

# **SOCIETE FRANÇAISE DE THERMIQUE**

***Groupes « Thermique atmosphérique et  
adaptation au changement climatique » et  
« Génie climatique – Thermique de l’habitat »***

---

***Jeudi 7 décembre 2023***

# Thème de la journée

---

## *Température radiante en milieu urbain : mesures et modélisation*

L'adaptation des villes aux effets des vagues de chaleur nécessite de prédire finement les transferts thermiques dans la géométrie urbaine. La température radiante est une observable mesurable par voie optique qui pilote le confort thermique des individus. Elle peut aussi rendre compte des transferts thermiques couplés en permettant d'accéder à la température de surface des matériaux opaques seulement si leurs émissivités et leurs environnements radiatifs sont bien décrits.

Cette journée se propose de rassembler des acteurs de différentes communautés scientifiques pour échanger autour des problématiques scientifiques liées à la mesure de la température radiante par voie optique, au sol, aéroportée ou satellitaire, ainsi que sa modélisation.

# Organisation (1/2)

---

**9h30 : Accueil/café**

**10h00 - 10h45** : Laurent Ibos (CERTES), Jean-Pierre Monchau (THEMACS Ingénierie) -  
« *Problématique et solutions pour la cartographie thermique sans contact : exemples d'applications en environnement urbain* » Pages 5-39

**10h45 - 11h00** : Merveil Muanda Lutete (CEREMA/Ingerop) : « *Calcul de la température moyenne radiante dans les modèles microclimatiques : comparaison expérimentale avec les mesures de la rue de Sense-City* » Pages 40-54

**11h00 - 11h15** : Fabrice Rigolet (IUSTI) – « *Thermographie Inverse : accéder aux températures d'une scène thermique par comparaison entre images thermographiques réelles et leur modèle (rendu infrarouge)* » Pages 55-85

**11h15 - 12h00** : Laure Roupioz (ONERA) – « *Données d'intérêt et leurs caractères multi-échelles* » Pages 86-113

**12h00 - 12h15** : Auline Rodler (CEREMA), Martin Hendel (LIED) - *Présentation GDR micro-climat urbain* Pages 114-130

**12h15-14h00 : Repas**

---

**Présentations par thèmes / mini-conférences / autre**

# Organisation (2/2)

---

**14h00 - 14h45** : Jonathan Leon Tavares (VITO) and Yingjie Wang (CESBIO) – « *DART: a 3D radiative transfer model for urban studies* » Pages 131-152

**14h45 - 15h00** : Hervé Pabiou (CETHIL) – « *Mesure en extérieur du flux de chaleur : application aux échanges thermiques sur des panneaux photovoltaïques* » Pages 153-174

**15h00 - 15h15** : Pause café

**15h15 - 15h30** : Stéphane Lassue (LGCgE) - « *Mesures fluxmétriques, séparation des échanges thermiques superficiels convectifs et radiatifs à la surface d'une paroi de bâtiment* » Pages 175-193

**15h30 - 16h15** : Cyril Caliot (LMAP) - « *Résolution fine des transferts thermiques couplés par Monte-Carlo en géométrie urbaine incluant les flux solaires directs et diffus* » Pages 194-215

\*\*\*\*\*

**16h15 - 16h45** : Discussion et synthèse de la journée avec prospective basée sur les exposés précédents et ouvertures sur de nouvelles problématiques

---

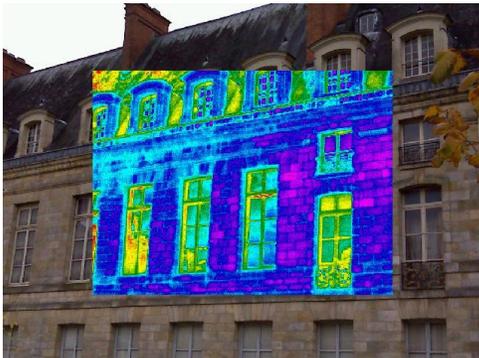
**Présentations par thèmes / mini-conférences / autre**

# Problématique et solutions pour la cartographie thermique sans contact : exemples d'applications en environnement urbain

**Jean-Pierre MONCHAU**  
[monchau@themacs.fr](mailto:monchau@themacs.fr)



**Laurent IBOS**  
[ibos@u-pec.fr](mailto:ibos@u-pec.fr)



Journée SFT « Température radiante en milieu urbain : Mesures et modélisation »  
7 décembre 2023, Paris

# Besoins en diagnostic « bâtiment »

## Diagnostic de bâtiments existants en vue d'une réhabilitation

- Parc de bâtiments « ancien » en France
- De nombreux bâtiments restent à rénover

## Diagnostic après travaux (neuf ou rénovation)

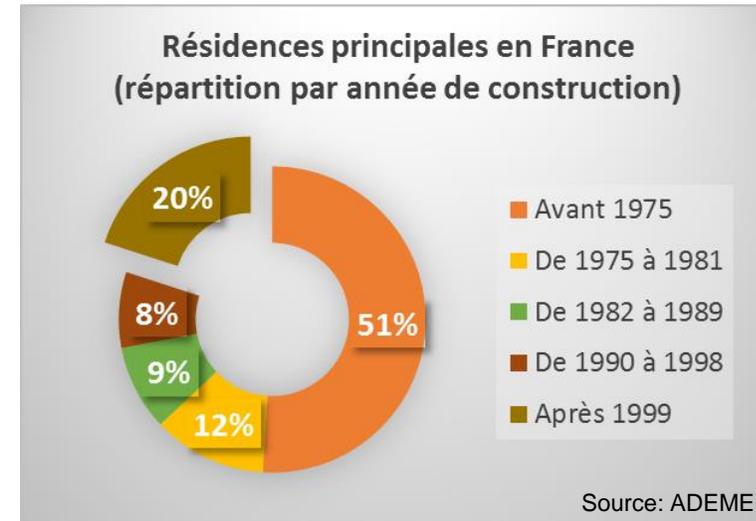
- Contrôle à réception des travaux
- Auto-contrôle sur chantier

## Monitoring long terme

- Quelles méthodes?
- Instrumentations?

## Existence de différences entre valeurs calculées et observées (« Performance Gap »)

- Non-respect des règles de mise en œuvre des matériaux sur chantier
- Infiltrations d'air
- Influence de l'humidité
- Dégradation des matériaux au cours du temps?
- Ponts thermiques pris en compte de manière simplifiée dans les calculs réglementaires



# Diagnostic sur site: problématique

Outil privilégié: Thermographie IR



Comment passer des observations qualitatives à un diagnostic quantitatif?

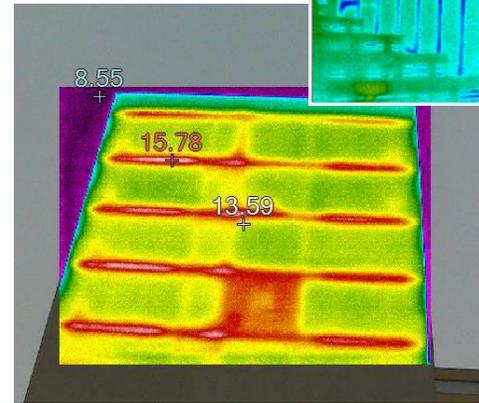
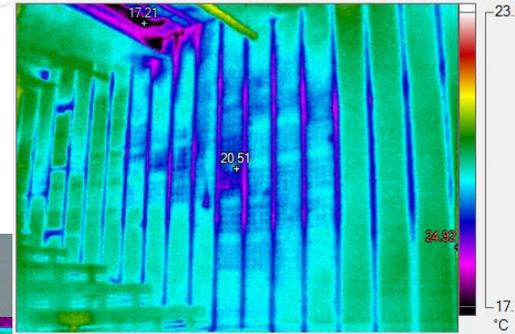


Correction de champs de température de surface

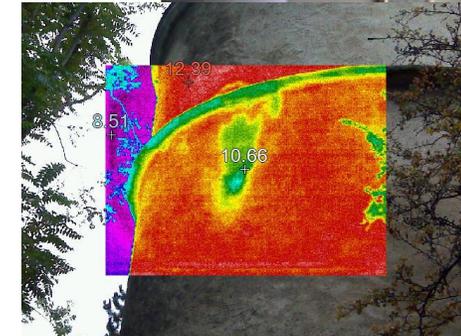


Evaluation des biais/incertitudes, limites d'utilisation

*Ponts thermiques*



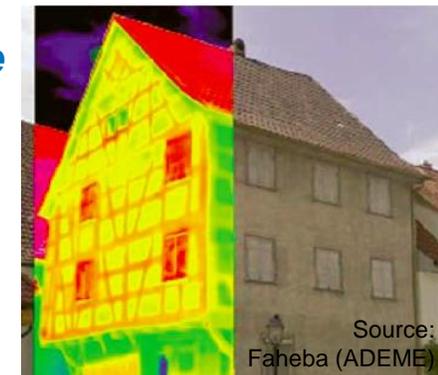
*Zones humides*



*Infiltrations*



*Patrimoine*



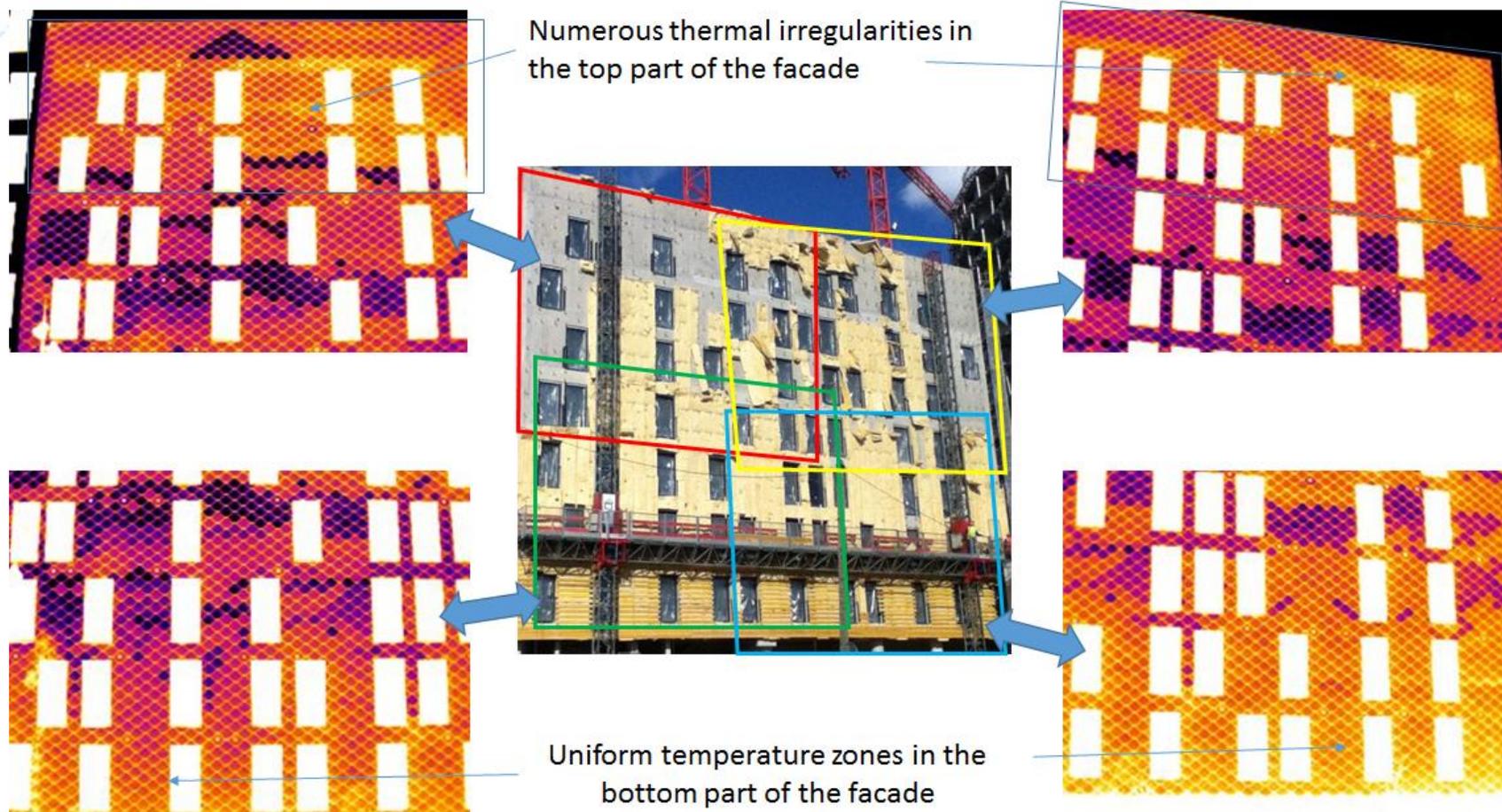
Source: Faheba (ADEME)

*Défauts de calfeutrement*



# Besoins en diagnostic / Illustration

Observation de l'effet de « mauvaises pratiques de chantier »  
*Bâtiment récent (2015) Paris XIII<sup>e</sup>*



# Plan de l'exposé

## Mesure de température de surface par thermographie

- Principe, paramètres d'influence
- Evaluation des erreurs

## Prise en compte de l'environnement radiatif / atmosphère

- Cas « simple »
- Utilisation facteurs de forme
- Exemple de monitoring long terme

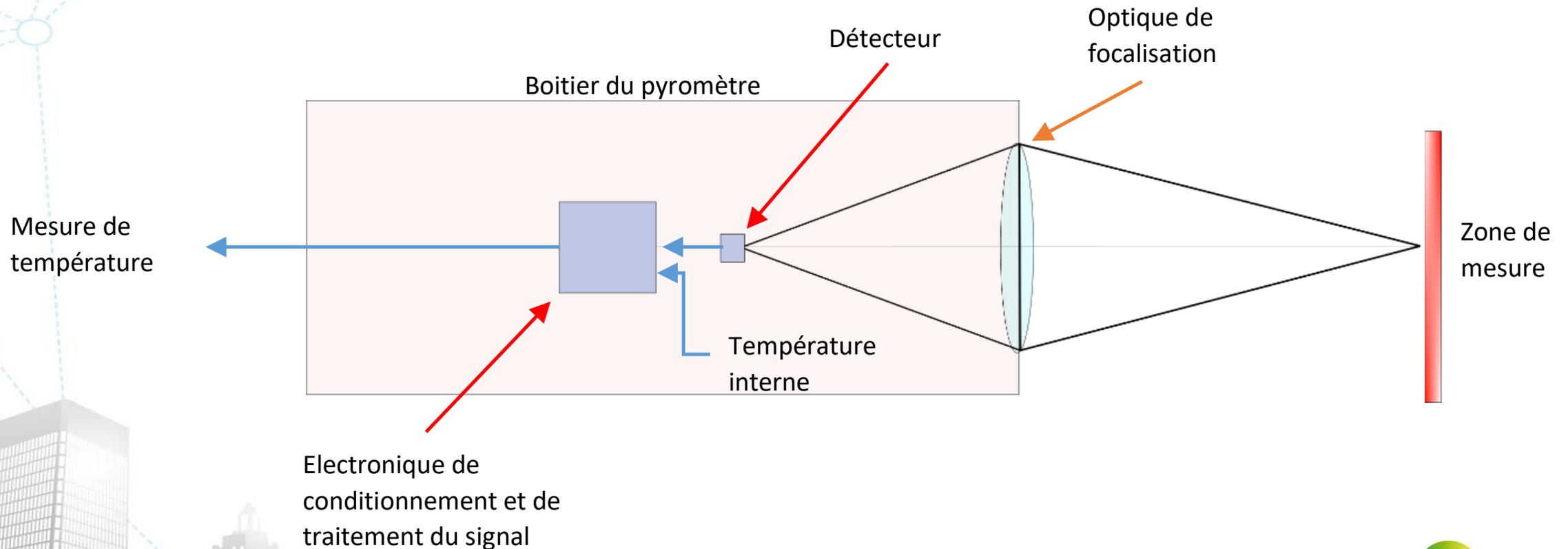
## Prise en compte de l'émissivité des surfaces

- Correction de mesures de température du sol
- Thermal mapping de chaussées (Thermocity)

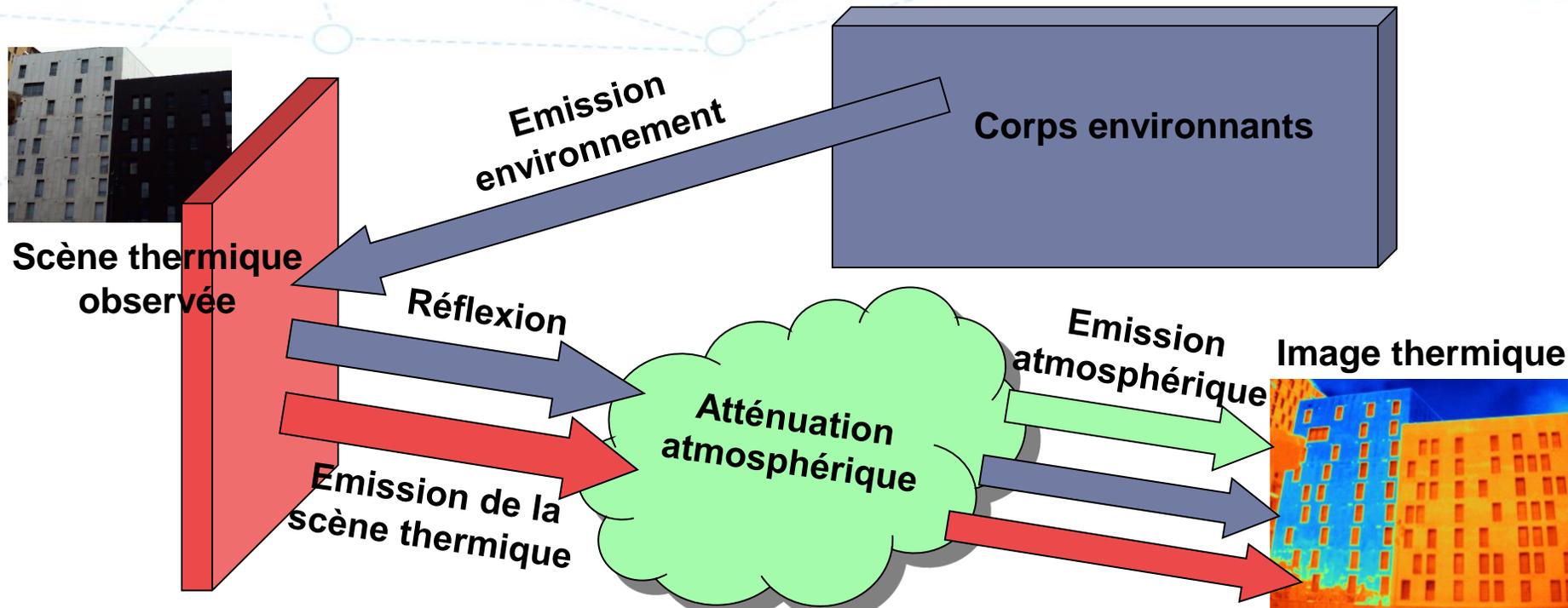
# Principe de mesure

Chaîne de mesure globale (caméras thermiques ou pyromètres):

- la réponse des différents éléments est prise en compte grâce à l'étalonnage: passage d'un signal « brut » à une « température apparente » (équivalent corps noir)
- attention aux possibles variations (salissures de l'optique, dérive en température de la caméra...)



# Principe de Mesure



Luminance  
mesurée

$$L = \tau \cdot \varepsilon \cdot L^\circ(T_o) + \tau \cdot (1 - \varepsilon) \cdot L^\circ(T_{env}) + (1 - \tau) \cdot L^\circ(T_{atm})$$

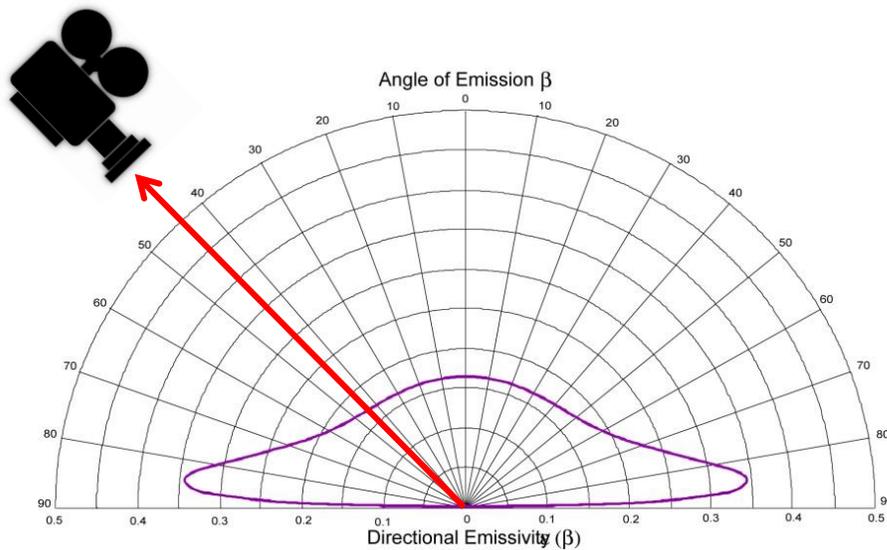
## Pré-requis pour la détermination de la température de surface

- Mesure de la température d'air  $T_{atm}$  et connaissance du facteur de transmission atmosphérique  $\tau$  (Important pour les longues distances, i.e. en conditions extérieures)
- Evaluer l'influence de l'environnement (température d'environnement radiatif  $T_{env}$ )
- Caractériser l'émissivité des surfaces (difficultés in-situ)

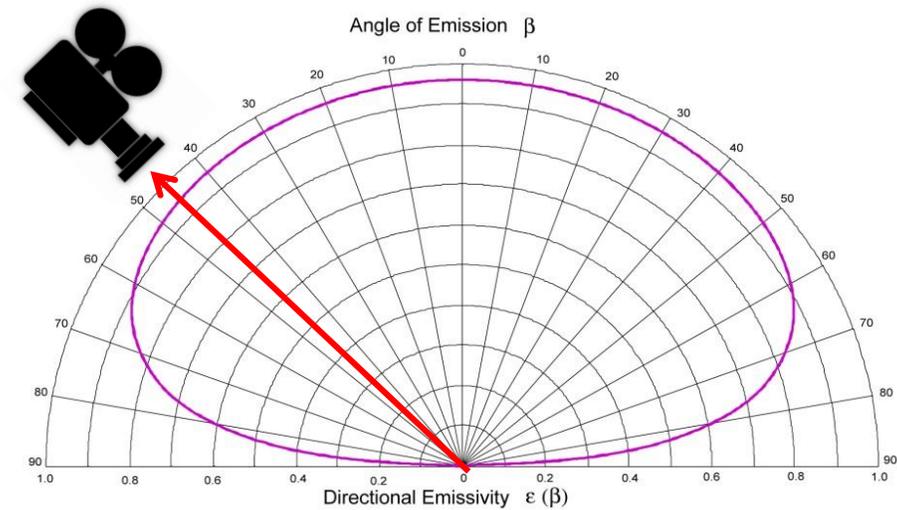
# Paramètres d'influence: hypothèses

Différentes hypothèses simplificatrices sont généralement effectuées:

- *Les surfaces observées sont opaques*
- *Les surfaces observées sont diffuses => limitations discutées en partie 2*
- *L'émissivité des surfaces est indépendante de la longueur d'onde dans la bande spectrale de la caméra (corps gris) => point discuté en partie 3*
- *L'angle d'observation n'influe pas sur l'émissivité*



