - \epsilon_{\text{sec}} T_{s, \text{sec}}^4)}_{\text{émission propre}} + \underbrace{(\epsilon_{\text{sec}} - \epsilon_{\text{arr}})L}_{\text{réflexion IR}} + \underbrace{(\alpha_{\text{arr}} - \alpha_{\text{sec}})S}_{\text{réflexion solaire}}$$

- Réduction d'autant plus importante que :
 - La différence de température de surface est grande (faible albédo)
 - La différence d'émissivité est grande (négligeable ici)
 - La différence « sec-arrosé » d'albédo est grande (ex: béton de laitier)

Transmission de chaleur en profondeur



- Indice de transmission : $\tau(z < 0) = a \frac{e_0/\lambda_0}{\sum_i e_i/\lambda_i}$
- Le granit transmet autant que les revêtements asphaltés (-6 cm), les pavés transmettent autant à -11 cm que la chaussée à 14 cm
- L'asphalte transmet autant à 6cm que l'asphalte traditionnel à 14 cm, le béton de laitier transmet le moins de chaleur à une profondeur donnée