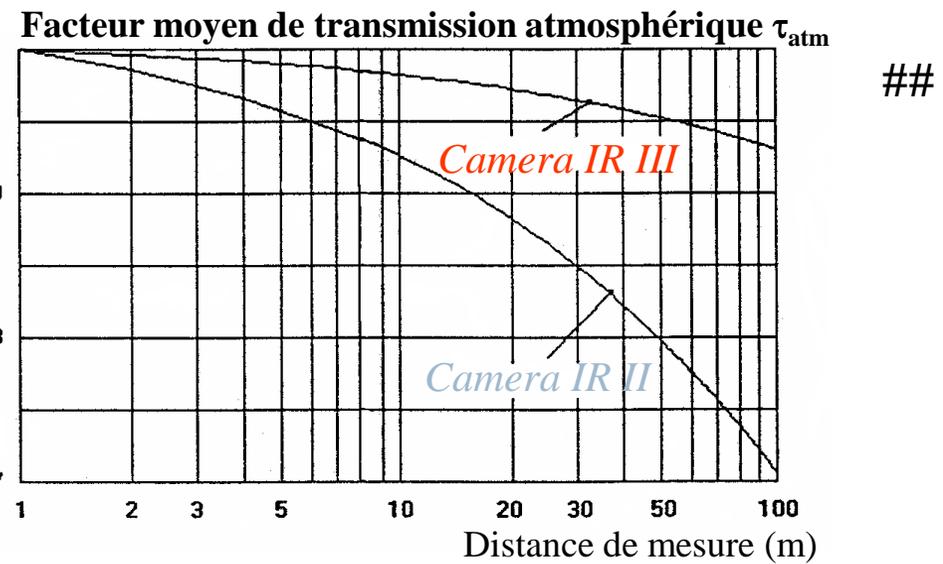
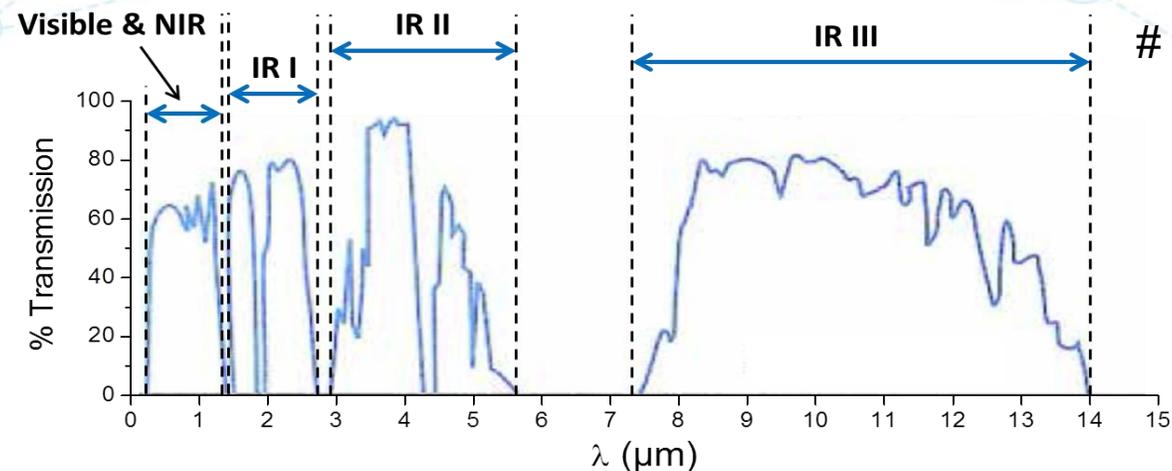
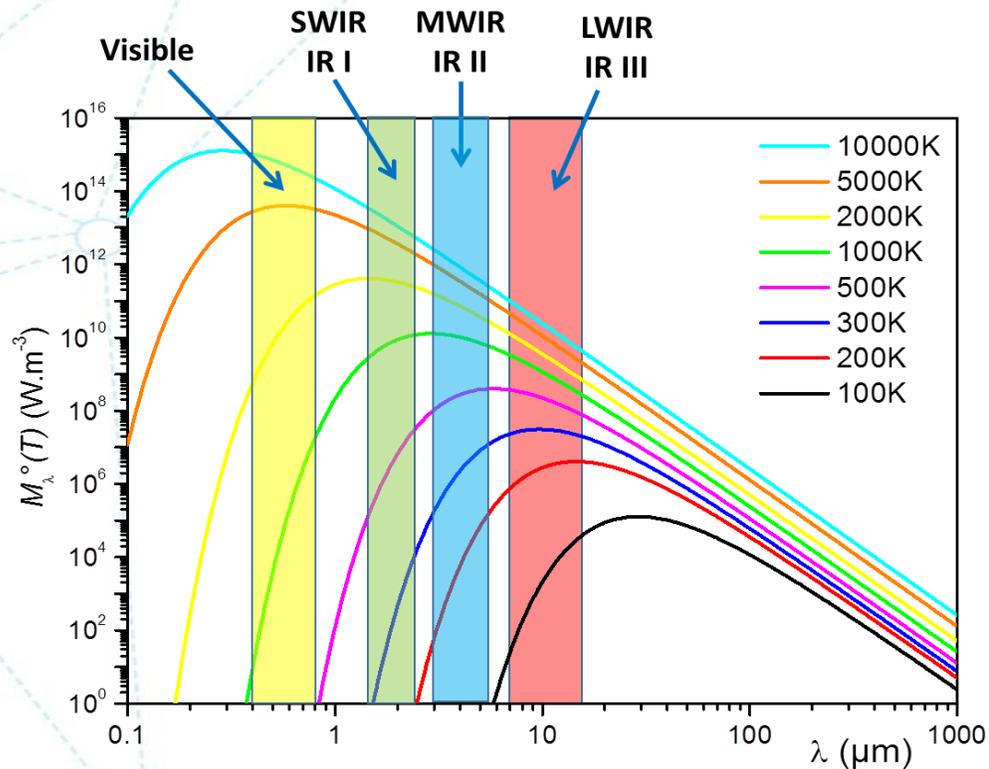
*Métal d'indice de réfraction:  $n = 5.7 + 9.7i$*



*Diélectrique d'indice de réfraction:  $n = 1.5$*

# Paramètres d'influence: hypothèses

## Contribution atmosphérique:



Emission d'un corps noir (*Loi de Planck*) et bandes spectrales:

$$M_{\lambda}^0(T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

# Yves COJAN, Propagation du rayonnement dans l'atmosphère, Techniques de l'ingénieur, Réf.: E4030 V2, 1995  
 ## D. PAJANI, Mesure par thermographie infrarouge, Ed. ADD, 1989

# Evaluation des erreurs sur la température de surface

Evaluation pour un cas courant:

$$L_{mesure}(T) = \left( \tau \cdot \varepsilon \cdot \sigma' \cdot T^4 + \tau \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \sigma' \cdot T_{env}^4 + (1 - \tau) \cdot \sigma' \cdot T_{atm}^4 \right) \cdot \frac{1}{\pi}$$

$$T = \left( \frac{L_{mesure}(T) \cdot \pi}{\tau \cdot \varepsilon \cdot \sigma'} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot T_{env}^4 - \frac{1 - \tau}{\tau \cdot \varepsilon} \cdot T_{atm}^4 \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$dT = \frac{T}{4} \cdot \frac{d\varepsilon}{\varepsilon}$$

$$T=300K$$

$$dT = \left( \frac{T_{env}}{T} \right)^3 \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \cdot dT_{env}$$

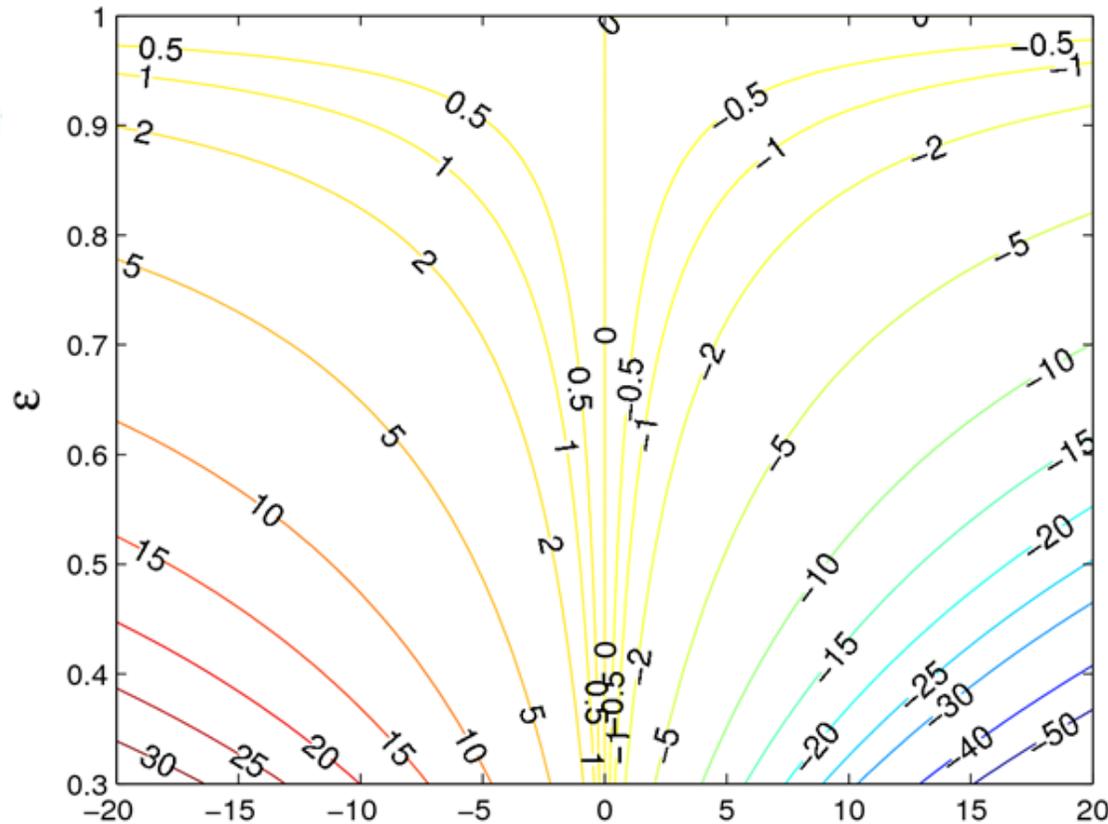
$$\varepsilon=0.91$$

$$dT = -\frac{1}{4} \cdot T \cdot \frac{d\tau}{\tau}$$

$$T=300K$$

Source de l'erreur	erreur commise sur la température
1% d'erreur sur l'émissivité	0.75 K
erreur de 10 K sur la température d'environnement	1 K
Négligence de la transmission de 10 m d'atmosphère dans la bande III	1.5 K
Négligence de la transmission de 10 m d'atmosphère dans la bande 3 à 5 $\mu\text{m}$	5.6 K

# Evaluation des erreurs sur la température de surface

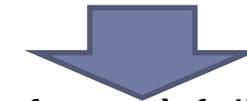


$$T_{\text{env}} - T_{\text{app}} (\text{°C})$$

*Différence entre température apparente et température vraie (en °C)*

*Cas d'une mesure de surface autour de 20°C*

Corrections modérées pour les émissivités élevées (béton, minéraux, peintures, plastiques, céramiques...)



Pour les surfaces à faible émissivité, prédominance de la contribution de l'environnement radiatif.



Une bonne exactitude sur la caractérisation de l'environnement radiatif est requise pour minimiser les biais sur la température corrigée.

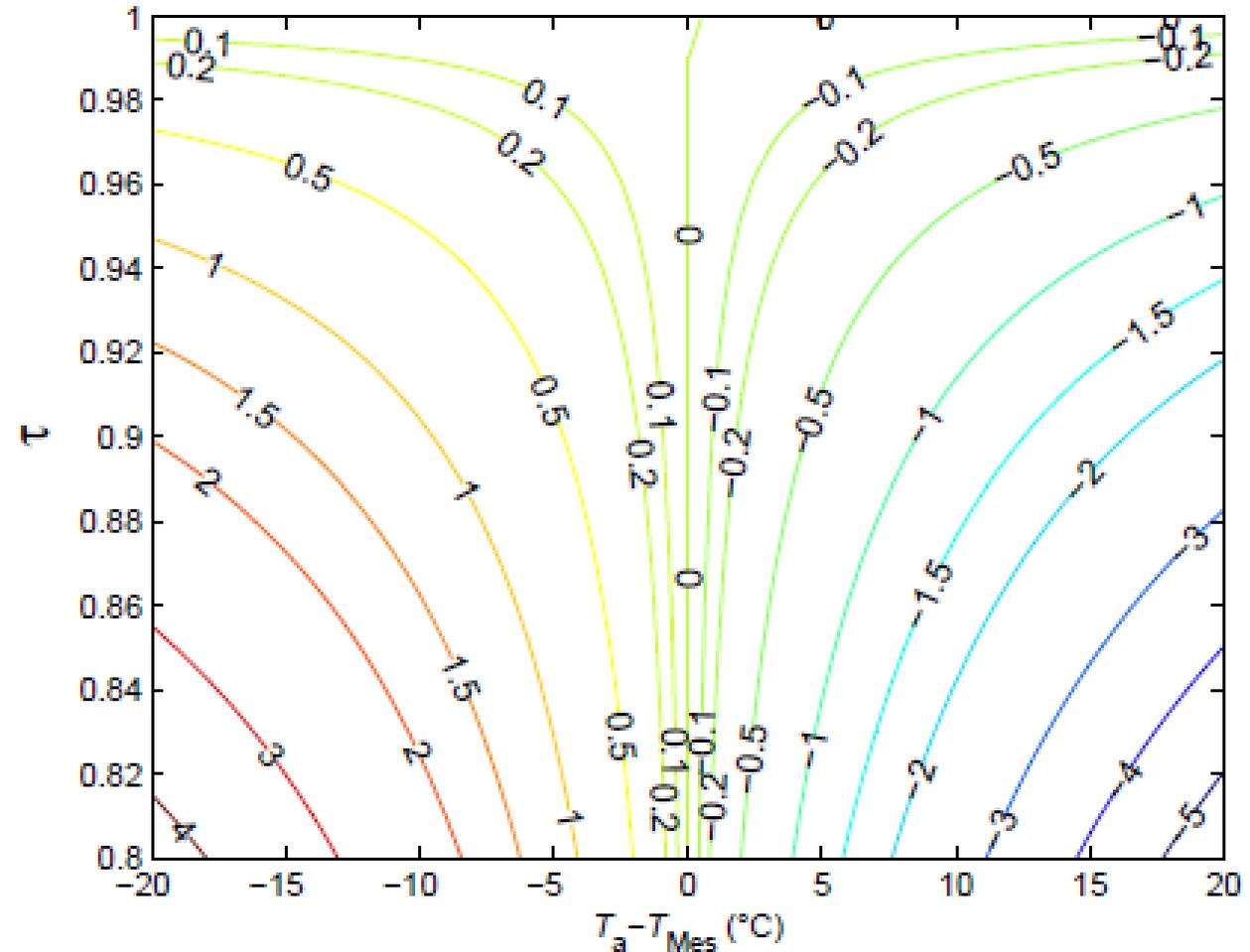
# Evaluation des erreurs sur la température de surface

Influence de l'atmosphère:

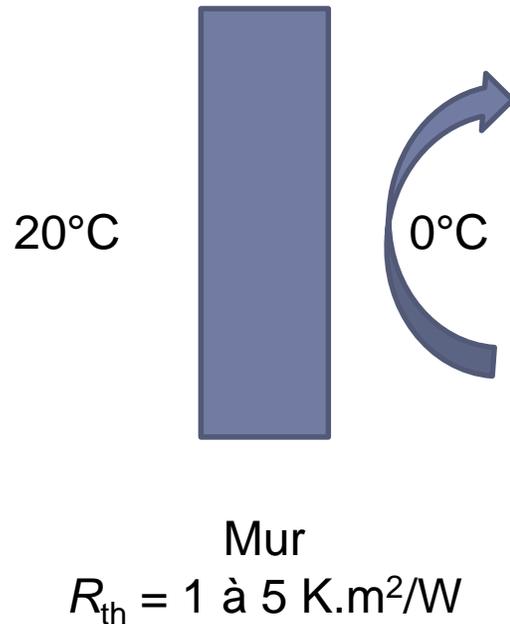
- Facteur de transmission atmosphérique
- Température d'air

*Différence entre température apparente  
et température vraie (en °C)*

*Cas d'une mesure de surface autour de 20°C*



# Importance de la correction de température de surface pour le diagnostic bâtiment



Convection:  $h_c = 4 \cdot (1 + v + \epsilon \cdot \sigma \cdot T^3)$   
(selon la norme ISO-6946 pour la convection naturelle)

A l'extérieur  $h_c = 20 \text{ W/m}^2/\text{K}$ .

Entre un mur bien isolé et un mur mal isolé la différence de température de surface extérieure varie entre 0,2 et 1°C par rapport à la température de l'ambiance extérieure.

# Plan de l'exposé

## Mesure de température de surface par thermographie

- Principe, paramètres d'influence
- Evaluation des erreurs

## Prise en compte de l'environnement radiatif / atmosphère

- Cas « simple »
- Utilisation facteurs de forme
- Exemple de monitoring long terme

## Prise en compte de l'émissivité des surfaces

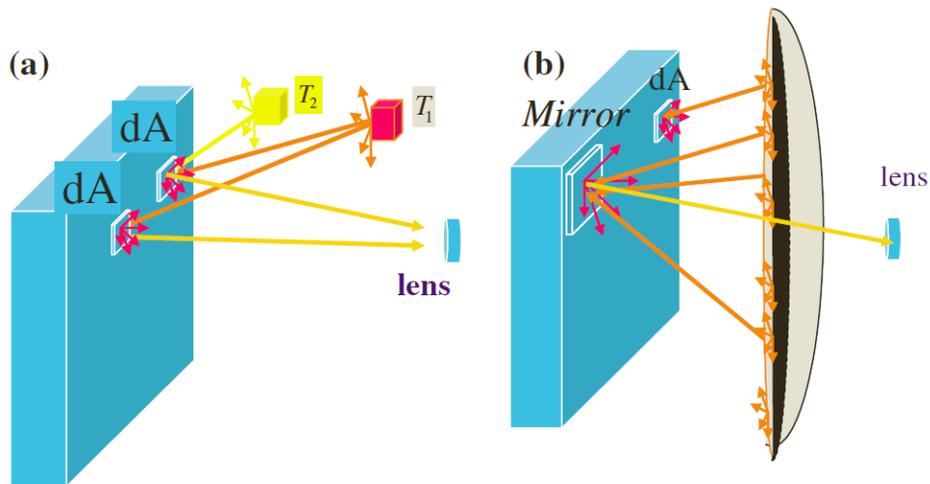
- Correction de mesures de température du sol
- Thermal mapping de chaussées (Thermocity)

# Exemple « simple » de correction

Essais sur une façade d'un bâtiment de l'IUT de Créteil-Vitry: mesures sur surfaces hautement émissives ( $\varepsilon \sim 0.9$ )

Conditions nocturnes avec ciel clair

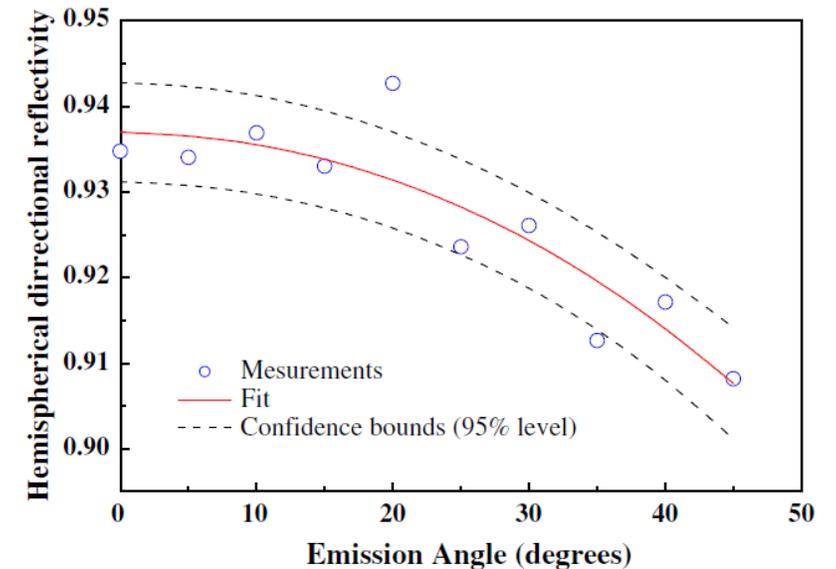
Environnement radiatif modélisé comme un corps noir homogène à une température  $T_{env}$  estimée à l'aide d'un miroir diffusant placé dans la scène thermique



Remarque: Méthode également décrite dans la norme ASTM E1862-97

S. Datcu et al., *Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography*, *Infrared Physics & Technology*, 2005

Prise en compte de l'émission propre du miroir: nécessité de caractériser son émissivité en laboratoire et de mesurer sa température sur site à l'aide d'une sonde de température



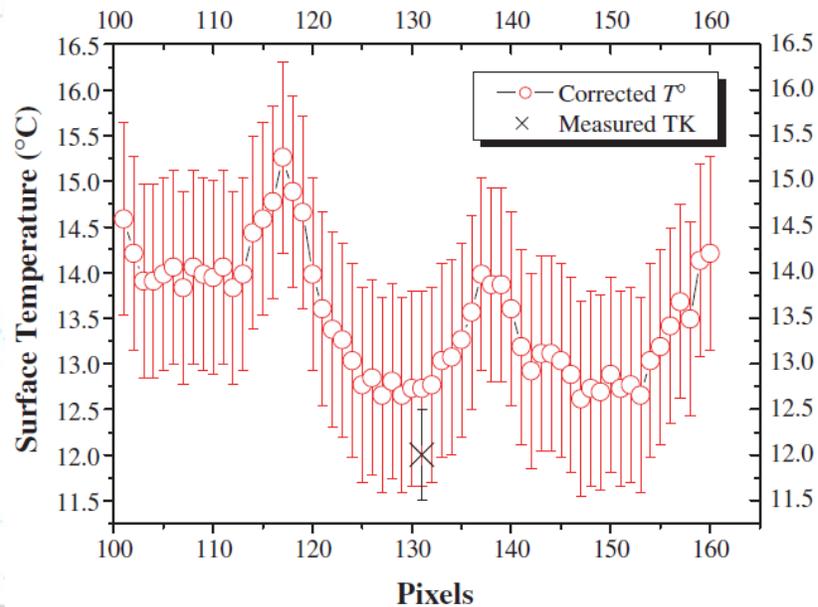
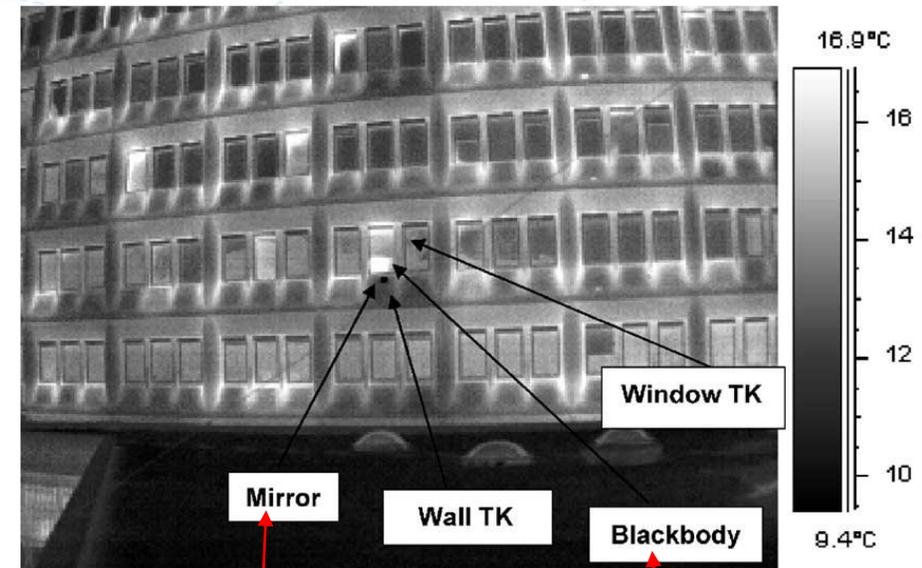
$$\begin{aligned} \varphi_d^\circ(T)|_M &= F_{dA,L}|_{dA \in M} \cdot \varphi_{dA}^\circ(T)|_{dA \in M} \\ &= \varepsilon'_M \cdot F_{dA,L} \cdot M_{dA,M}^\circ(T_o) + \rho_M^{\text{ref}} \\ &\quad \cdot F_{dA,L} \cdot M_{dA,M}^\circ(T_a) \end{aligned}$$

# Exemple « simple » de correction

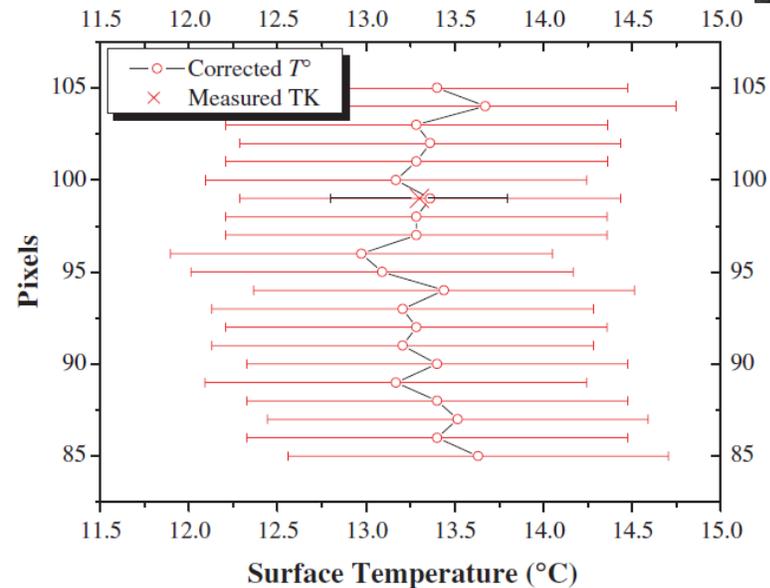
Correction de température et évaluation de l'incertitude de mesure

Validation par:

- Comparaison à des mesures par contact
- Mesure sur un corps noir plan placé dans la scène thermique



**Paroi béton**



**Fenêtre**

Estimation de la contribution de l'environnement radiatif

Vérification sur corps noir

# Utilisation de facteurs de forme pour la prise en compte de l'environnement radiatif

Essais sur une façade sud d'un bâtiment d'une école de la commune de Noisiel (77);  
bâtiment datant des années 70

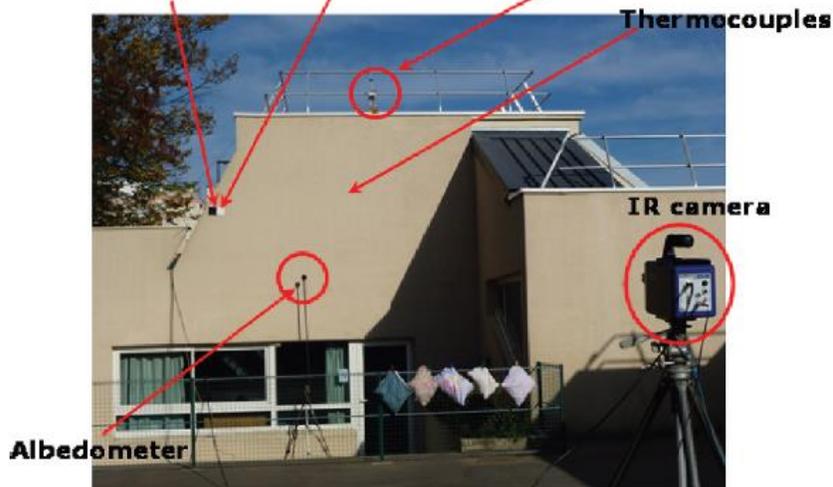
Projet DPE-IITI (financement ADEME)

Mirror Reference point

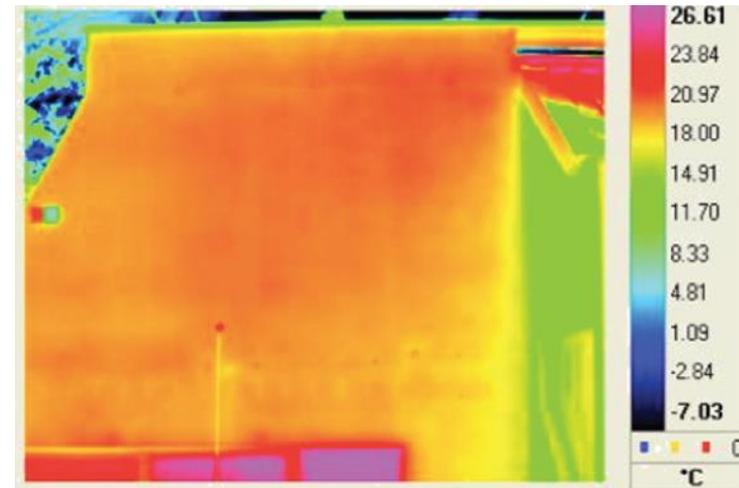


**Mesures en intérieur**

Reference point Mirror Weather station Thermocouples



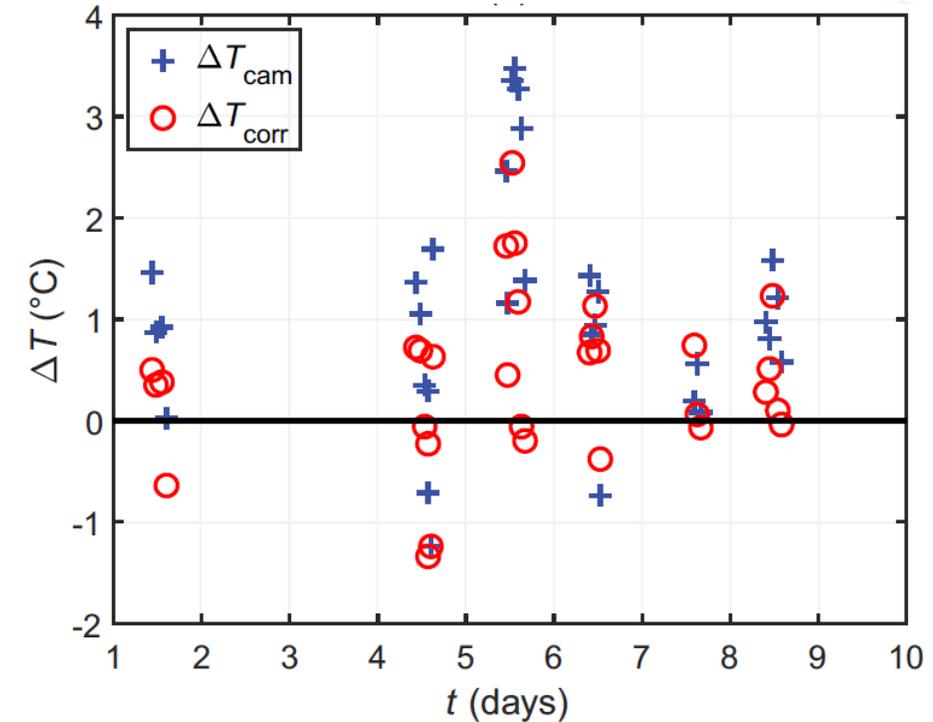
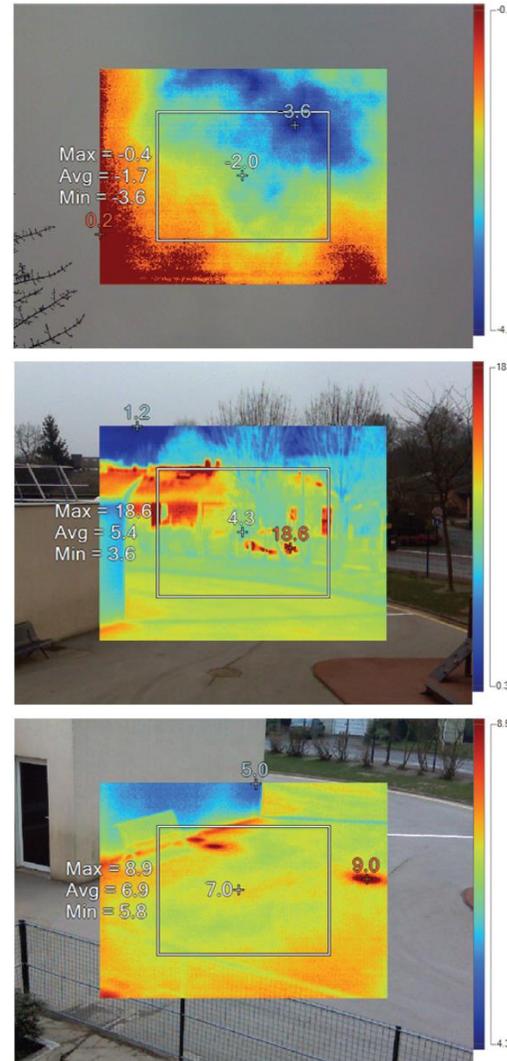
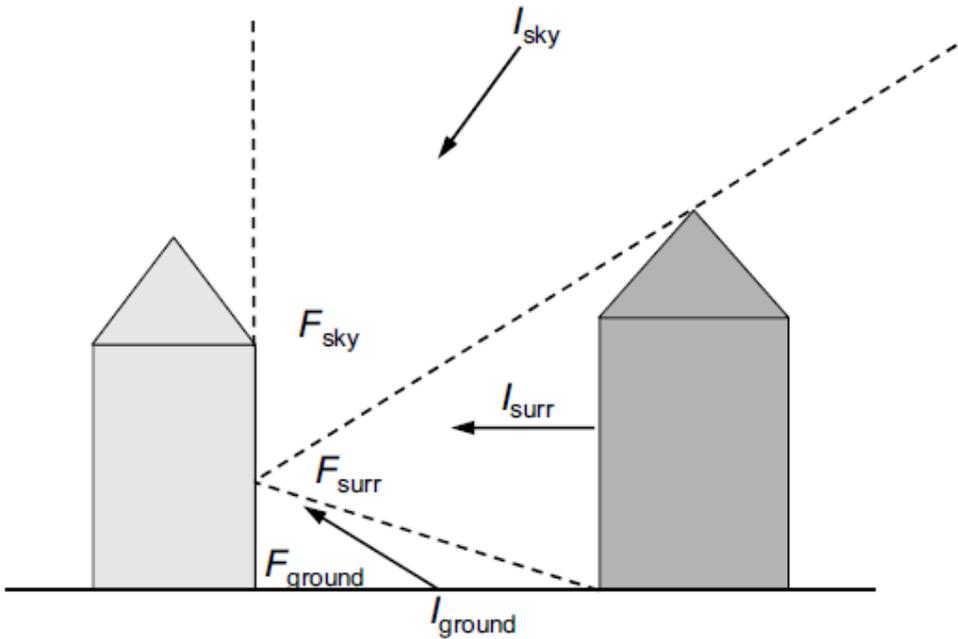
**Mesures en extérieur**



**Exemple d'image thermique de la façade côté extérieur**

# Utilisation de facteurs de forme pour la prise en compte de l'environnement radiatif

$$I_{\text{env}} = F_{\text{sky}} I_{\text{sky}} + F_{\text{ground}} I_{\text{ground}} + F_{\text{surr}} I_{\text{surr}}$$



**Prise en compte des hétérogénéités de l'environnement**

**Ecarts entre température de surface caméra/corrigée et thermocouple**

# Prise en compte de l'environnement radiatif et de la transmission de l'atmosphère

Essais sur une façade de la plateforme PANISSE  
(site d'observation de l'OSU Efluve)

Bâtiment en béton cellulaire isolé par l'extérieur lors d'une rénovation;  
surface extérieure = enduit de façade: surface diffusante à haute émissivité

Observation d'une façade Ouest pendant plusieurs campagnes de mesure  
(en conditions hivernales)

## Méthode de correction

Prise en compte de la contribution de  
l'environnement radiative par miroir diffusant

Prise en compte de l'atténuation atmosphérique  
par et de la transmission du hublot IR grâce à  
une surface noire de temperature connue  
placée sur la façade



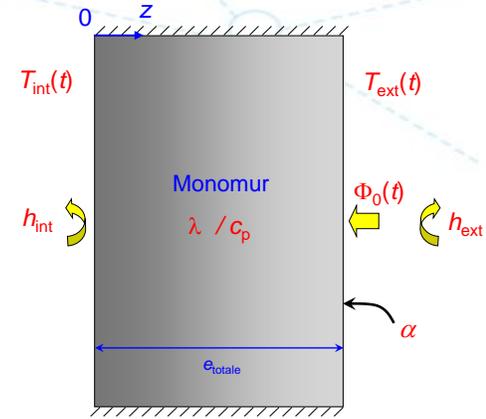
Exemple d'image thermique



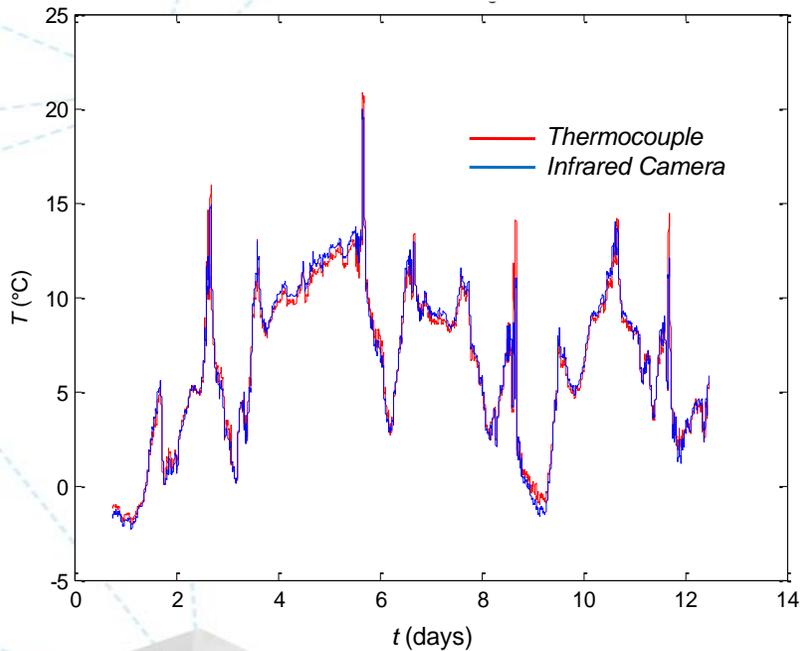
Instrumentation

# Prise en compte de l'environnement radiatif et de la transmission de l'atmosphère

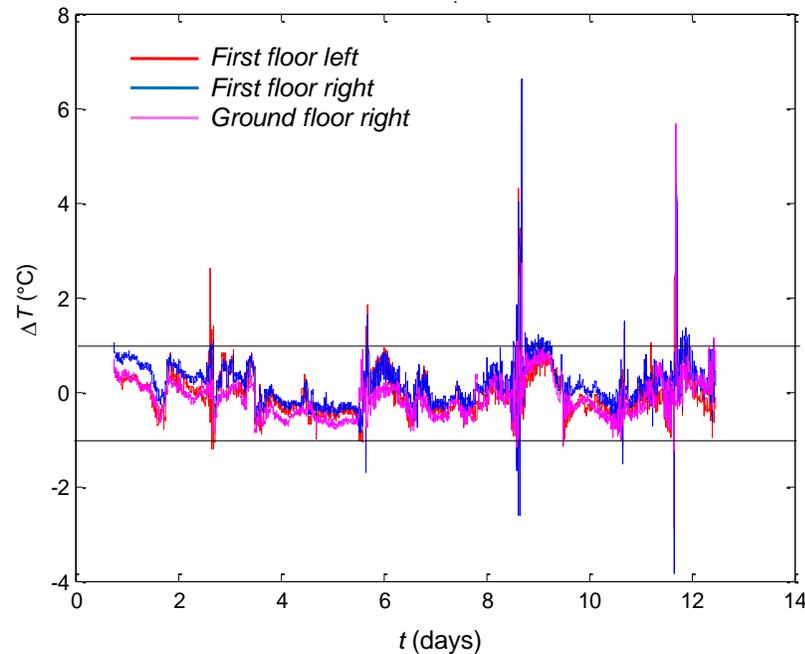
Exemple de correction de température de surface sur 12 jours consécutifs / comparaison à des mesure par sonde de température insérée dans l'enduit de façade



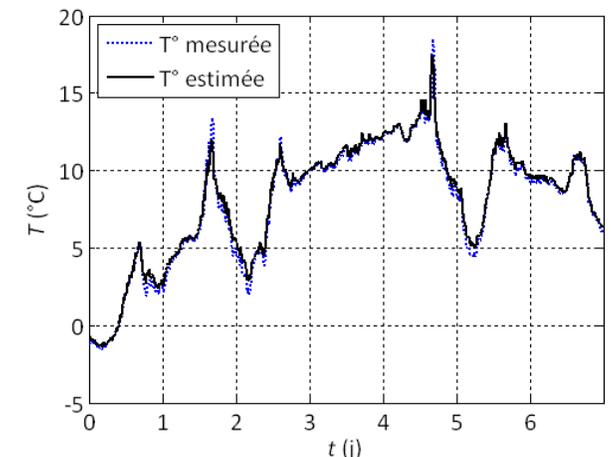
Utilisation des données corrigées pour estimation de résistance thermique



Température 1<sup>er</sup> étage (zone de gauche)



Ecarts température corrigée – mesure par sonde en différents points

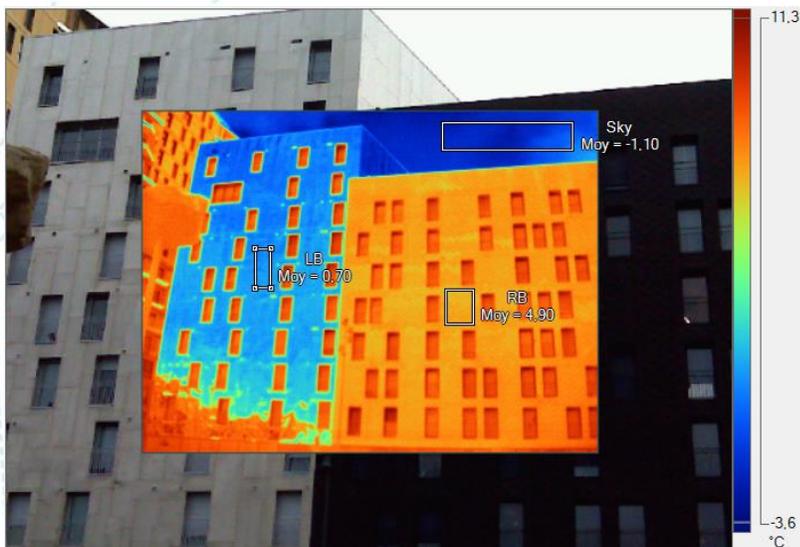


$$R_{M,estimée} = 4.5 \pm 0.7 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \text{ (3.8)}$$

Comparaison mesure modèle après identification de la résistance thermique

# Exemple de limite des méthodes « simplifiées »

## Problématique de la correction de champs de température: difficultés en présence de surfaces spéculaires et/ou à faible émissivité



### Conditions:

- Winter conditions before sunrise (no influence of solar radiation)
- Mean radiant temperature computed from thermal images of the surroundings: +2°C (mean value)
- Sky temperature: -1.1°C
- Air temperature: +1°C

### Left building:

- Low emissivity specular surface (~0.2)
- Apparent temperature on ROI considered: +0.7°C

### Right building:

- High emissivity diffuse surface (~0.9)
- Apparent temperature on ROI considered: +4.9°C

### Computed corrected surface temperature values as a function of the choice of $T_{env}$ and $\varepsilon$ values

Influence of $T_{env}$ choice for assumed emissivity value			Left building ( $T_{env} = 2^\circ\text{C}$ )		Right building ( $T_{env} = 2^\circ\text{C}$ )	
$T_{env}$	Left building $T_0$ ( $\varepsilon=0.2$ )	Right building $T_0$ ( $\varepsilon=0.9$ )	$\varepsilon$	$T_0$	$\varepsilon$	$T_0$
-1.1 °C	+11.44 °C	+5.67 °C	0.1	-1.69 °C	0.8	+5.88 °C
+2 °C	-0.35 °C	+5.35 °C	0.2	-0.35 °C	0.9	+5.35 °C
+5 °C	-13.71 °C	+5.39 °C	0.3	+0.09 °C	1.0	+4.92 °C

- Great importance of  $T_{env}$  value for the lowest emissive surface.
- How to reach such accuracy on  $T_{env}$  value due to metrological uncertainties?
- Importance of the modelling of environment radiation for low emissivity and/or specular surfaces.

# Plan de l'exposé

## Mesure de température de surface par thermographie

- Principe, paramètres d'influence
- Evaluation des erreurs

## Prise en compte de l'environnement radiatif / atmosphère

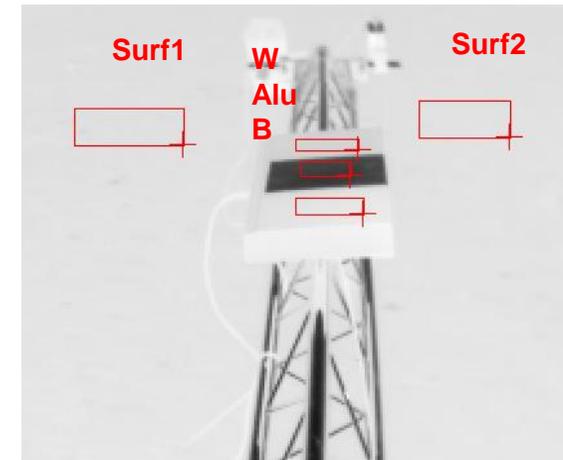
- Cas « simple »
- Utilisation facteurs de forme
- Exemple de monitoring long terme

## Prise en compte de l'émissivité des surfaces

- Correction de mesures de température du sol
- Thermal mapping de chaussées (Thermocity)

# Mesures de température de surface terrestre

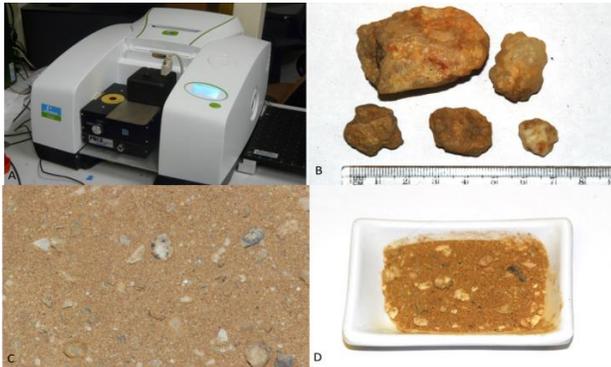
## *Land surface temperature measurement in Namibian desert (ESA project)*



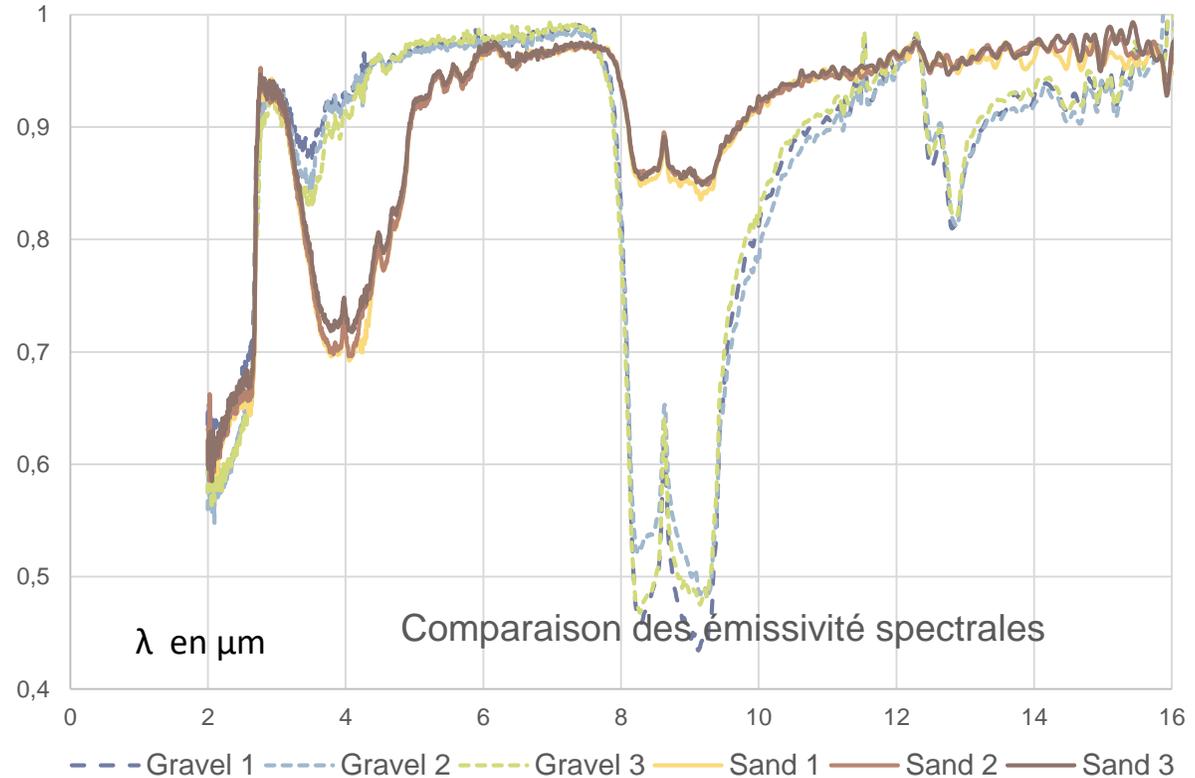
# Mesures de température de surface terrestre



mesure sur site en Namibie

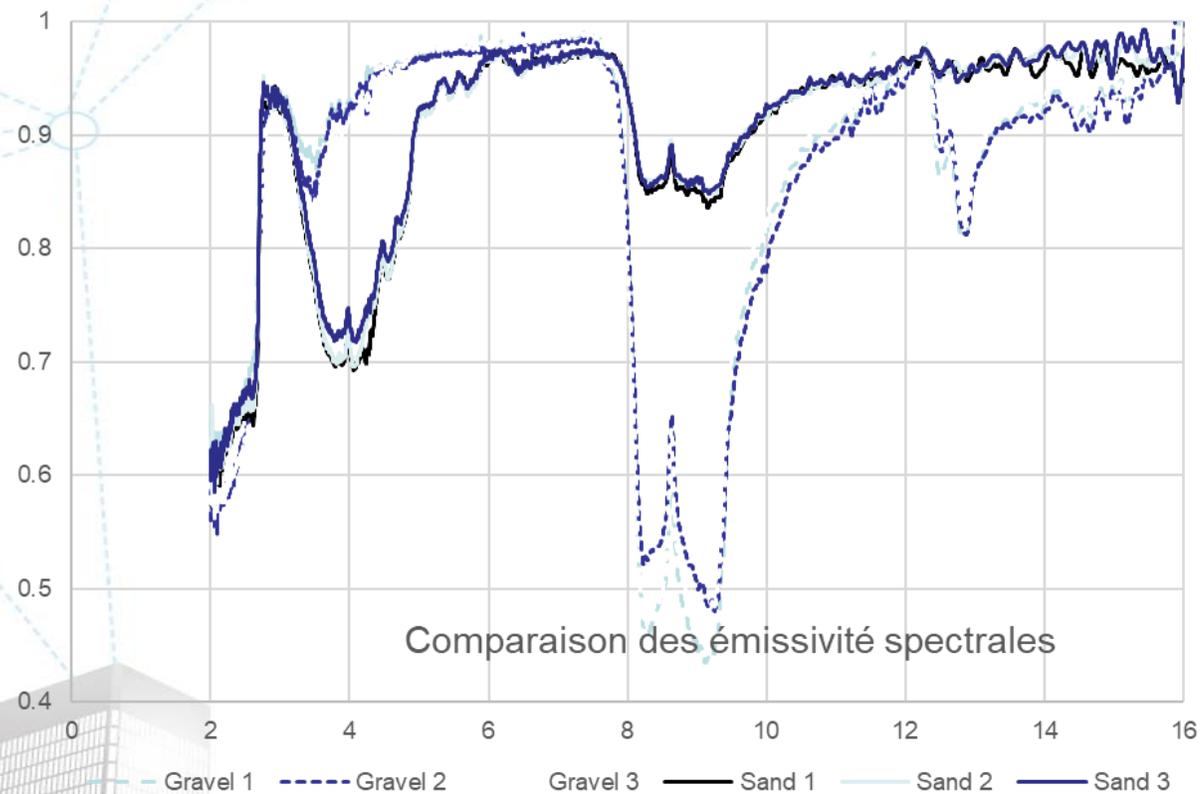


Echantillon de gravier et de sable, spectromètre pour la mesure de réflectance



Emissivité spectrales de divers échantillons de graviers prélevés en Namibie

# Mesures de température de surface terrestre



	Emissivity for spectral band			
Material	2-17 $\mu\text{m}$	8-14 $\mu\text{m}$	8-12 $\mu\text{m}$	9.6-11.5 $\mu\text{m}$
Sand	0.937	0.925	0.909	0.937
Gravel	0.873	0.806	0.758	0.894

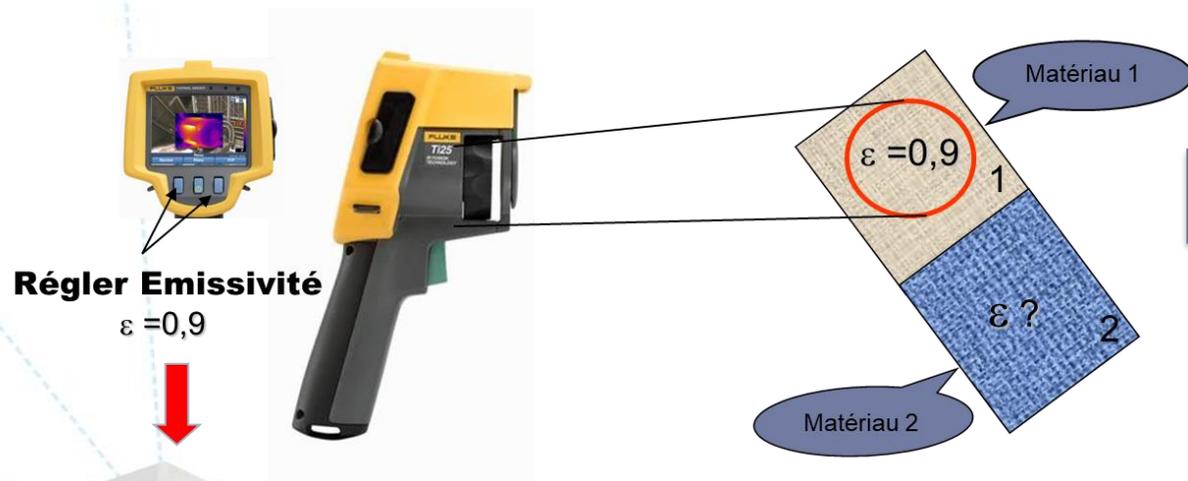
# Mesure d'émissivité sur site / Méthode normalisée 1

Norme ASTM E1933-99A

Appliquer sur le matériau visé, à une distance proche de la scène, une peinture hautement émissive ou une bandelette adhésive d'émissivité connue.

Etape 1

**Hypothèse** : Les deux matériaux sont à la même température,  $T_{ref}$



Calcul de la température de référence  $T_{ref}$ ,  
température moyenne sur la zone d'intérêt

Etape 2



Ajuster l'émissivité jusqu'à ce que la température affichée soit identique à celle trouvée précédemment, on lit alors la valeur de l'émissivité

# Mesure d'émissivité sur site / Méthode normalisée 2

Exemple « simple » de correction issus de la norme NF-EN-ISO 6781

## ***Méthode avec un capteur de température de contact :***

- a) placer la caméra thermique à l'emplacement et à la distance souhaités de la cible à mesurer
- b) mesurer et compenser la température apparente réfléchie de la cible (température d'environnement radiatif)
- c) viser la zone d'intérêt
- d) utiliser un thermomètre à contact pour mesurer la température de cette zone
- e) sans déplacer la caméra, régler le contrôle d'émissivité jusqu'à ce que la température indiquée soit la même que la température de contact. La valeur d'émissivité indiquée est l'émissivité de cette surface cible, mesurée avec cette caméra
- f) pour une plus grande précision, répéter les procédures b) à e) au moins trois fois et faire la moyenne de l'émissivité

# Mesure d'émissivité / albédo sur site

Mesures thermiques environnementales

Albédo : facteur de réflexion solaire

Emissivité thermique: rayonnement thermique des surfaces

SRI : Solar Reflectance Index selon la norme ASTM E1980

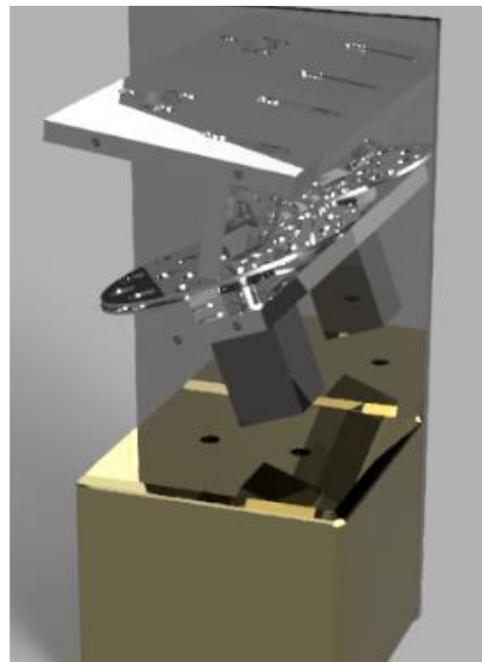
## Emissomètre EM4



## Emissomètre EM5



## Albédomètre AL-01



Mesure en large bande et 8-14 $\mu$ m, large surface de mesure adaptée aux matériaux de construction

Mesure par sphère intégrante en large bande, 3-5 $\mu$ m et 8-14 $\mu$ m Possibilité de faire varier la température du corps noir

Albédomètre portable  
Mesure de reflectance multispectrale en accord avec les normes en vigueur

# Thermal Mapping de chaussées

## Correction of IR images:

- Environment is variable (spatially and temporal) and heterogeneous (sky, trees, buildings, other infrastructures...)
- Automatic correction of measurements with a blackbody in the camera FOV



Measurement in progress during the winter 2016-2017



The experimental dispositive on the roof of a car

Radiative Environnement



Example of thermal image

Reference blackbodies

Pavement

ThermoCity

Sample of IR image (ThermoCity Device)

Themacs Ingénierie

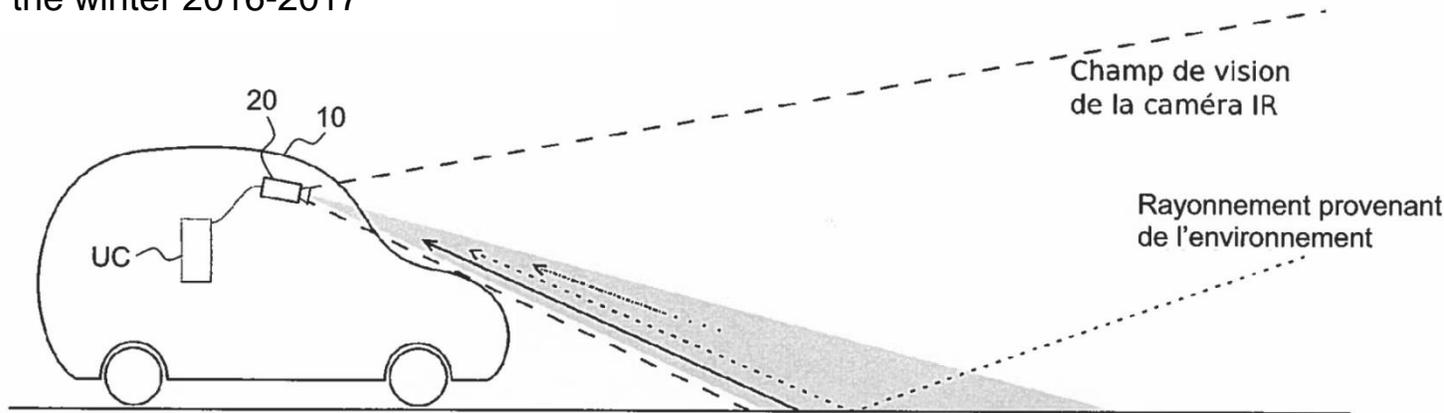


Sensors (T, P, HR, U<sub>w</sub>)

Cameras

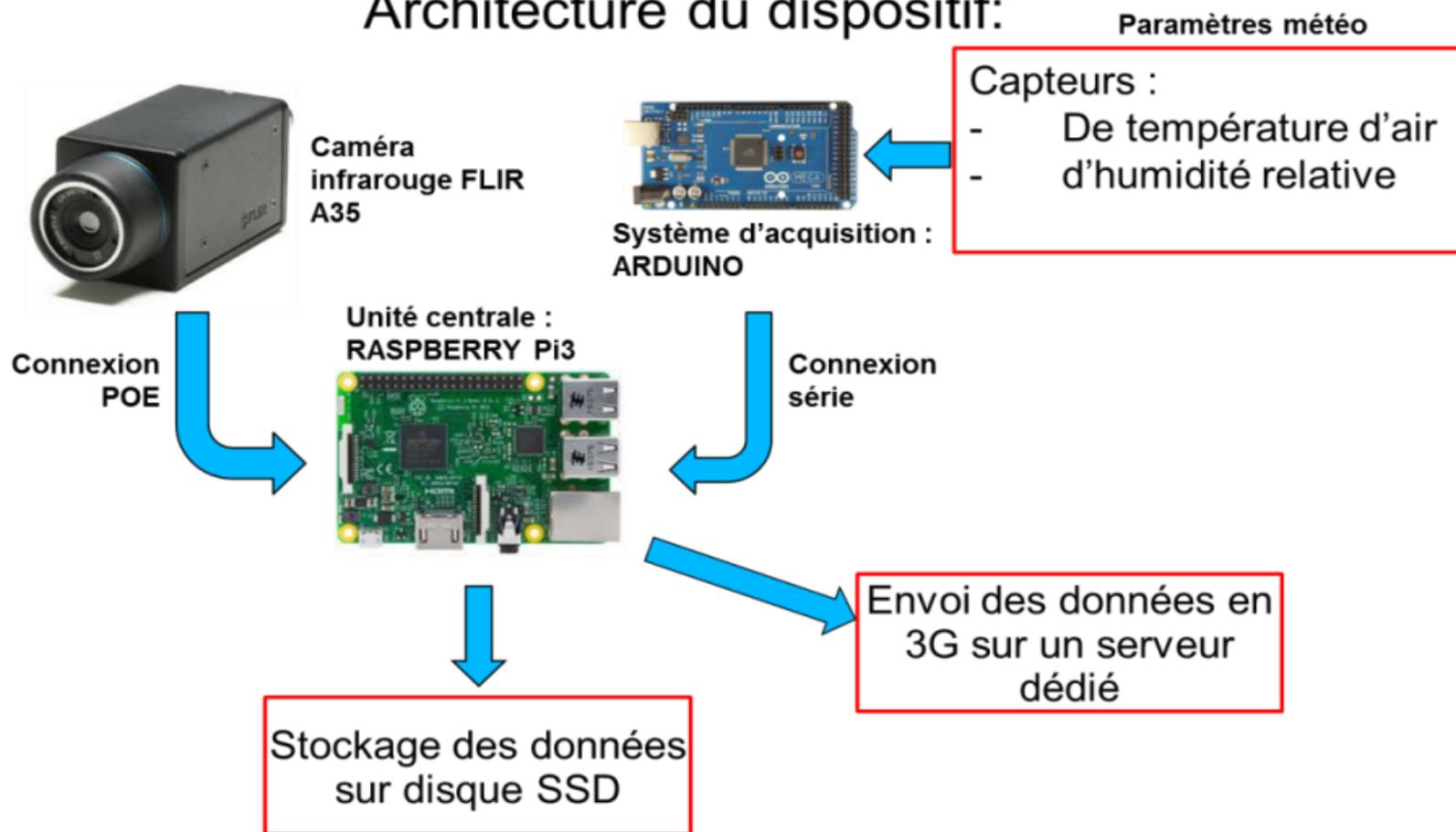
Radiometer ThermoRoute II (CEREMA)

Cerema

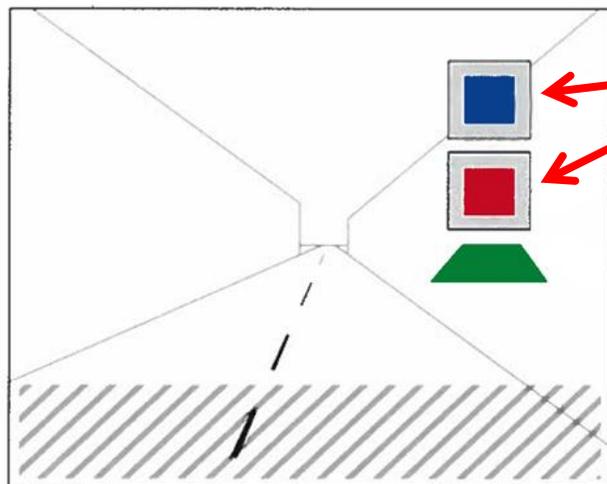


# Thermal Mapping de chaussées

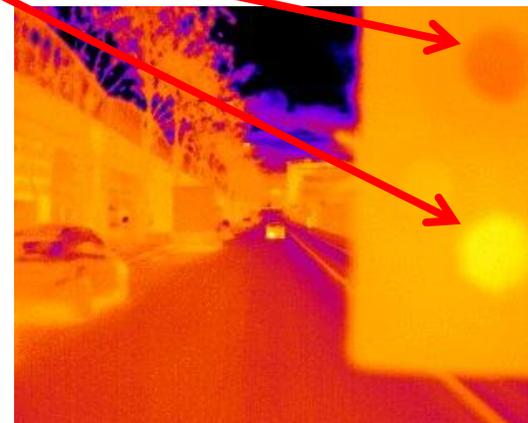
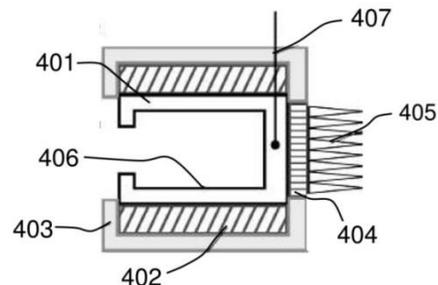
## Architecture du dispositif:



# Thermal Mapping de chaussées



Deux corps noirs  
de référence



402 *isolation thermique*  
404 *module à effet Peltier*  
405 *radiateur*  
406 *cavité peinte avec Nextel*  
407 *Pt100*

# Thermal Mapping de chaussées

## **THERMOCITY®:** **Thermal mapping for** **winter risk (city of Paris)**

Cartographie de la Ville de Paris :

3 nuits de mesures par temps clair dont 2  
présentées ici:

Du 19 au 20 janvier 2017

Du 13 au 14 février 2017

Mesure avec 2 véhicule : Thermoroute® et  
Thermocity®

Couplage avec de la thermographie aérienne  
effectué par le LNE

Agrégation de l'ensemble des mesures



# Thermal Mapping de chaussées

Deux  
corps  
noirs de  
référence

Moins de mapping / plus de précision !

Pyromètre  
optique visant  
à travers la  
plaque

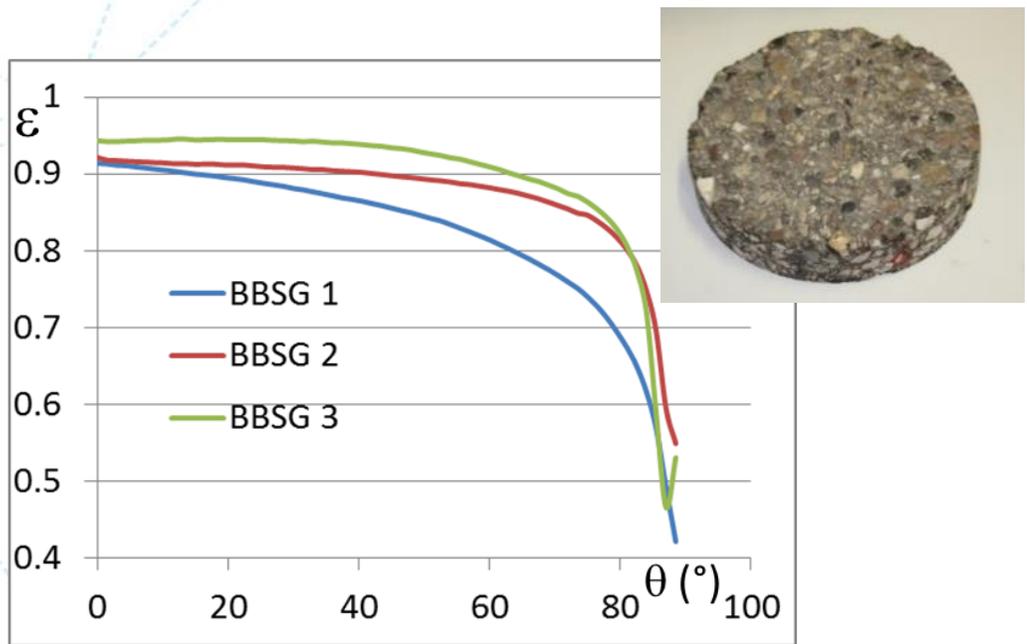
Plaque  
aluminium  
réfléchissante  
( $\epsilon < 0,1$ )



# Thermal Mapping de chaussées

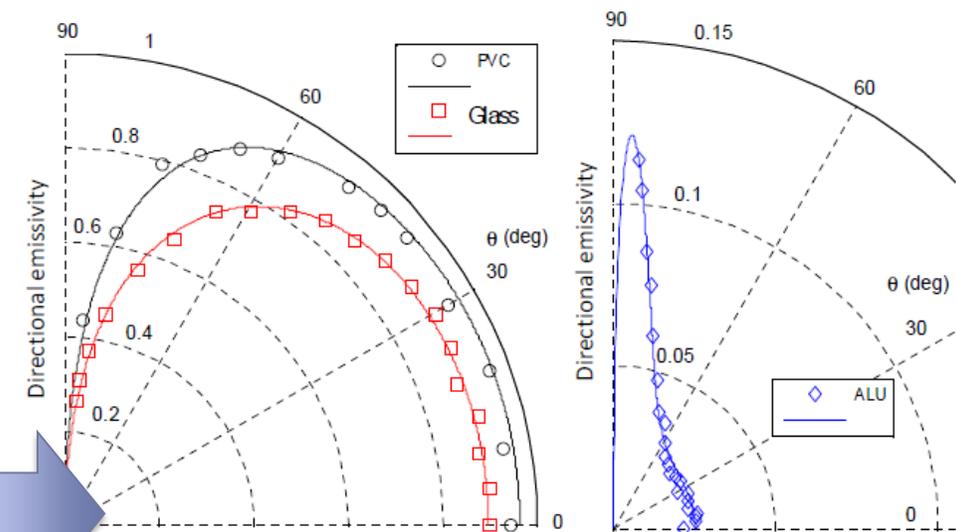
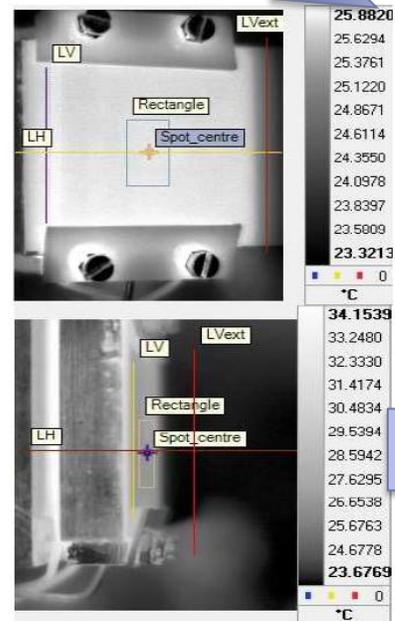
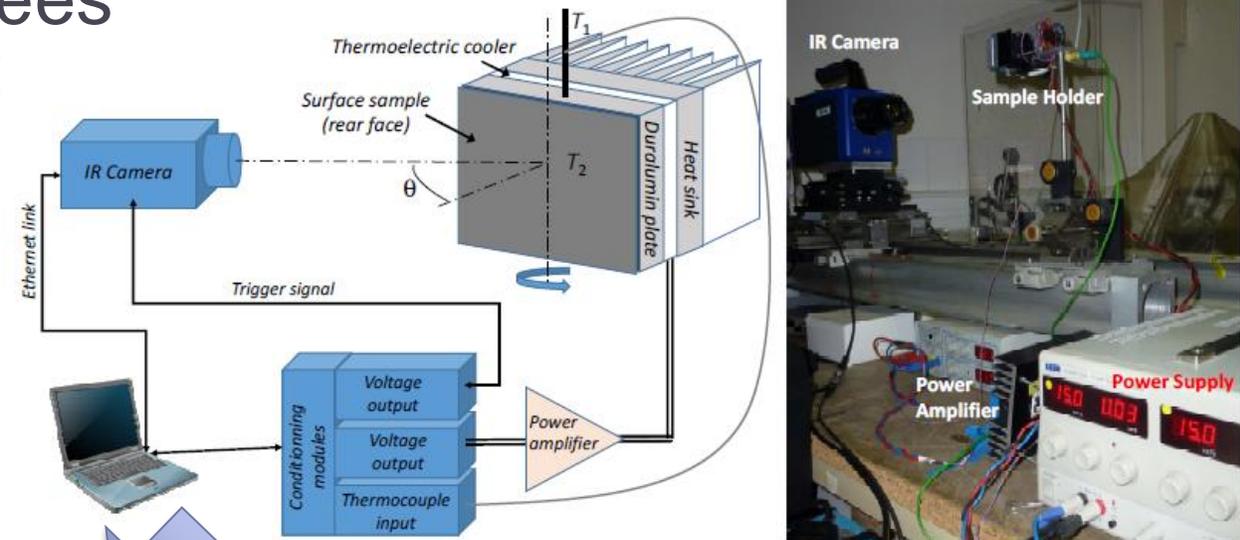
Variations d'émissivité avec l'angle d'observation

Mesures en labo (instrument SPIDER) /  
Comparaison aux données biblio



Emissivité directionnelle de revêtements de chaussée

L. Ibos et al., Investigation of the directional emissivity of materials using infrared thermography coupled with a periodic excitation, QIRT Conference, 2016



Matériaux « courants »

Questions?



# *Température radiante en milieu urbain : Mesures et modélisation*



# Mesure rayonnement incident

**Pyranomètre CM10 avec anneau Kipp&Zonen**

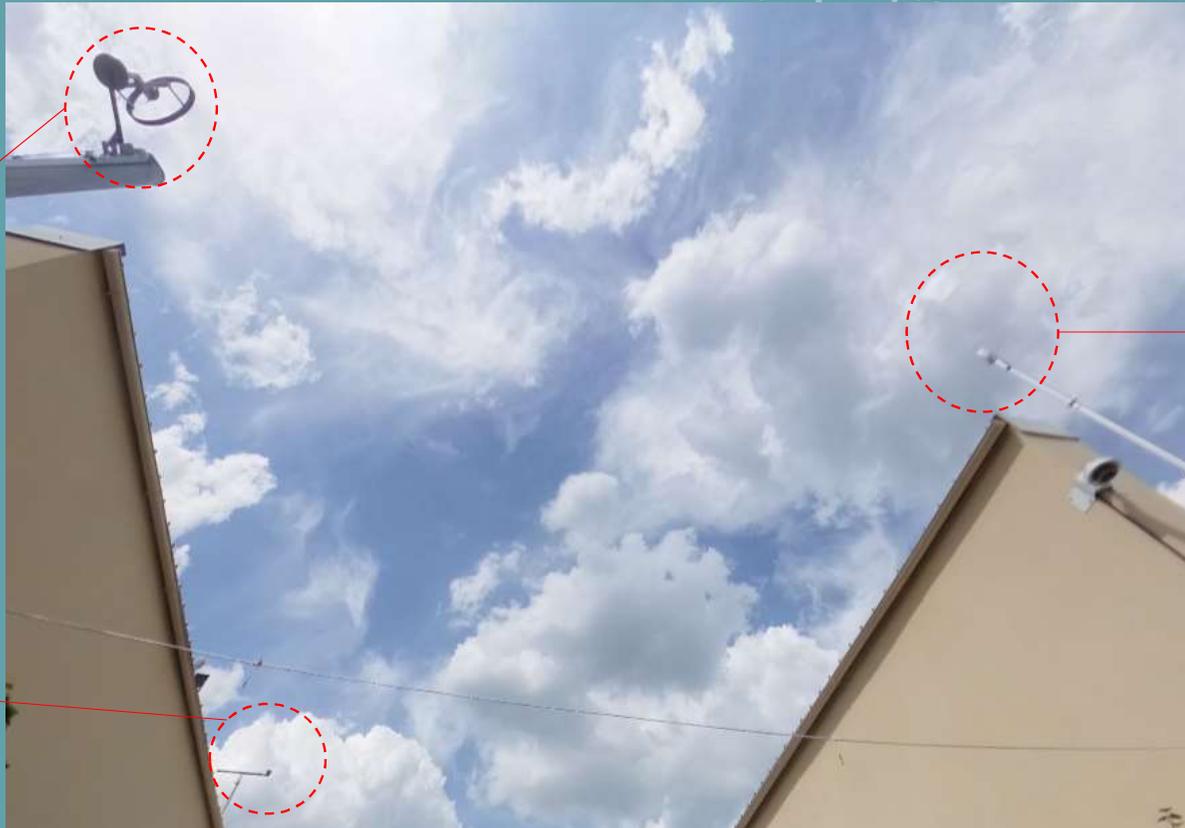


**Rayonnement diffus**

**Pyrgéomètre Kipp & Zonen**



**Rayonnement infrarouge**



**Station météo Campbell**



**Rayonnement globale  
Ta, HR, WD & WS,  
Pression, Pluie**

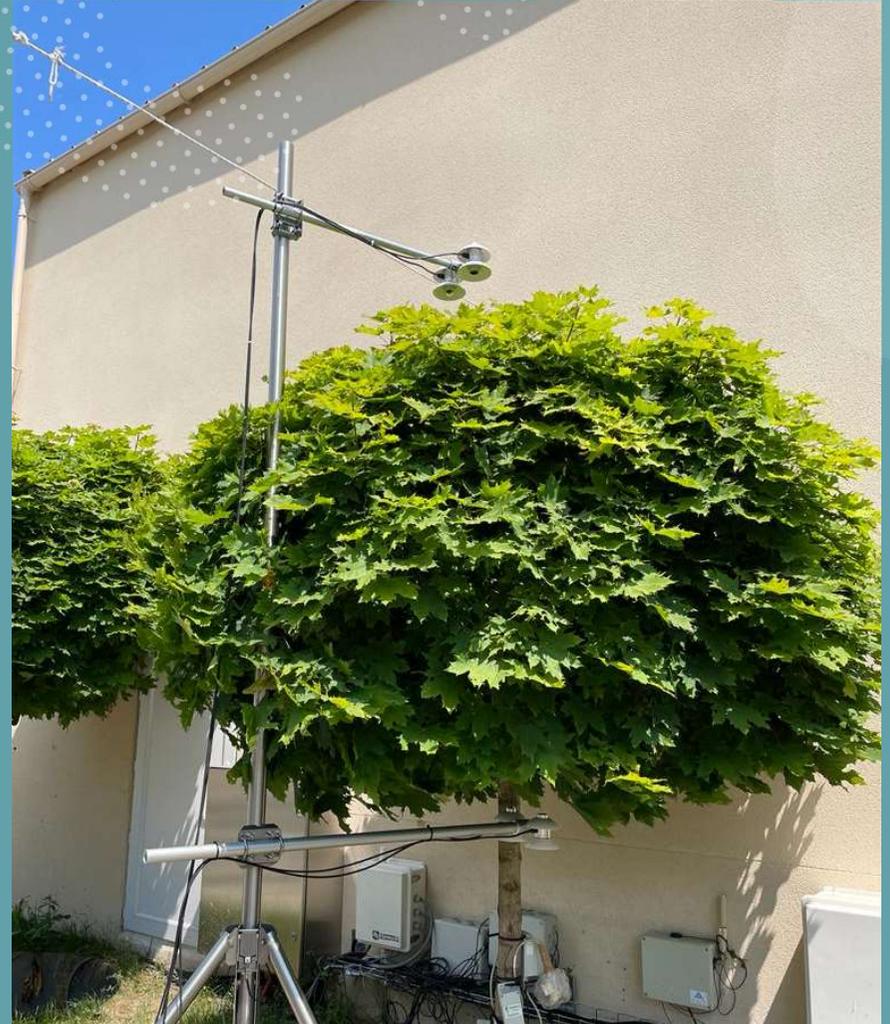
# Caractérisation des revêtements

- Propriété optique (sur site)
  - Albedo
  - Emissivité
- Propriété thermique (échantillon mur)
  - Chaleur spécifique
  - Conductivité thermique,...



# Caractérisation des arbres

- Transmissivité
- Estimation hauteur et diamètres
- Mesure continue au sol sous les arbres Est (5 à 40 cm)
  - Températures
  - Volume d'eau
  - Conductivité
  - Permittivité

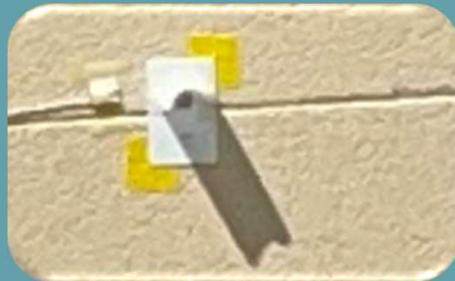


# Mesure Température des surfaces

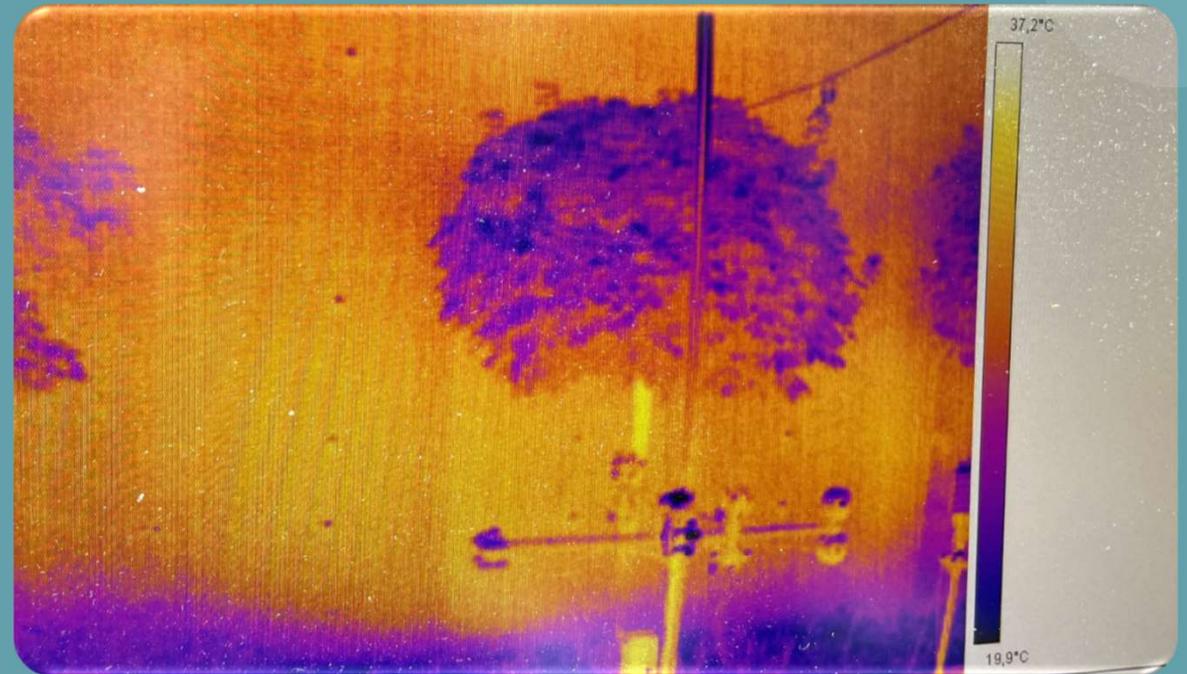
PT1000 Campbell



Thermopiles



Caméra thermique



# Température moyenne radiante

- **Globe noir (ISO 7726)**

$$T_{\text{mrt\_BG}} = \left[ (T_g + 273.15)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 V^{0.6}}{\varepsilon D^{0.4}} \times (T_g - T_a) \right]^{0.25} - 273.15 (\text{°C})$$

- **3 Radiomètres : 6 directions (Höppe 1992)**

$$T_{\text{mrt\_SM}} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^6 W_i (a_b \cdot K_i + \varepsilon_b \cdot L_i)}{\varepsilon_b \sigma} \right]^{0.25} - 273.15 (\text{°C})$$

- **1 Radiomètre : traditionnel (Fanger 1972)**

$$T_{\text{mrt\_TM}} = \left[ \frac{f_p a_b K_b / \sin \beta + a_b (K_d + K_r) + \varepsilon_b L}{\varepsilon_b \sigma} \right]^{0.25} - 273.15 (\text{°C})$$

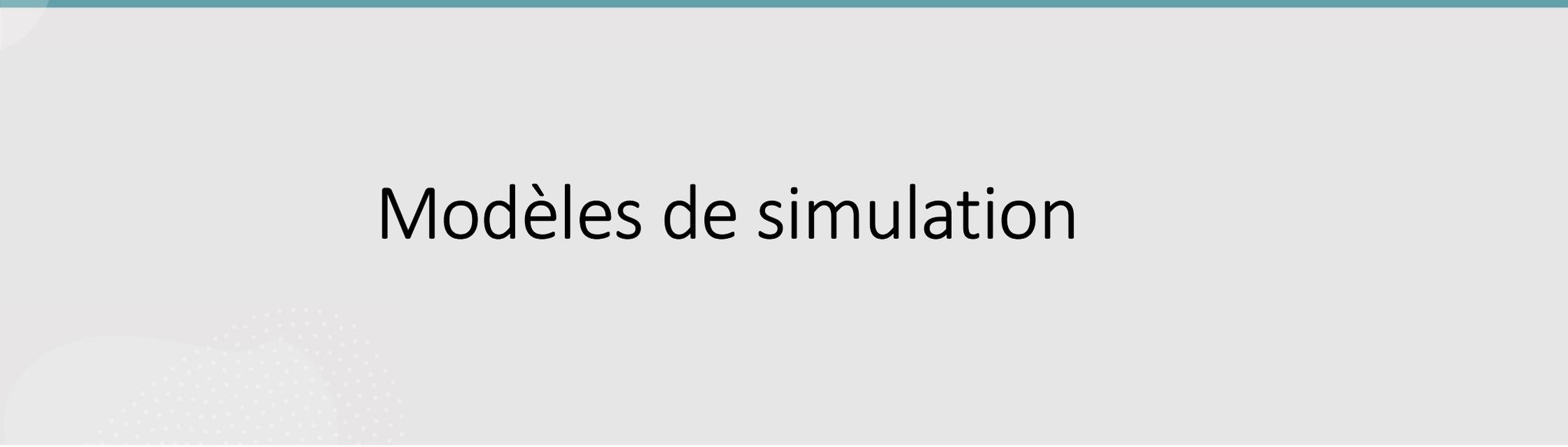


LEE et al. 2022,  
DOI :10.1007/s00484-021-02213-x





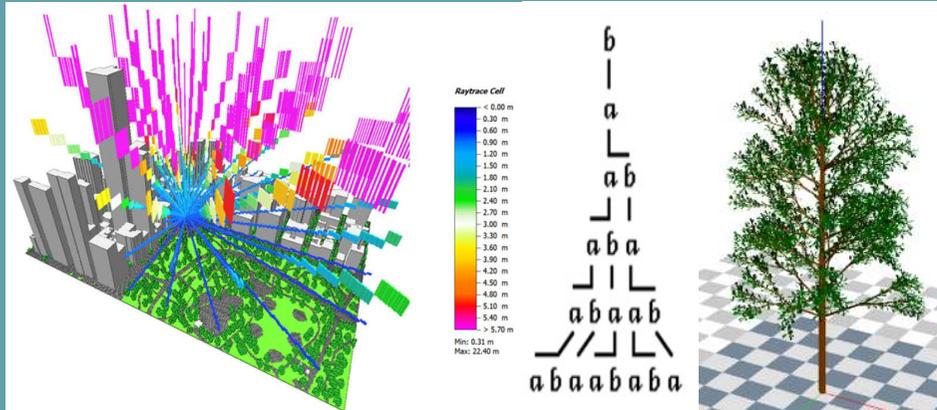
# Modèles de simulation



# ENVI-met and SOLWEIG (UMEP) update overview

## ENVI-met is a 3D CFD Model

- Radiation calculation by Raytracing with Index View Sphere (IVS)
- New model for trees : Accurate In-Canopy Radiation Transfer (ACRT)
- Tmrt by 6 directions (Höppe approach)



IVS model

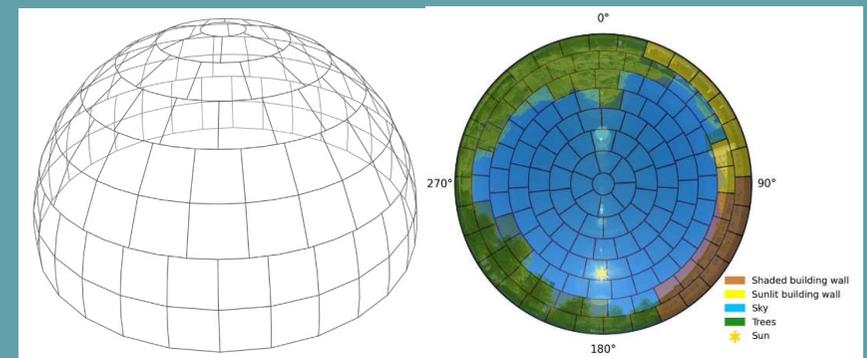
ACRT model

**Simon et al 2021**  
DOI :10.3390/app11125449

**Simon et al 2020**  
DOI :10.3390/f11080869

## SOLWEIG is a 2,5D radiative model

- Anisotropic sky model
- New method for SVF
- Human body as cylinder (option)
- Tmrt by 6 directions (Höppe approach)

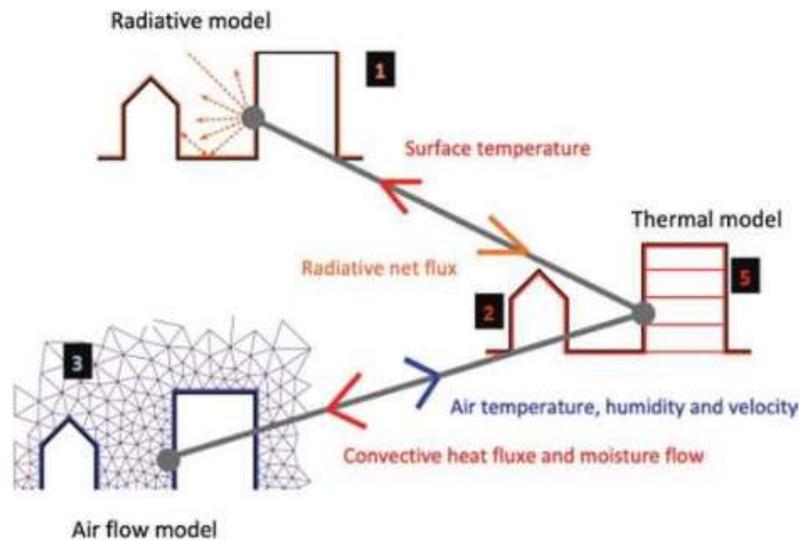


Sky patch

SVF

**Wallenberg et al. 2023**  
DOI :10.1007/s00484-023-02441-3

# SOLENE-microclimate overview



**Musy and al. 2015**  
DOI: 10.1016/j.uclim.2015.07.004

**Azam and al. 2018**  
DOI: 10.1016/j.uclim.2017.08.010

**Musy and al. 2021**  
DOI: 10.1007/978-3-030-65421-4\_13

$$T_{MRT} = \left[ \left( \frac{\epsilon_{SKY}}{2} + \frac{\epsilon_{GND}}{2} \right) T_{SKY}^4 + \frac{f_p (1 - \alpha_{cl}) S \downarrow}{F_{EFF} \sigma} + \frac{(1 - \alpha_{cl}) (D \downarrow + (S \downarrow + D \downarrow) \alpha_{GRND})}{\sigma} \right]^{0.25}$$

$$T_{mrt} = \left[ \sum_{j=1}^n F_{i,j} \epsilon_j T_j^4 + F_{i,ciel} \epsilon_{ciel} T_{ciel}^4 + \frac{f_p (1 - \alpha_{cl}) U_{sol} S \downarrow}{\sigma F_{eff}} + \frac{(1 - \alpha_{cl}) U_{sol} (D \downarrow + \alpha_{sol} (S \downarrow + D \downarrow))}{\sigma} \right]^{0.25} \quad (108)$$

*j* is the index referring to the environment and *i* the person (bonhomme confort)

**Vinet 2020 (Thesis)** <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00490049>

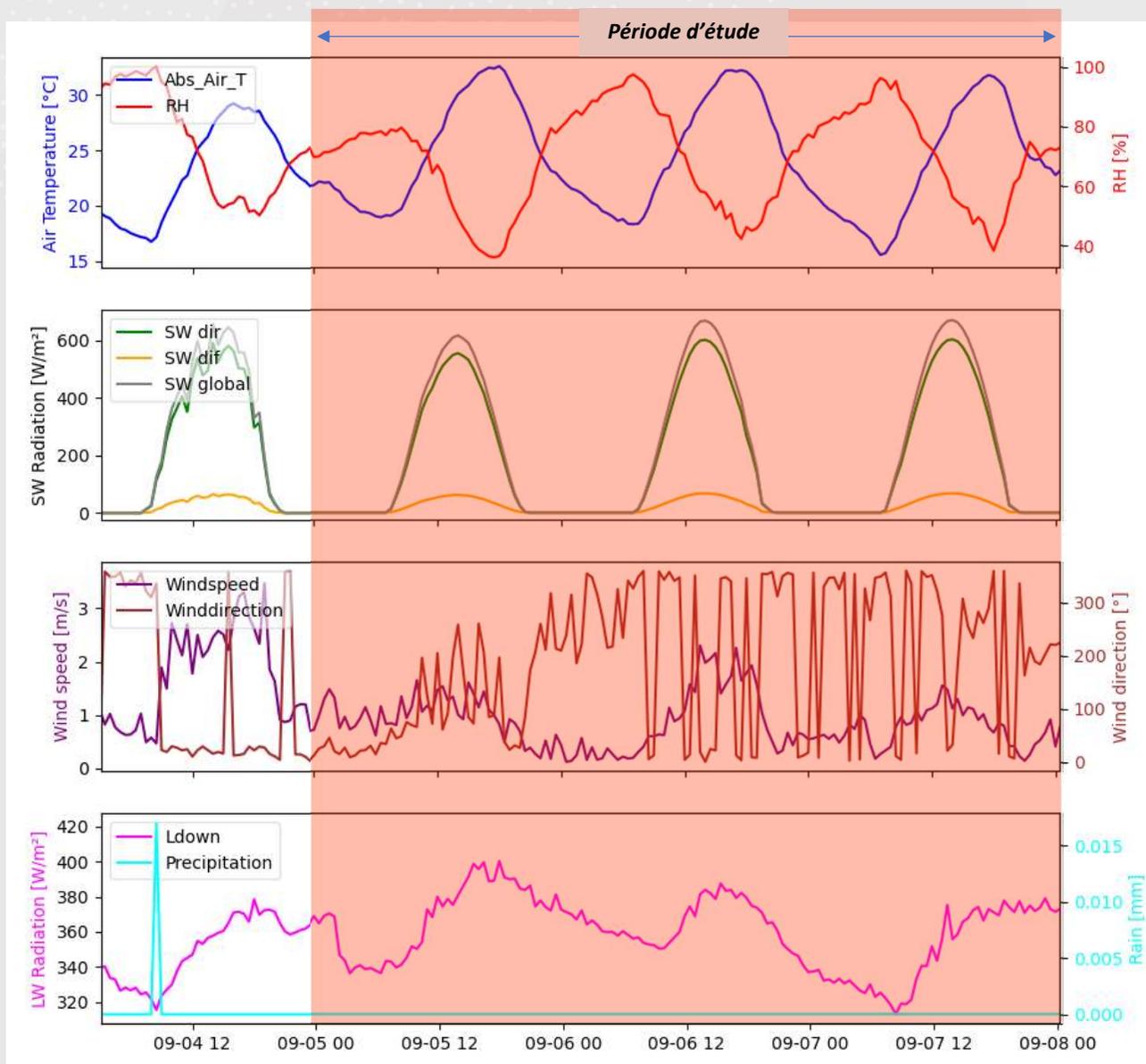
**De Dear and al. 1999,**  
International Conference  
on Urban Climatology,  
Sydney

$$U_{sol} = \frac{I_{air}}{F_{cl} \left( I_{cl} + \frac{I_{air}}{F_{cl}} \right)}$$

$$I_{air} = 0.3767 - 0.3225 \text{Log}_{10}(U)$$

# Données d'entrée modèles

- 3 journées de ciel clair (du 5 au 7/09)
- Rayonnement max  $670 \text{ W/m}^2$
- $T_a$  max  $32,5^\circ\text{C}$
- $V_a$  max  $2,3 \text{ m/s}$ ;  $V_a$  moy  $0,85 \text{ m/s}$





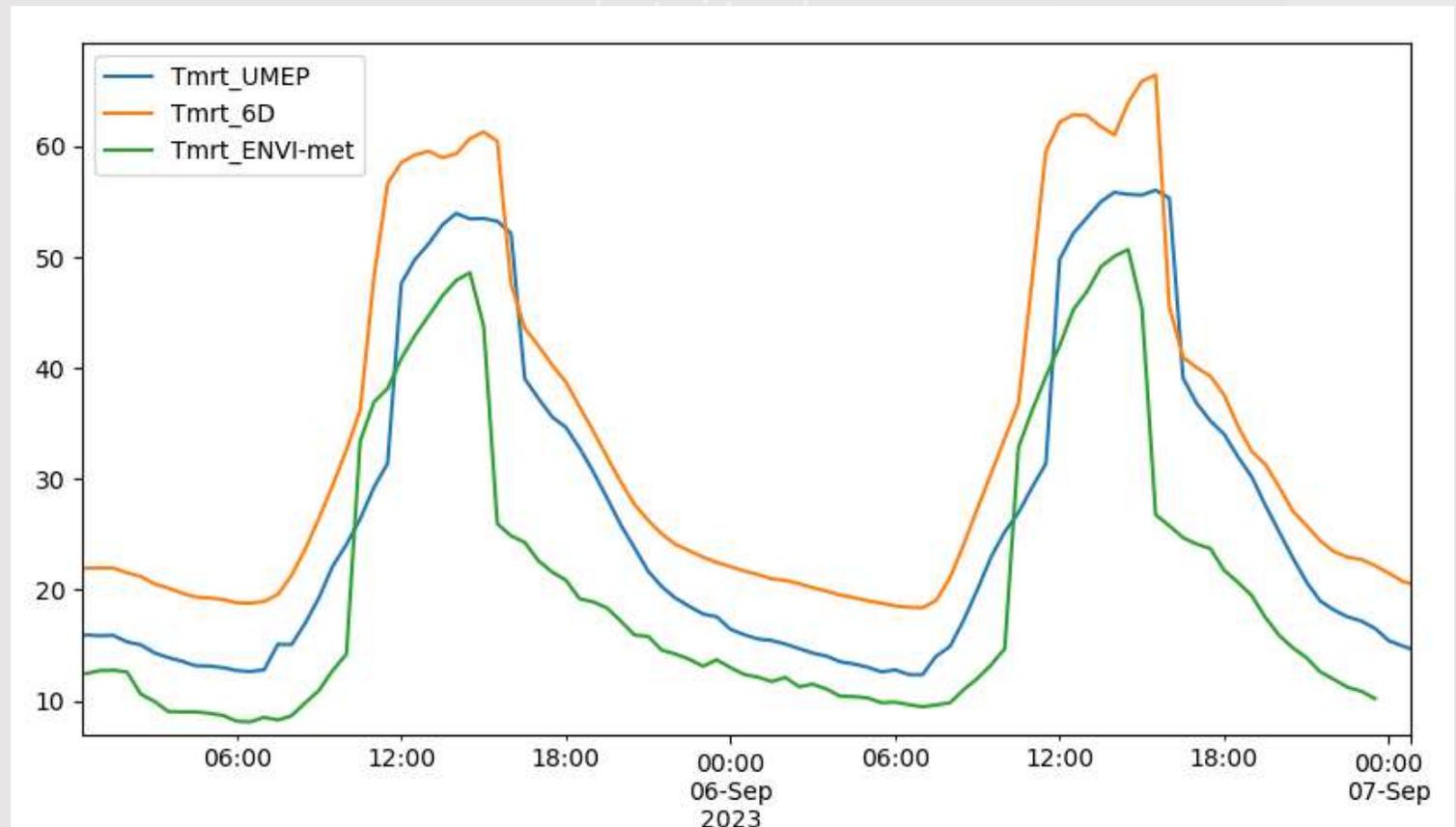
# Résultats



# Comparaison

- Sous-estimation en journée avec Envi-met et SOLWEIG
- Envi-met sous-estime le plus
- Problème d'ombrage (probablement la géométrie)

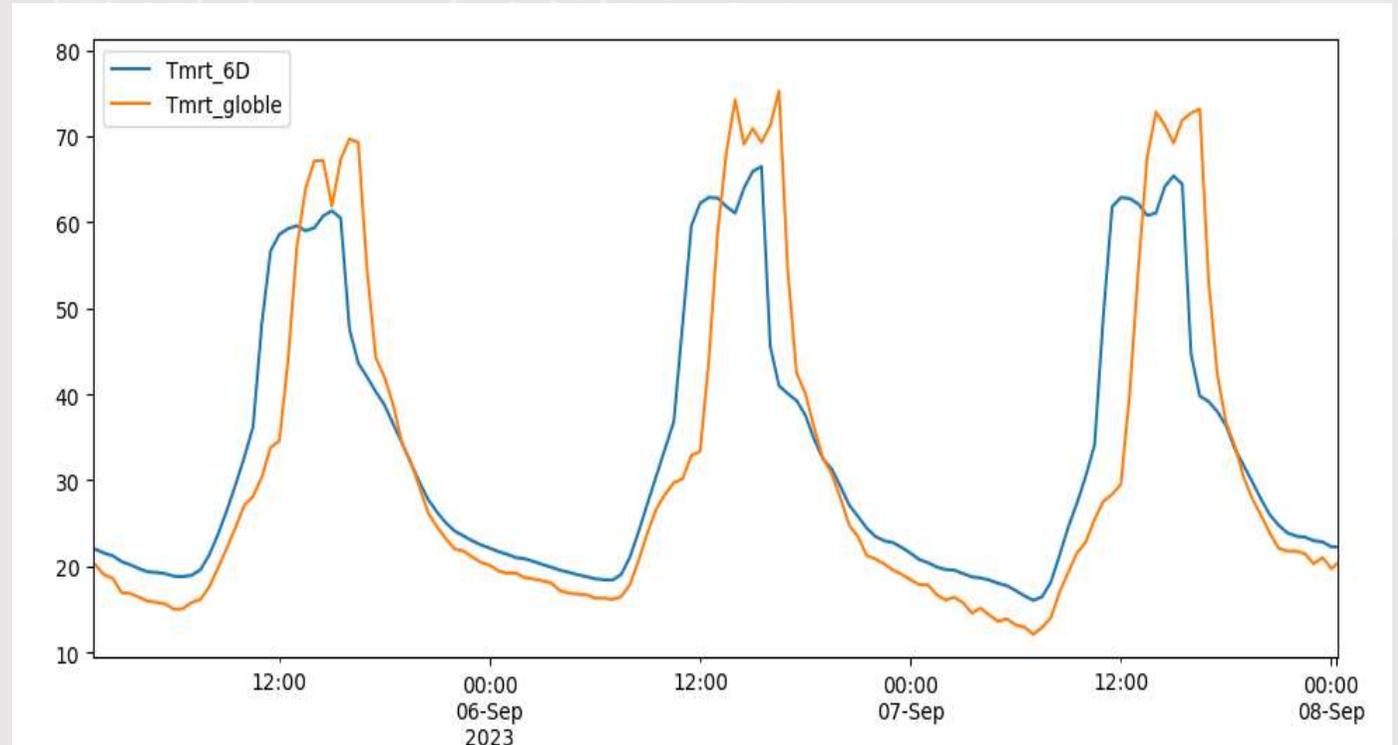
## Tmrt 6 directions vs Simulation



# Comparaison

- Surestimation en journée (20 à 30°C)
- Sous-estimation la nuit avec globe noir (-10°C)
- Décalage

## Tmrt globe vs 6 directions



# Perspectives

- Pour le vent, utiliser les données recaler à partir des données provenant de la station météo
- Intégrer SOLENE-microclimat et revoir la formule de calcul de la  $T_{mrt}$
- Analyser l'effet d'ombrage dans le canyon
- Finaliser le dépouillement des données et préparer un datapaper

Merci 😊

Vos questions sont bienvenues !



## Thermographie Inverse : accéder aux températures d'une scène thermique par comparaison entre images thermographiques réelles et leur modèle (rendu infrarouge)

**Fabrice Rigollet**, IUSTI UMR CNRS 7343, Aix Marseille Université (AMU), Marseille, [fabrice.rigollet@univ-amu.fr](mailto:fabrice.rigollet@univ-amu.fr)

- Travaux de thèse de **Charly Talatizi** (2021), co-encadrement **M. H. Aumeunier** (CEA/IRFM), **C. Le Niliot** (AMU)
- Travaux de post-doctorat de **Mickael Le Bohec** (2019-2021), AMU, CEA/IRFM
- Collaboration initiée avec la plateforme **EDstar** (**V. Forest**, **V. Eymet**, **L. Penazzi**, ...)
- Premiers résultats de calculs thermiques urbains à IUSTI (CityVox) : **Jérôme Vicente** [jerome.vicente@univ-amu.fr](mailto:jerome.vicente@univ-amu.fr)

# Thermographie quantitative en Tokamak

Le « canyon » métallique du Tokamak ASDEX-UG est propice aux réflexions multiples (cadres blancs) du flux initialement émis par les murs verticaux de gauche et de droite (outer et inner target).

Image visible

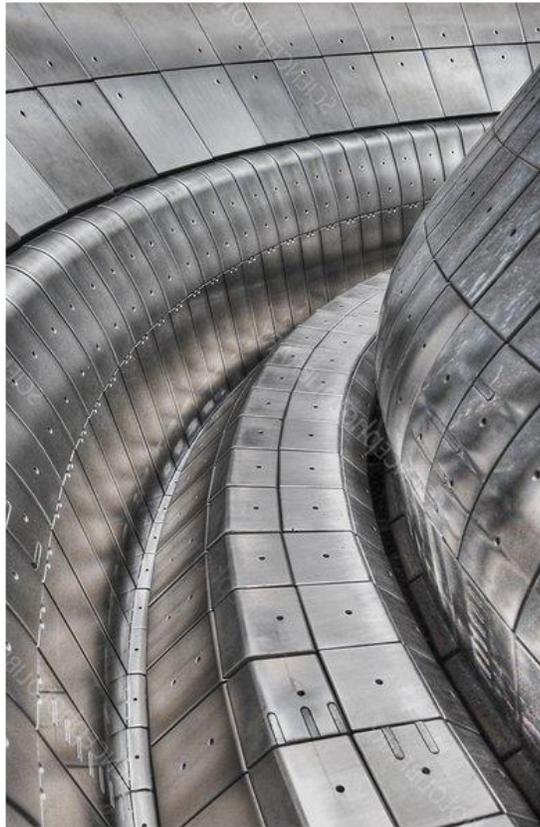


Image infrarouge  
MWIR Camera (#Pulse 32858)

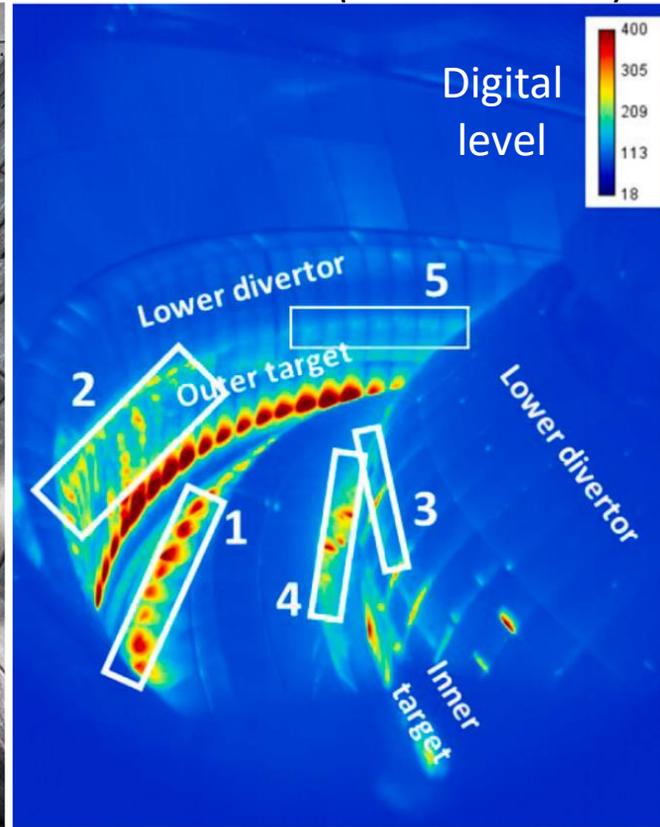
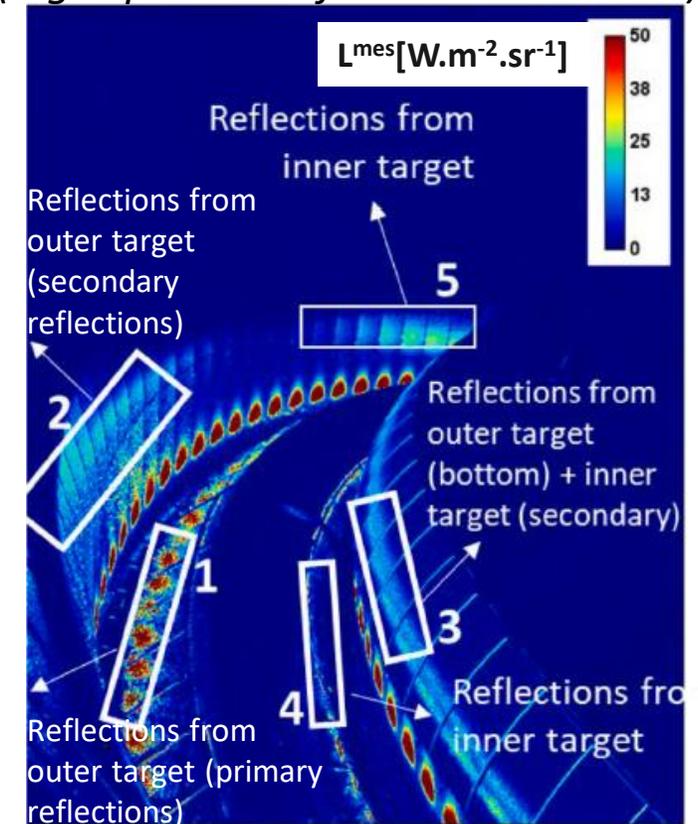
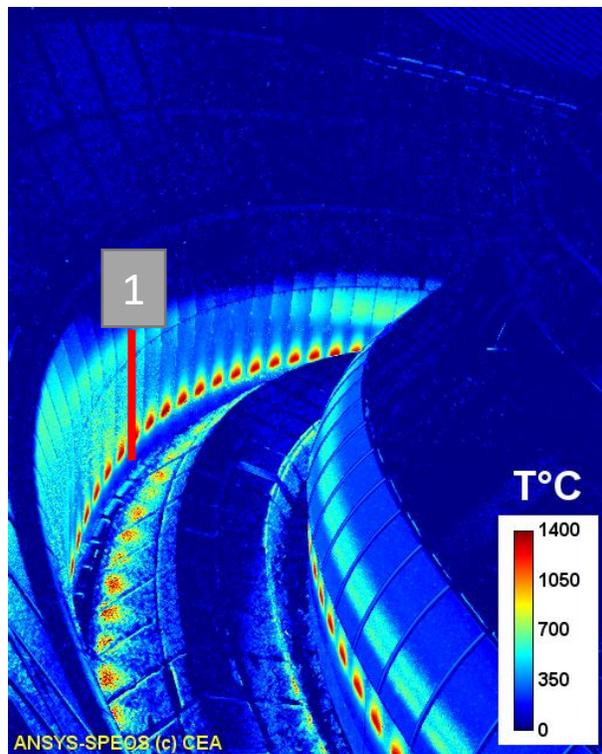
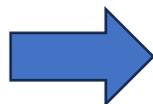
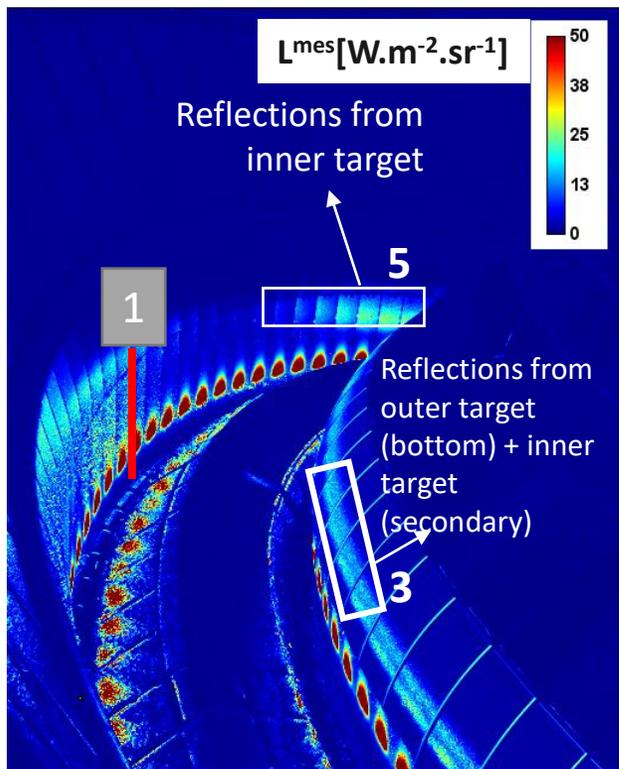


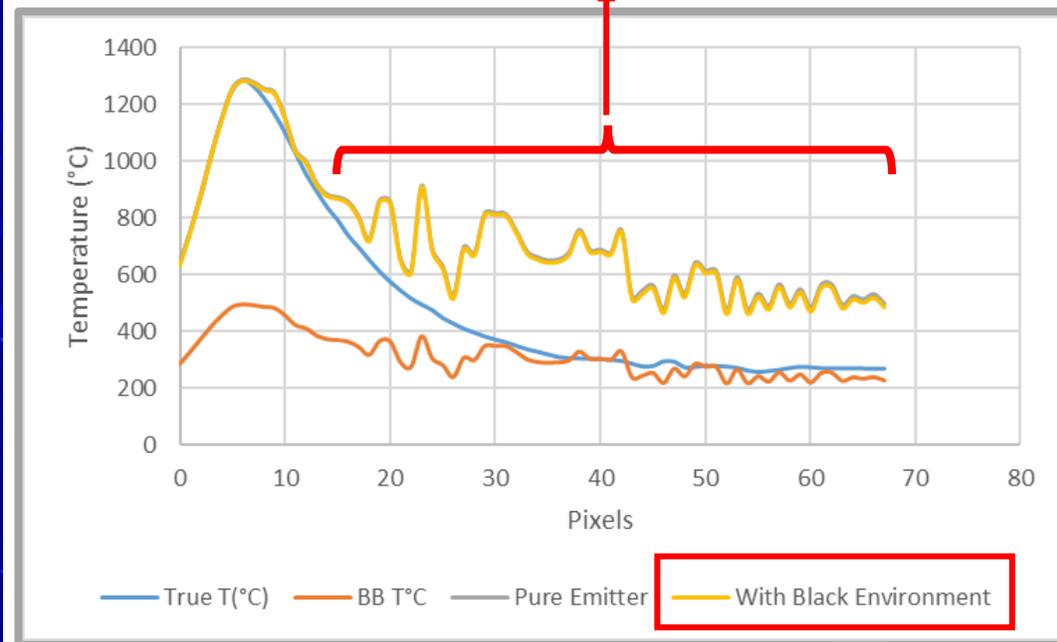
Image IR simulée (ANSYS-SPEOS, Backward MC-RT)  
(high specular reflectance materials)



$$T \text{ "en environnement noir"} = T^{en} = \frac{c_2}{\lambda_0} \frac{1}{\text{Ln} \left( 1 + \frac{\pi c_1 \lambda_0^{-5} \Delta \lambda \varepsilon}{L^{mes} - (1 - \varepsilon) L^0(T_{env})} \right)} [K]$$



**Mauvaise reconstruction des températures moyennes et basses à cause des réflexions mal décrites**

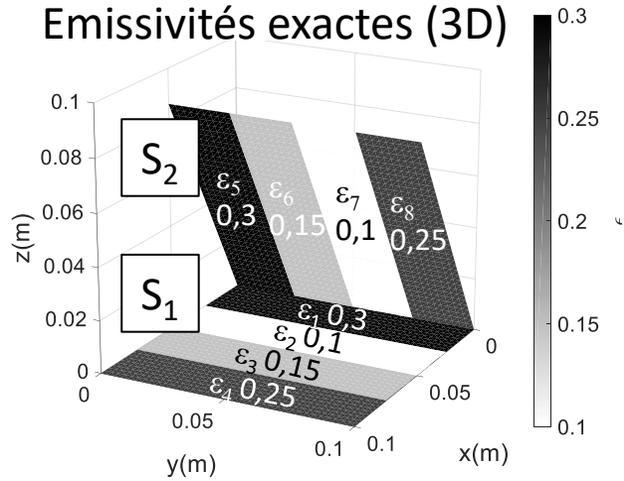


Profils le long de la verticale 1

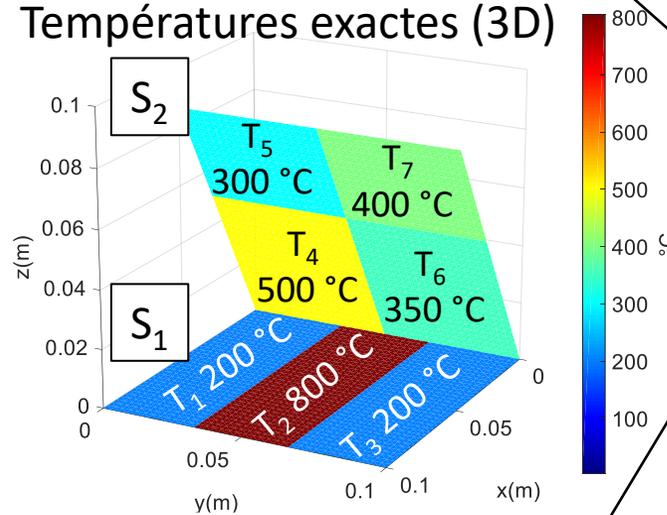
Conversion "Classique" **pixel par pixel** des luminances en température, en supposant une **émissivité** affectée à chaque pixel et **un environnement noir** à  $T_{env}$  connue (machine thermalisée avant un choc plasma)

# Principe sur une scène plus simple, propice aux réflexions multiples (mais surfaces diffuses), avec data simulées

Emissivités exactes (3D)

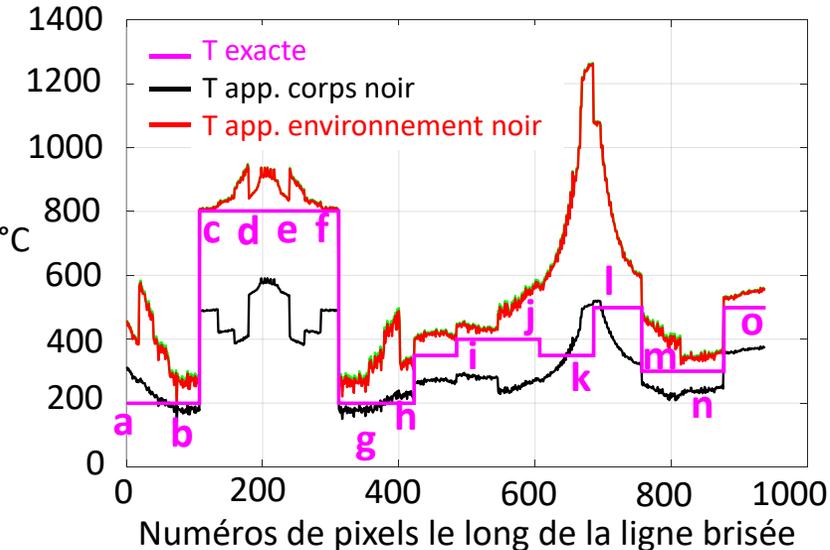
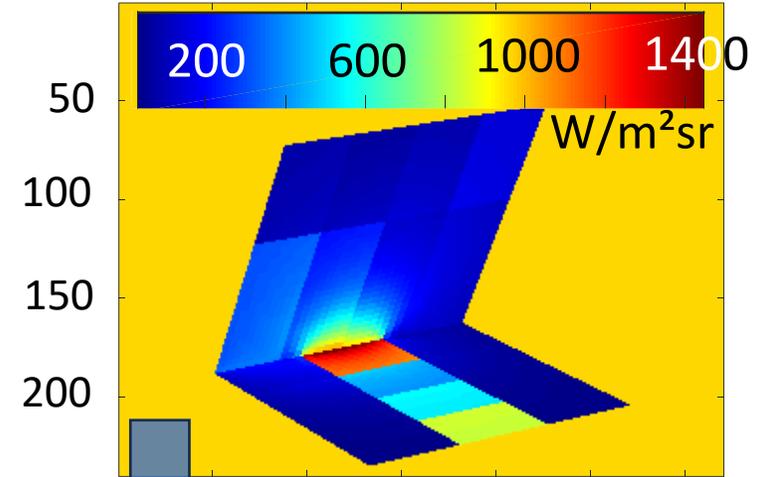


Températures exactes (3D)

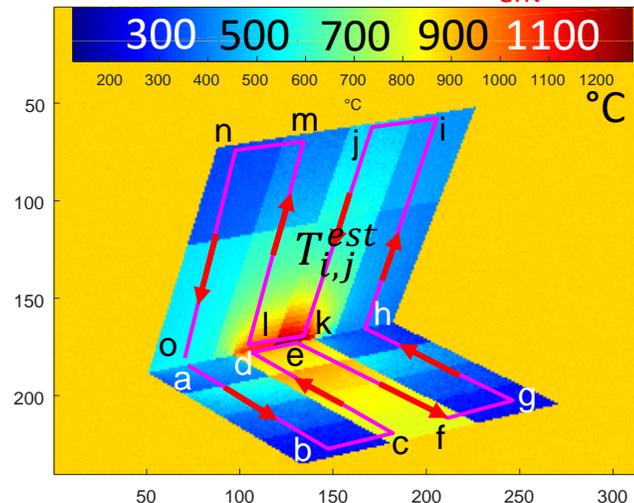


Caméra IR, 240 lig, 320 col, étalonnée en luminance dans la fine bande  $\Delta\lambda = 0.8\mu\text{m}$  autour de  $\lambda_0 = 4.1\mu\text{m}$

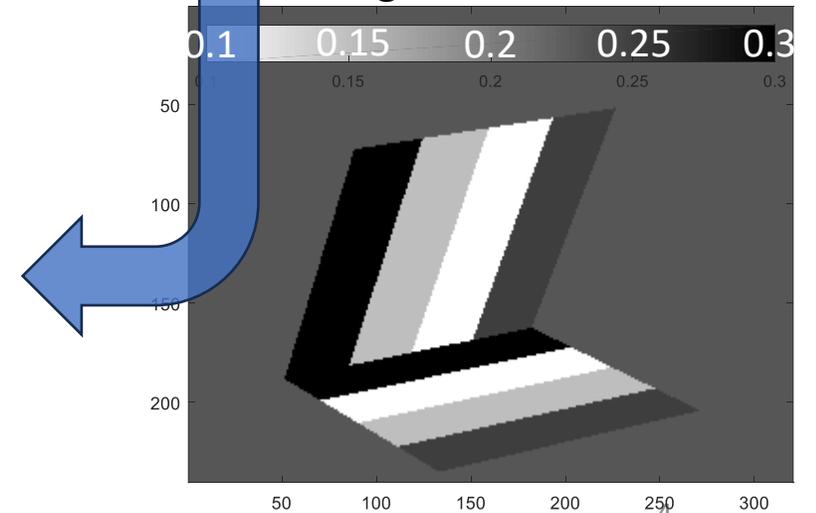
Image IR bruitée (2D)



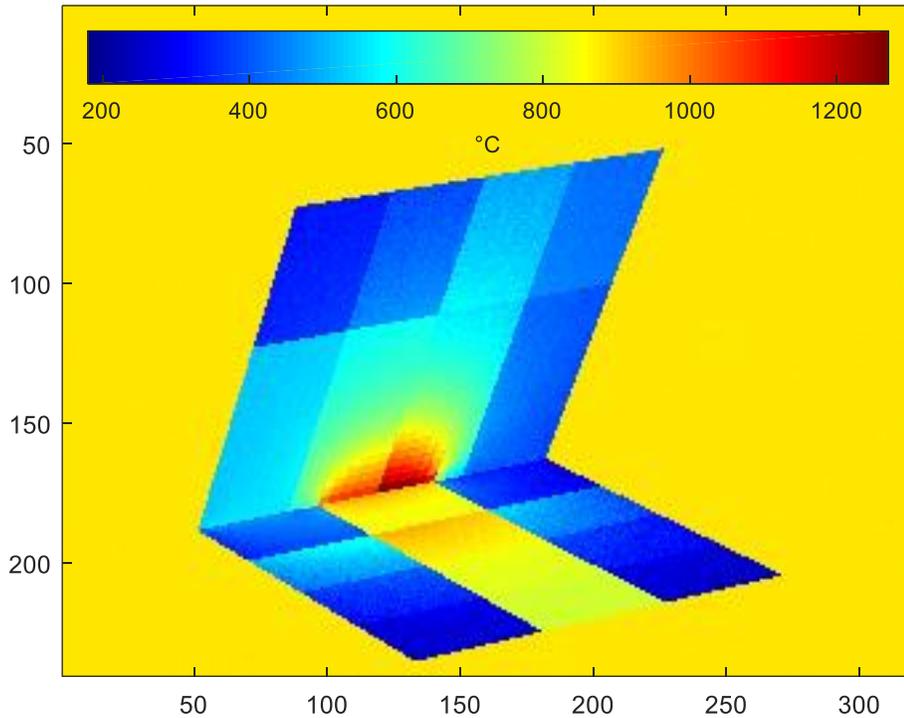
T avec environnement noir à  $T_{\text{env}}$  connue (90°C)



'image' des émissivités

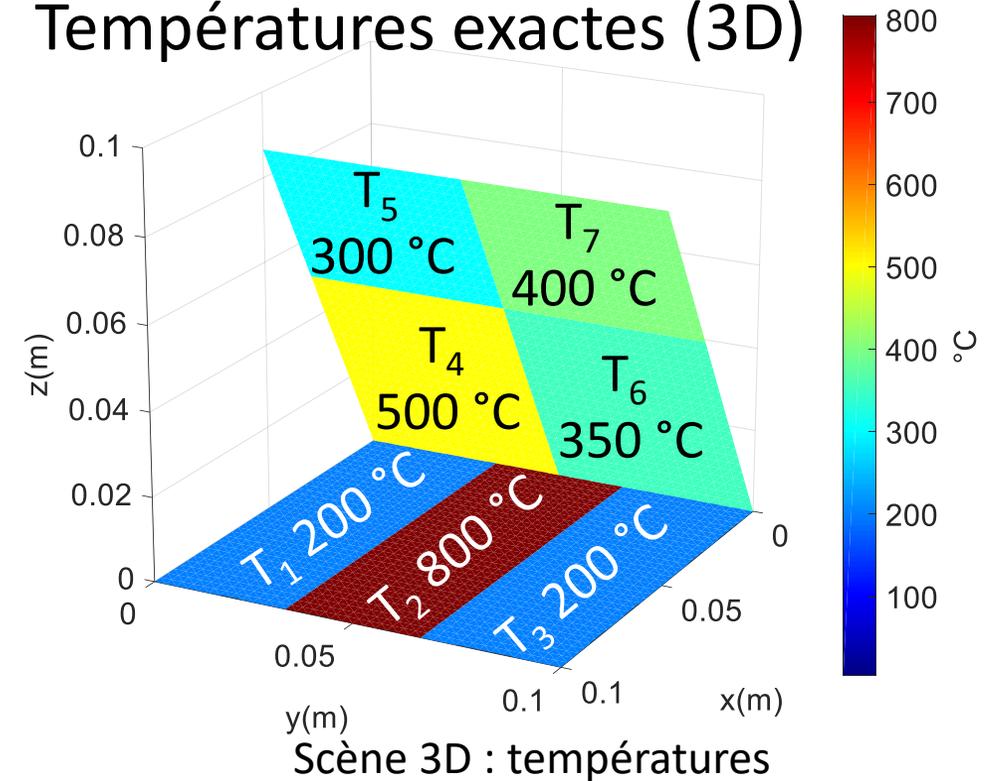


T reconstruites (2D) avec environnement noir à  $T_{env}$  connue (90°C)

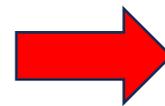


≠

Températures exactes (3D)



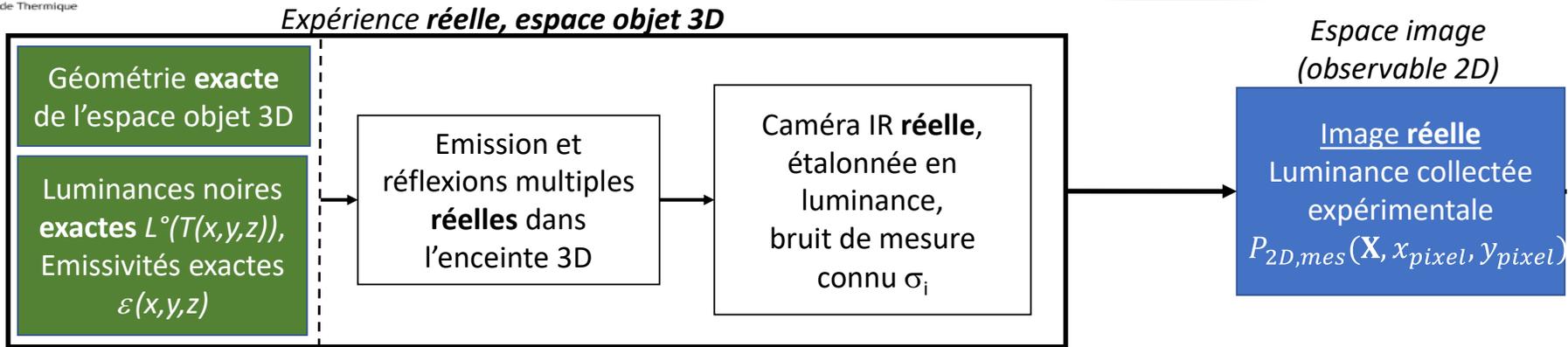
L'environnement noir 'vu' par chaque pixel est donc en général une mauvaise hypothèse



**Proposition :**

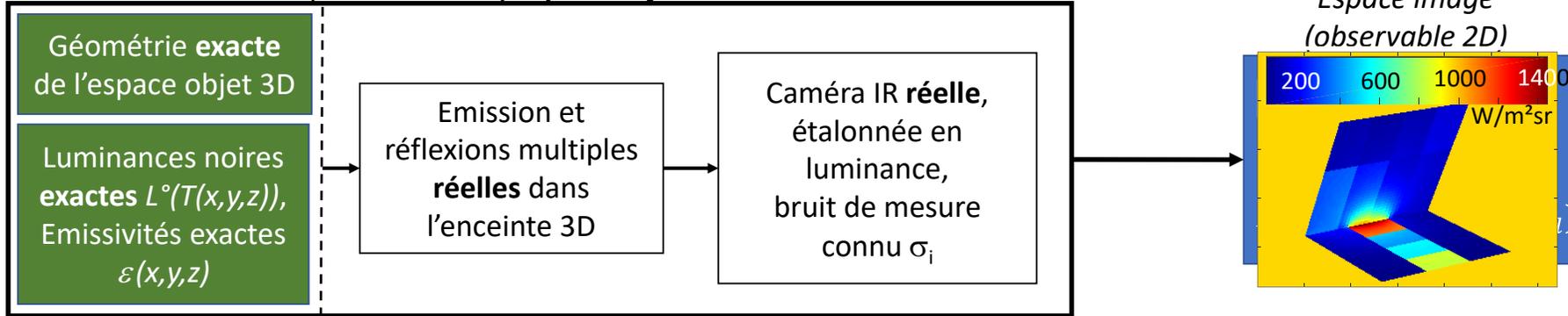
- modéliser l'observable en tenant compte des réflexions multiples
- résoudre un problème inverse

# Thermographie inverse : minimisation d'un coût (mesure-modèle)



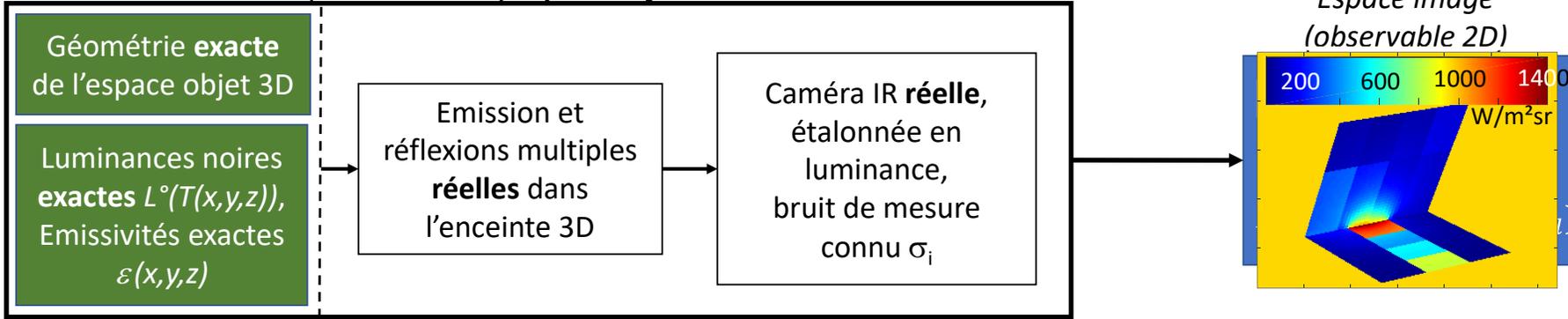
# Thermographie inverse : minimisation d'un coût (mesure-modèle)

*Expérience réelle, espace objet 3D*

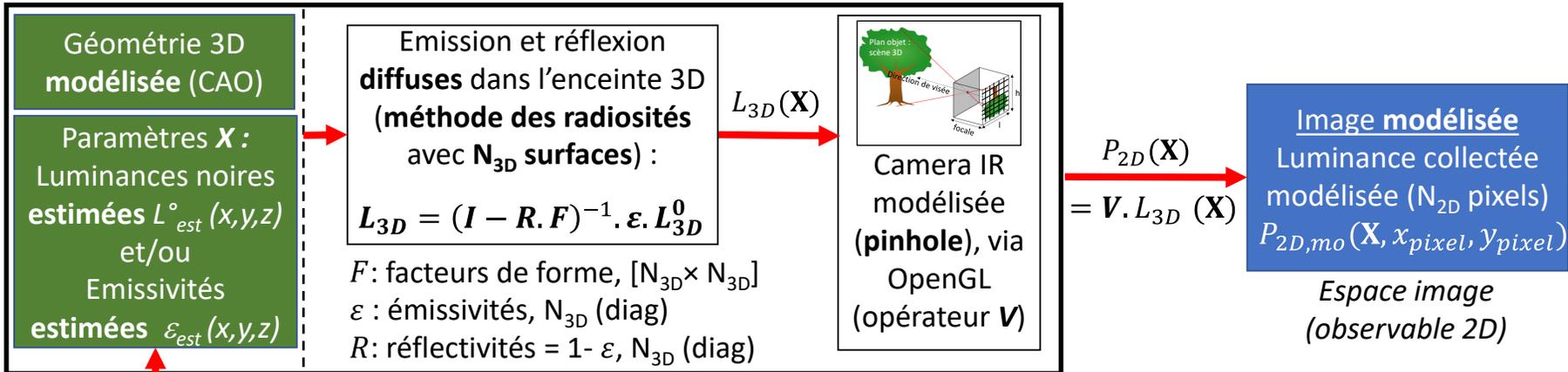


# Thermographie inverse : minimisation d'un coût (mesure-modèle)

## Expérience réelle, espace objet 3D

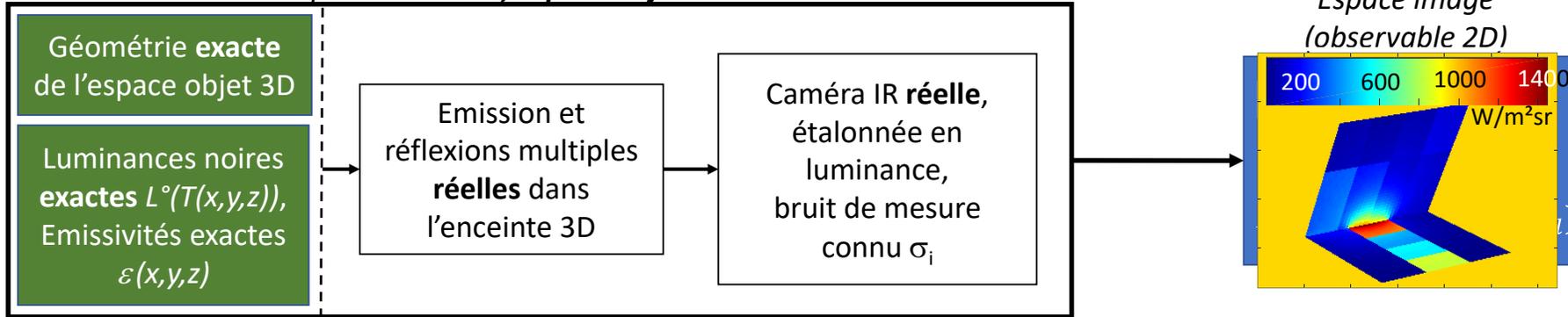


## Expérience modélisée ('modèle direct'), espace objet 3D

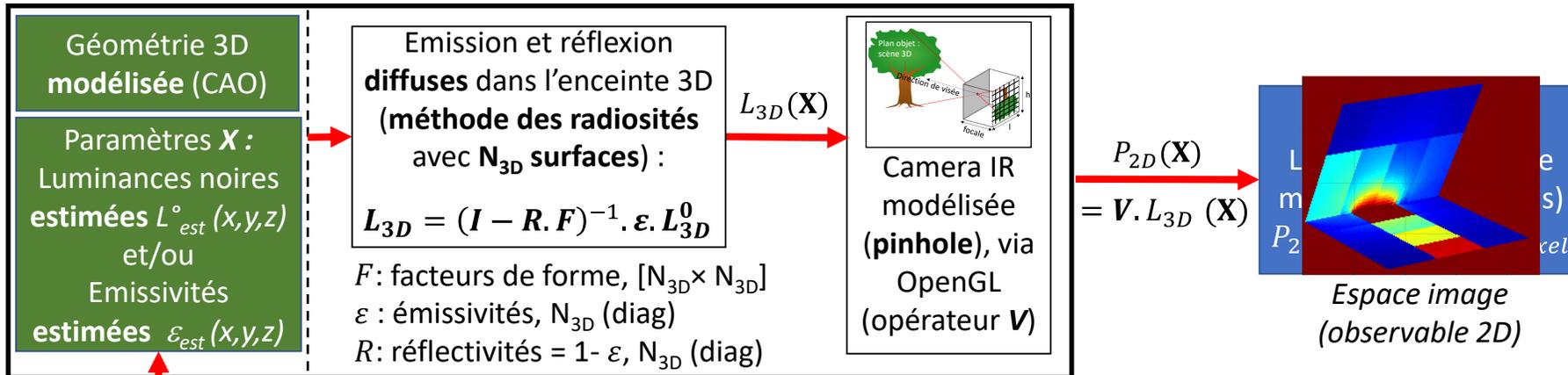


# Thermographie inverse : minimisation d'un coût (mesure-modèle)

## Expérience *réelle*, espace objet 3D

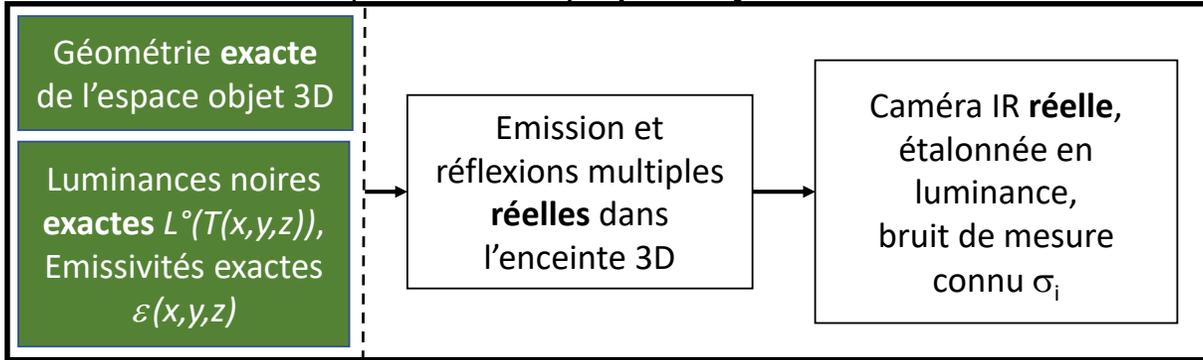


## Expérience *modélisée* ('modèle direct'), espace objet 3D

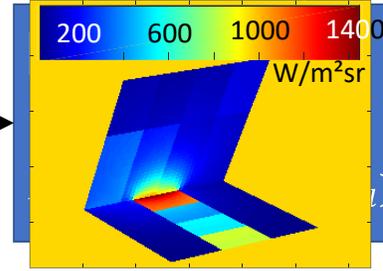


# Thermographie inverse : minimisation d'un coût (mesure-modèle)

## Expérience réelle, espace objet 3D



## Espace image (observable 2D)

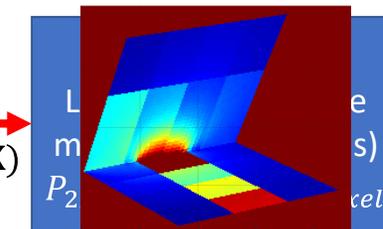
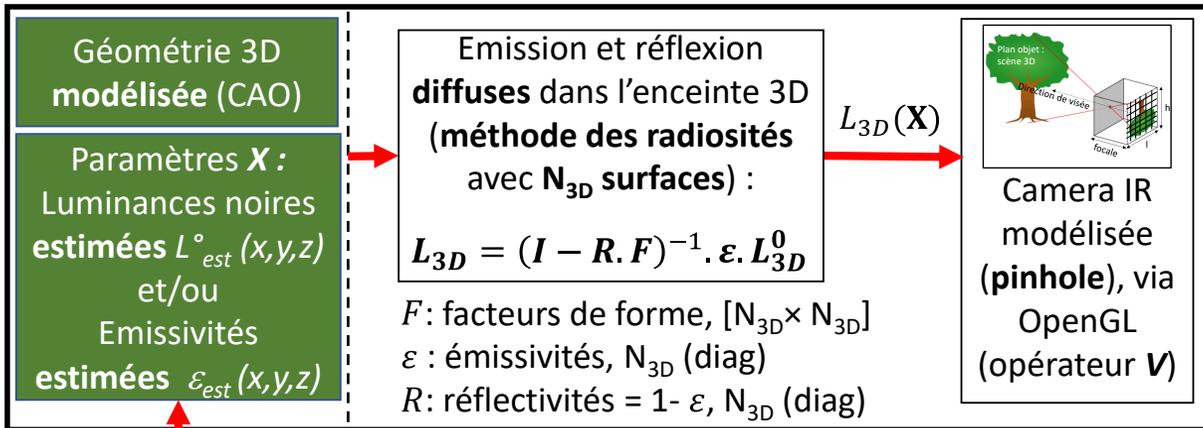


Sélection de m pixels sur une ROI

Fonction coût type 'moindres carrés'

$$J(\mathbf{X}) = \sum_{\text{pixel } i=1}^m \left[ \frac{(P_{ROI,mes,i} - P_{ROI,mo,i}(\mathbf{X}))}{\sigma_i} \right]^2$$

## Expérience modélisée ('modèle direct'), espace objet 3D



Sélection de m pixels sur une ROI

**Itérations si des  $\epsilon_{est}(x,y,z)$  sont estimées**

Mise à jour des paramètres estimés  $\mathbf{X} = L^0_{est}(x,y,z)$  et/ou  $\mathbf{X} = \epsilon_{est}(x,y,z)$

Minimisation par méthode de gradient (Gauss-Newton)

# Modèle direct : radiosité 3D + OpenGL pour la projection 3D→2D

$$\underbrace{[P_{2D}]}_{\substack{\text{Solution 2D} \\ \text{(tous les pixels)}}} = \underbrace{[V]}_{\substack{\text{Projection 3D} \rightarrow \text{2D} \\ \text{(OpenGL)}}} \underbrace{[I - R(\varepsilon)F]^{-1}}_{\text{Opérateur radiatif}} \underbrace{[\varepsilon L^0(T)]}_{\text{Terme source}}$$

$[N_{2D} \times 1]$                        $[N_{2D} \times N_{3D}]$                        $[N_{3D} \times N_{3D}]$                        $[N_{3D} \times 1]$

Puis choix de  $m$  pixels sur une Région d'Intérêt (ROI)



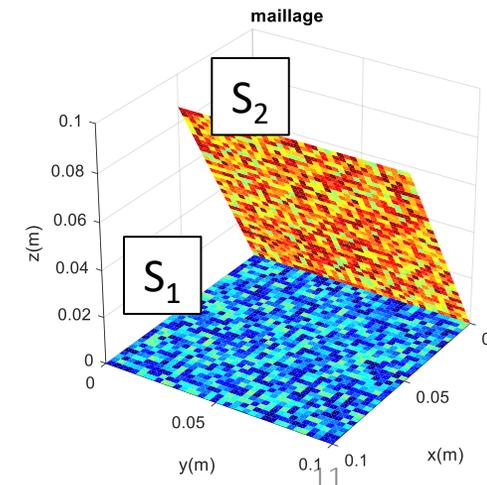
Observable =  
Vecteur des  $m$  pixels  $[P_{ROI}] [m \times 1]$

$R(\varepsilon)$  = matrice diagonale des réflectivités

$F$  = matrice des facteurs de forme (précaculés par intégrales de contours ici)

ici  $N_{3D}$  = 2593 patches dans la scène

ici  $N_{2D}$  = 76 800 (320 x 240) et  $m$  = 22 597 pixels sur l'onglet



# Modèle direct : radiosité 3D + OpenGL pour la projection 3D→2D

$$\underbrace{[P_{2D}]_{[N_{2D} \times 1]}}_{\text{Solution 2D (tous les pixels)}} = \underbrace{[V]_{[N_{2D} \times N_{3D}]}}_{\text{Projection 3D} \rightarrow \text{2D (OpenGL)}} \underbrace{[I - R(\varepsilon)F]^{-1}}_{[N_{3D} \times N_{3D}] \text{ Opérateur radiatif}} \underbrace{[\varepsilon L^0(T)]_{[N_{3D} \times 1]}}_{\text{Terme source}}$$

$S^{2D}$  = matrice de sensibilité du modèle = jacobien

Si paramètres =  $L^0$        $[P_{ROI}] = [S^{2D}] [\varepsilon L^0(T)]$        $\rightarrow$  Observable **linéairement** reliés aux  $L^0(T)$

$\rightarrow$  **Pb inverse :**       $\hat{L}_r^0 = ((S_r^{2D})^T S_r^{2D})^{-1} (S_r^{2D})^T (P_{ROI,mes} - S_c^{2D} \varepsilon L_c^0)$       *Si des  $L^0(T_c)$  sont constants (seuls  $r L^0(T)$  sont estimés sur les  $N_{3D}$ )*

$\rightarrow$  pas d'itération car matrice de sensibilité  $S^{2D}$  constante

sensibilité à  $L_j^0 = [S^{2D}]_j = \frac{\partial [P_{2D}]}{\partial L_j^0} = [V][I - RF]^{-1} [[0 \ 0 \ 0] [\varepsilon_k] [\varepsilon_m] [\dots] [0 \ 0] [\varepsilon_n] [0 \ 0 \ 0 \ 0]]^T$

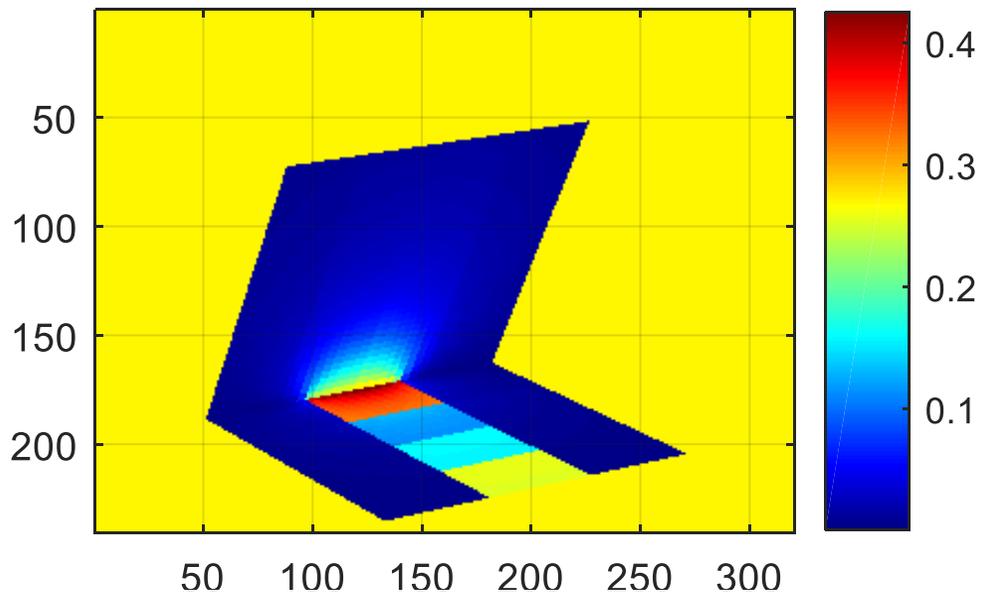
= image obtenue avec terme source nul partout sauf aux patchs à  $T_j$  où ils valent l'  $\varepsilon$  locale

# Sensibilité de l'image à une température de la scène (ou plutôt à $L^{\circ}(T)$ )

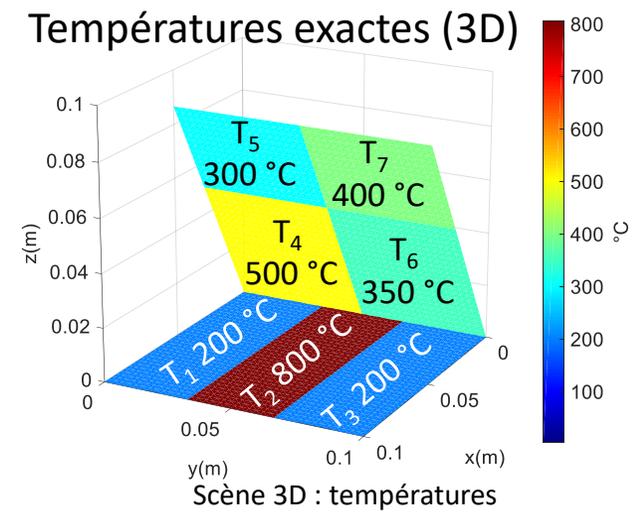
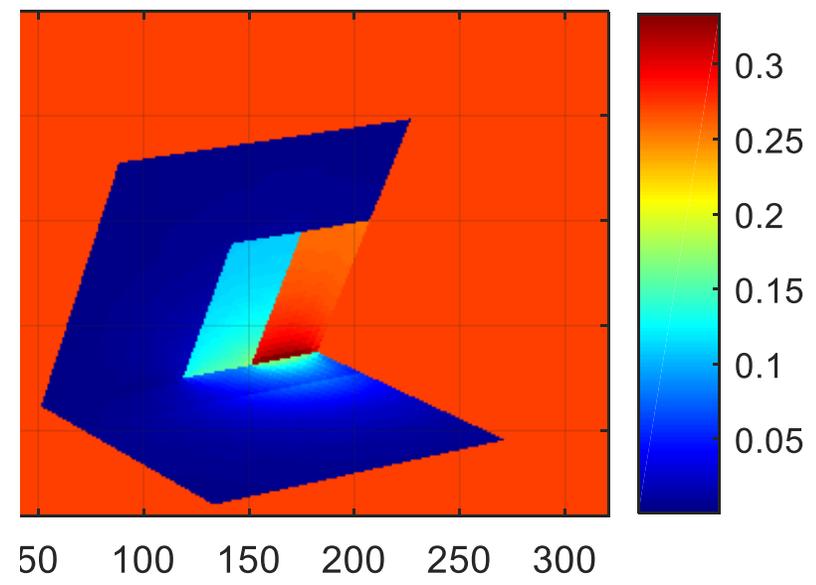
sensibilité à  $L_j^0 = [S^{2D}]_j = \frac{\partial [P_{2D}]}{\partial L_j^0} = [V][I - RF]^{-1} \begin{bmatrix} [0 & 0 & 0] & [\epsilon_k] & [\epsilon_m] & [\dots] & [0 & 0] & [\epsilon_n] & [0 & 0 & 0 & 0] \end{bmatrix}^T$

**Sensibilité = Calcul d'un rendu avec des sources particulières**

**Sensibilité à  $L^{\circ}(2)$**



**Sensibilité à  $L^{\circ}(6)$**

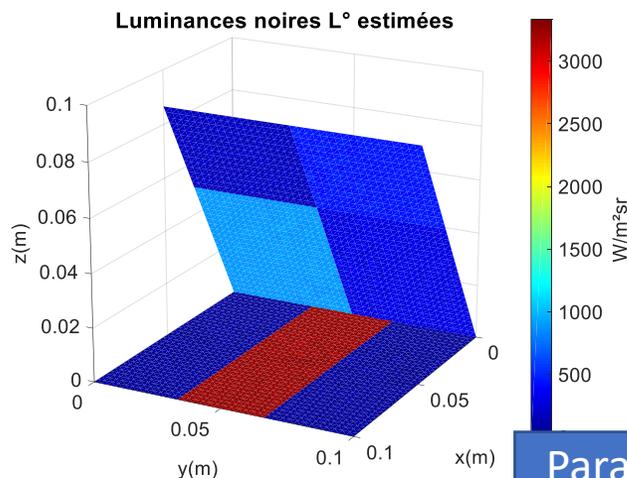
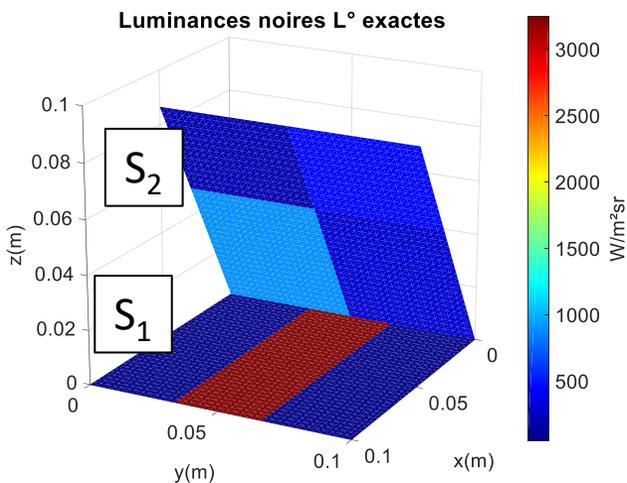


**Si on cherche seulement 7 températures (motifs thermique imposés) : 7 (+1) rendus à calculer**  
**Si on cherche 1 température par patch : 2 593 rendus à calculer**



# Résultat : 2592 températures estimées (une par patch 3D)

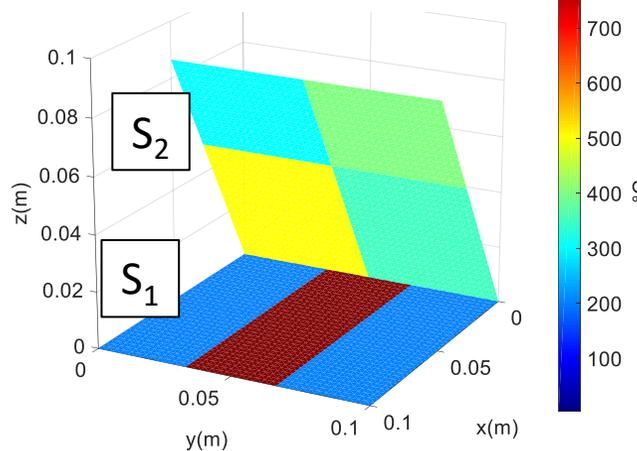
Paramètres estimés : luminances noires  $\hat{L}_i^0$  des patches 3D,  $i=1$  à 2592



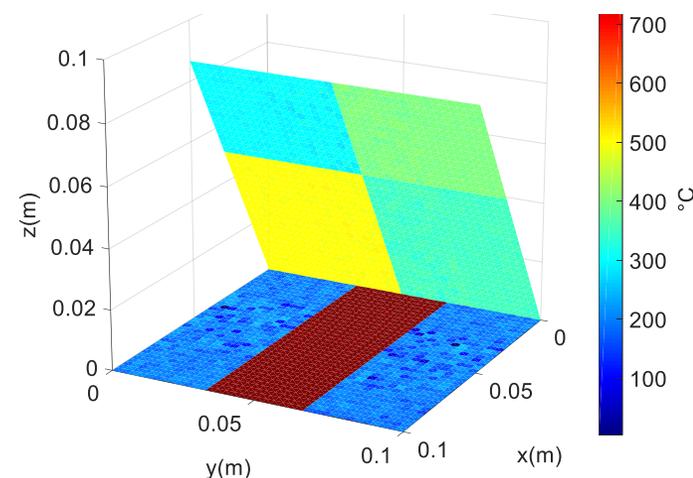
$$\hat{T}_i = \frac{C_2}{\lambda_0 \text{Ln} \left( 1 + \frac{C_1 \lambda_0^{-5} \Delta \lambda}{\hat{L}_i^0} \right)}$$

Paramètres déduits : températures  $\hat{T}_i$  des patches 3D,  $i=1$  à 2592

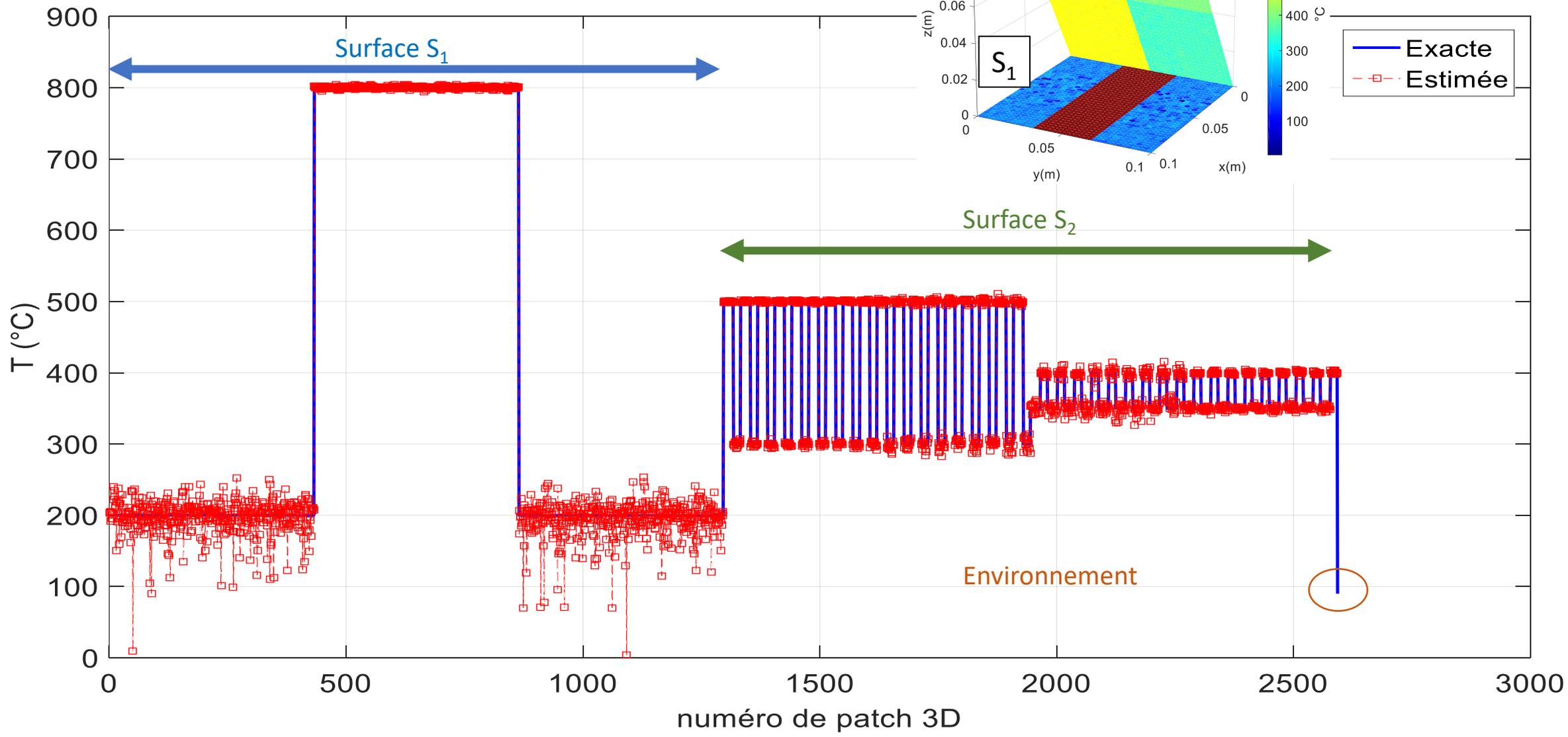
**Températures exactes**



**Températures estimées**



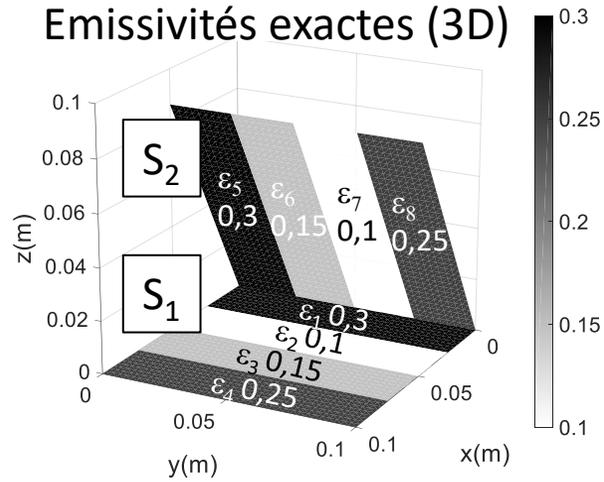
# Résultat : 2592 températures estimées



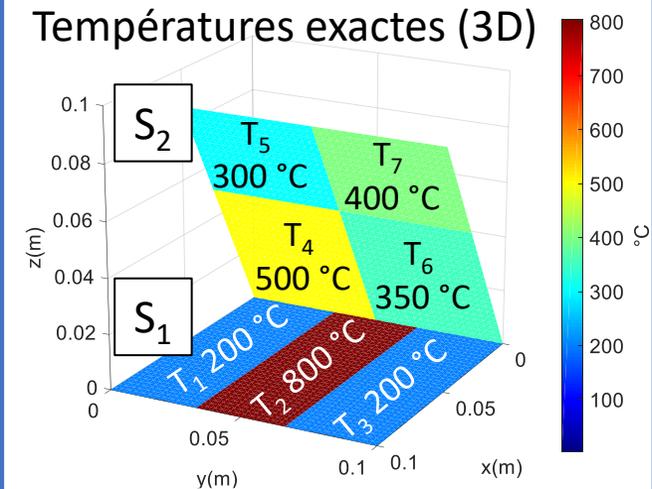
# Comparaison méthode classique vs pb inverse

## Scène exacte (« réelle »)

### Emissivités exactes (3D)



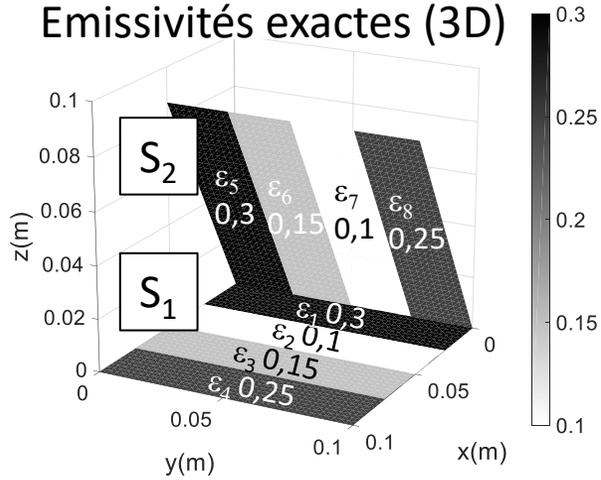
### Températures exactes (3D)



# Comparaison méthode classique vs pb inverse

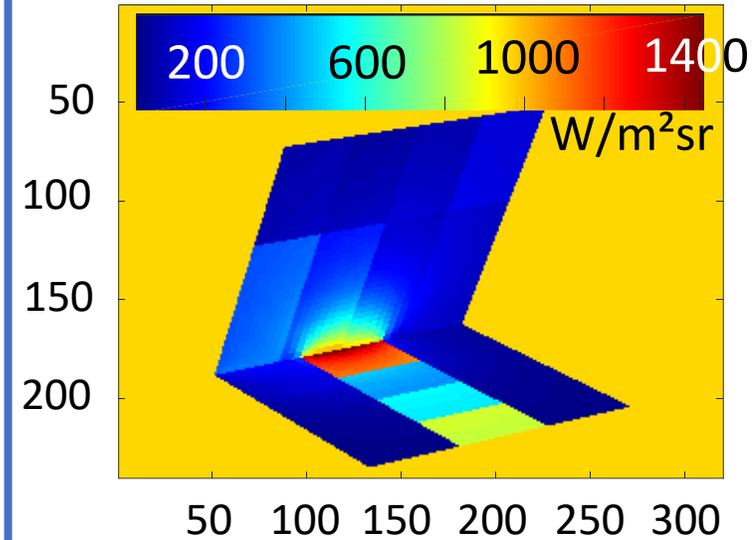
## Scène exacte (« réelle »)

### Emissivités exactes (3D)

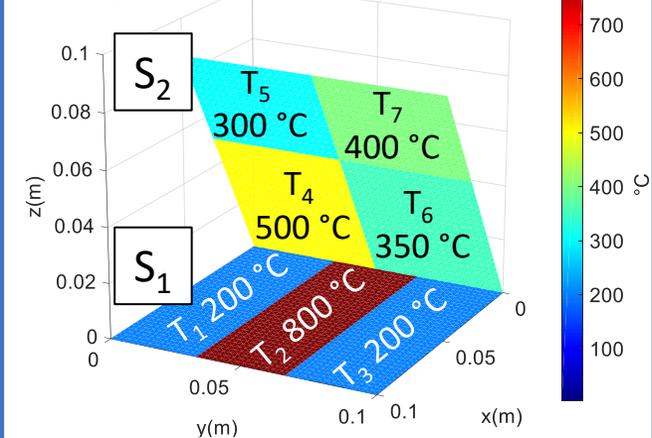


## Observable

### Image IR bruitée (2D)



### Températures exactes (3D)



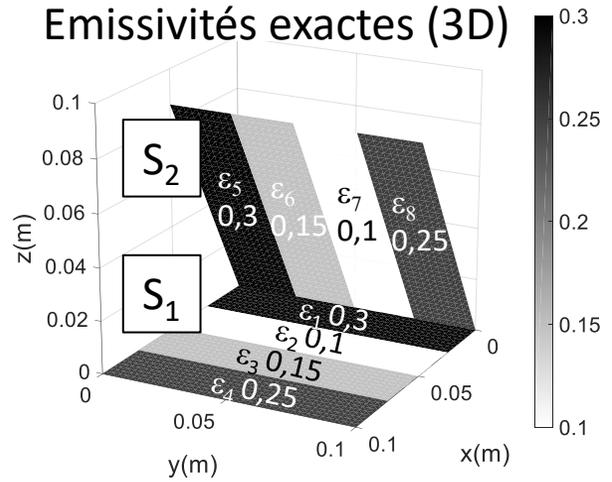
# Comparaison méthode classique vs pb inverse

Températures reconstruites

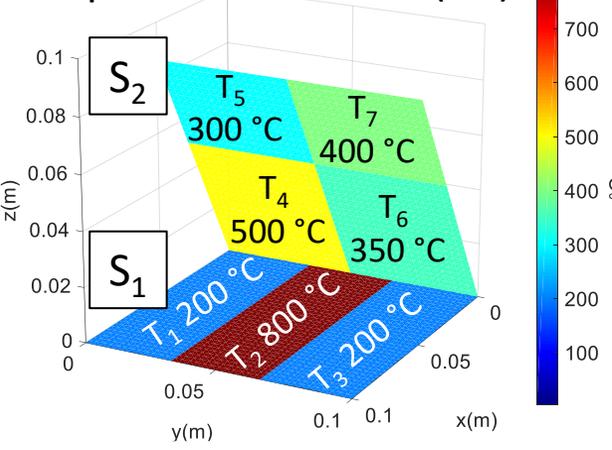
En 2D, via méthode classique

Scène exacte (« réelle »)

Emissivités exactes (3D)



Températures exactes (3D)



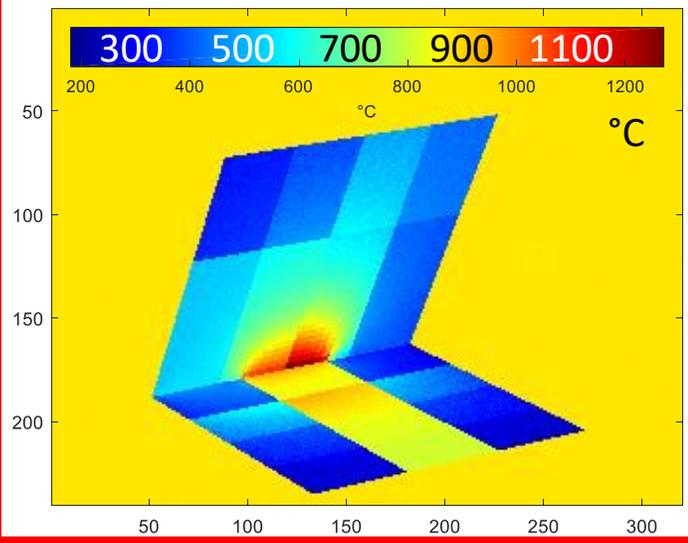
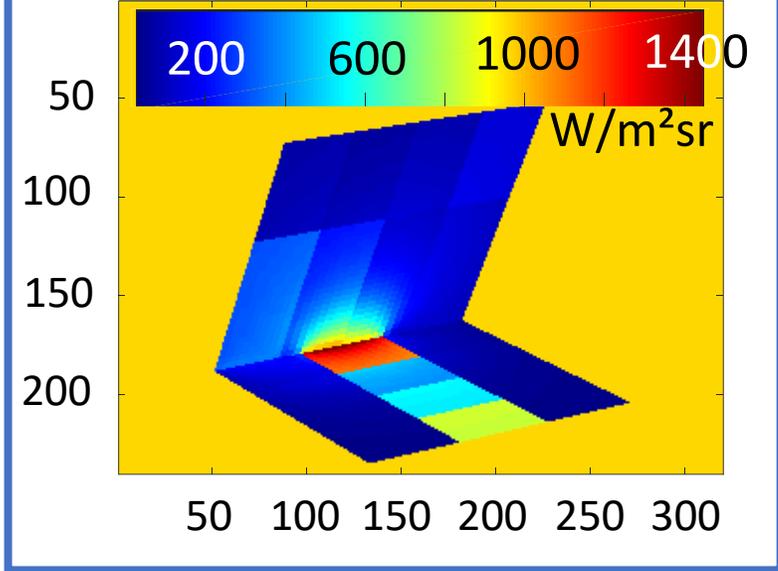
Reconstruction des T

dans l'espace image (2D)



Observable

Image IR bruitée (2D)



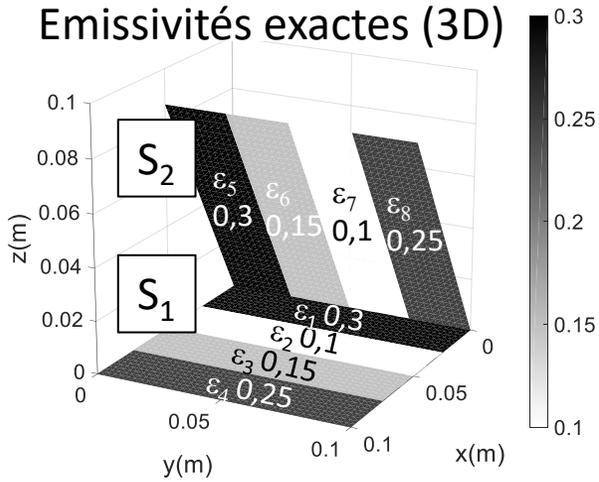
# Comparaison méthode classique vs pb inverse

Températures reconstruites

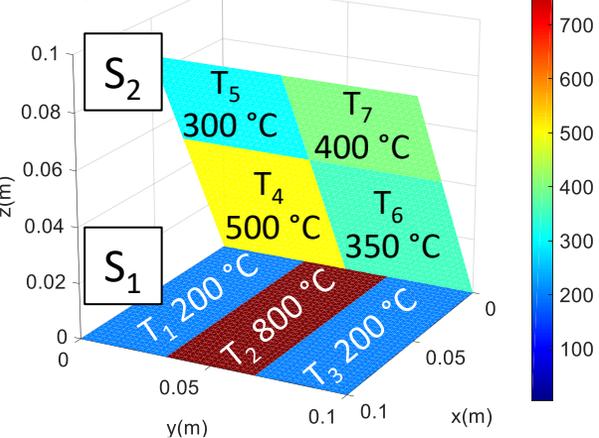
En 2D, via méthode classique

Scène exacte (« réelle »)

Emissivités exactes (3D)



Températures exactes (3D)



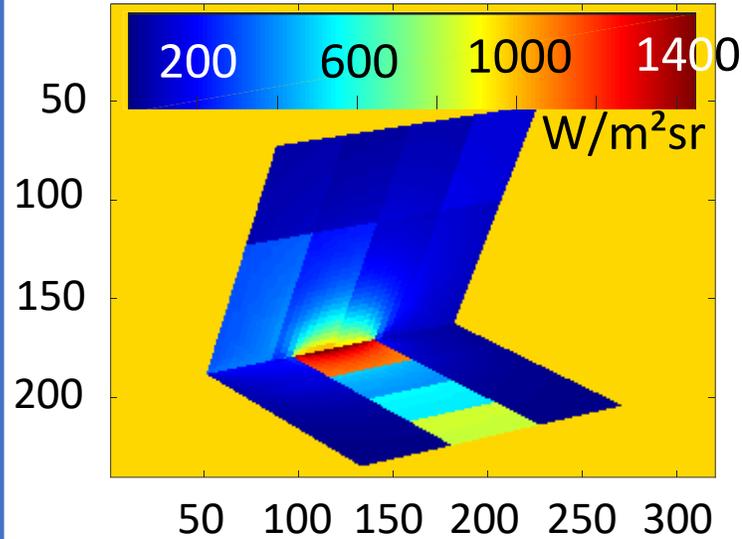
Reconstruction des T

dans l'espace image (2D)



Observable

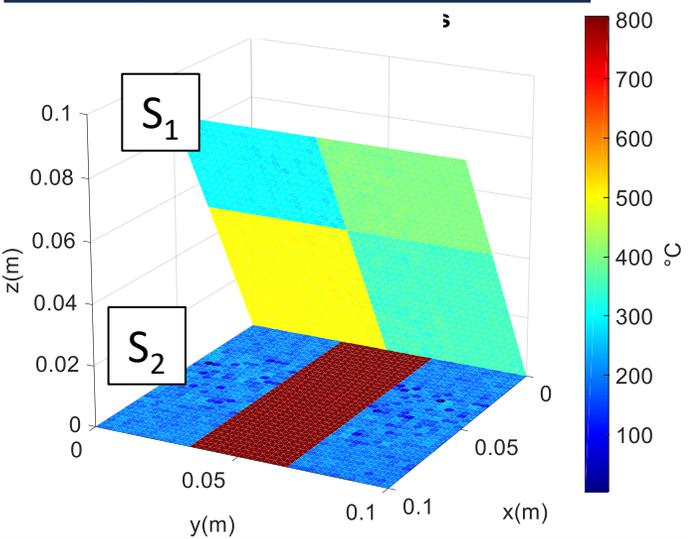
Image IR bruitée (2D)



Reconstruction des T

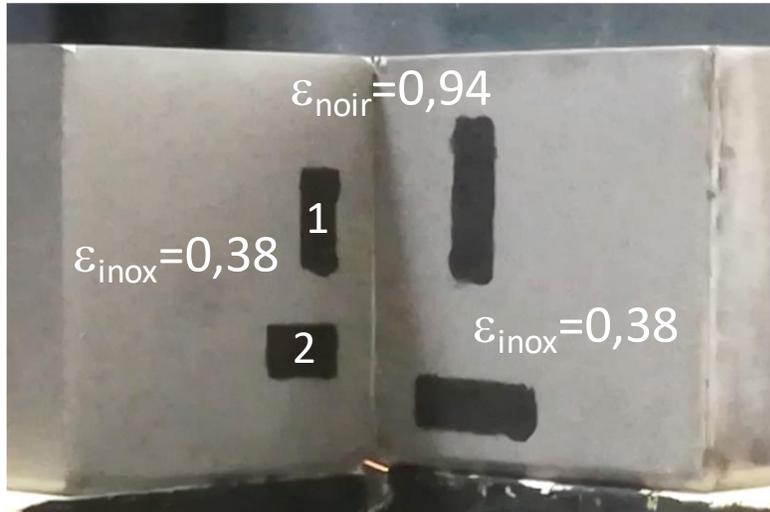
dans l'espace objet (3D)

En 3D, via Problème inverse



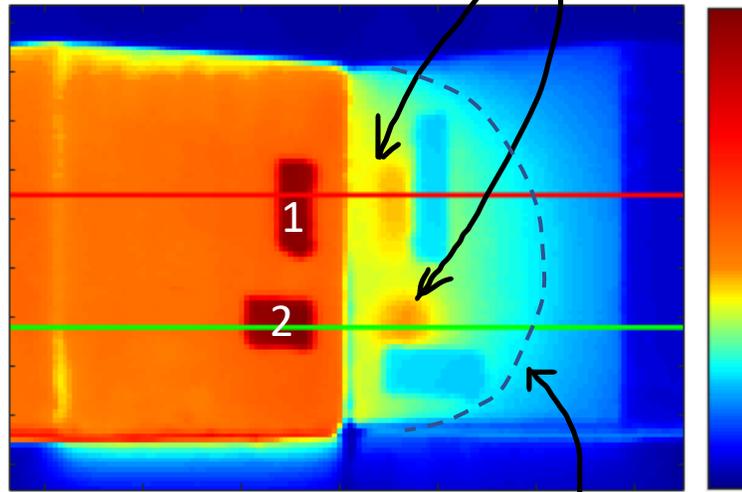
# Toy model expérimental et simulé : besoin de rendu plus réaliste (BRDF...)

Expérience (à l'IUSTI) avec réflexions multiples entre deux surfaces métalliques (Inox) à température uniforme (71 ° C à gauche 33 ° C à droite) et à émissivité uniforme et relativement faible sauf sur quelques taches de peinture noire.



a) Image visible. Les surfaces sont en inox sablé pour favoriser le comportement diffus.

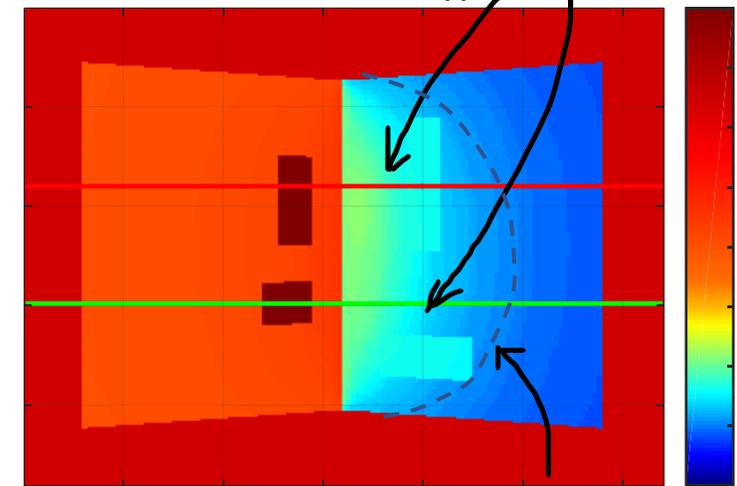
Reflets des motifs 1 et 2...



'halo' diffus + spéculaire

b) Image IR réelle. Certains gradients de luminance sur la face de droite sont dus à des réflexions de flux venant de la face de gauche

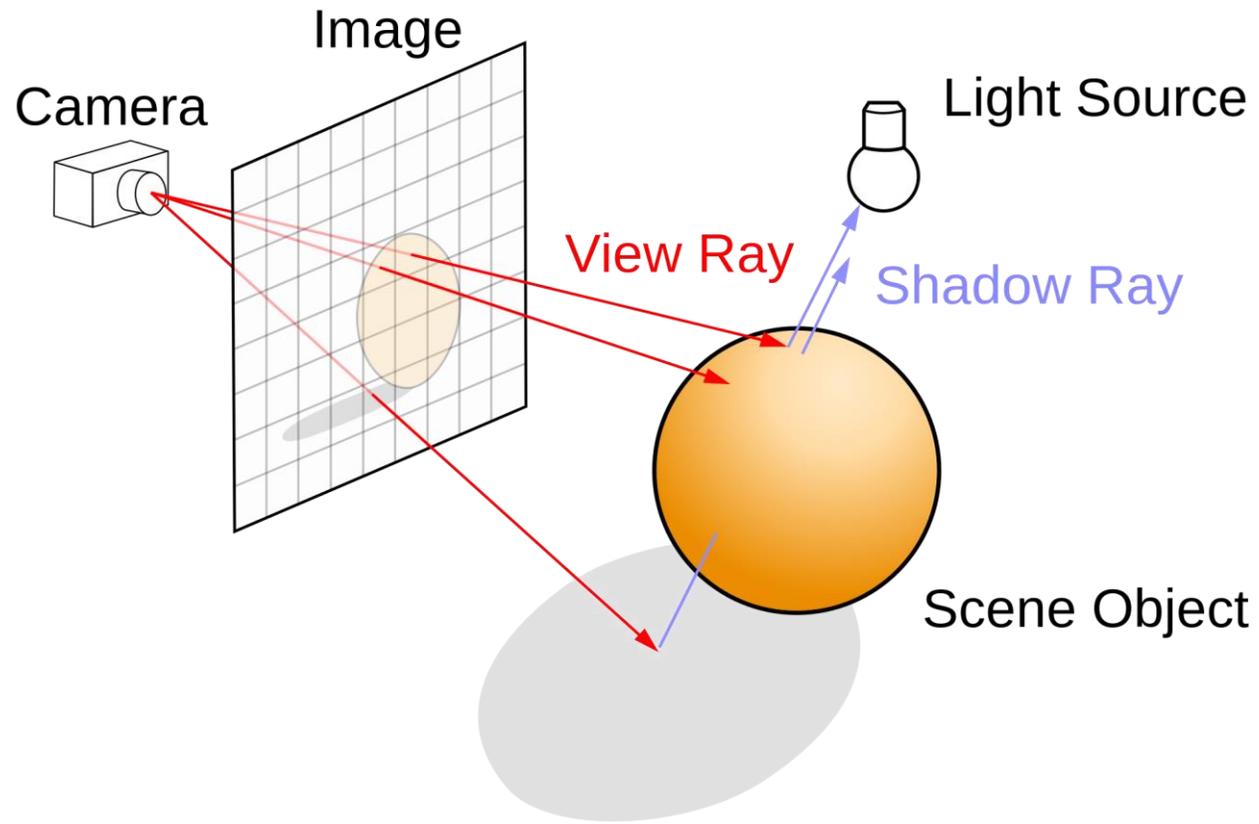
... mal reproduits en 'pur diffus'



'halo seulement diffus'

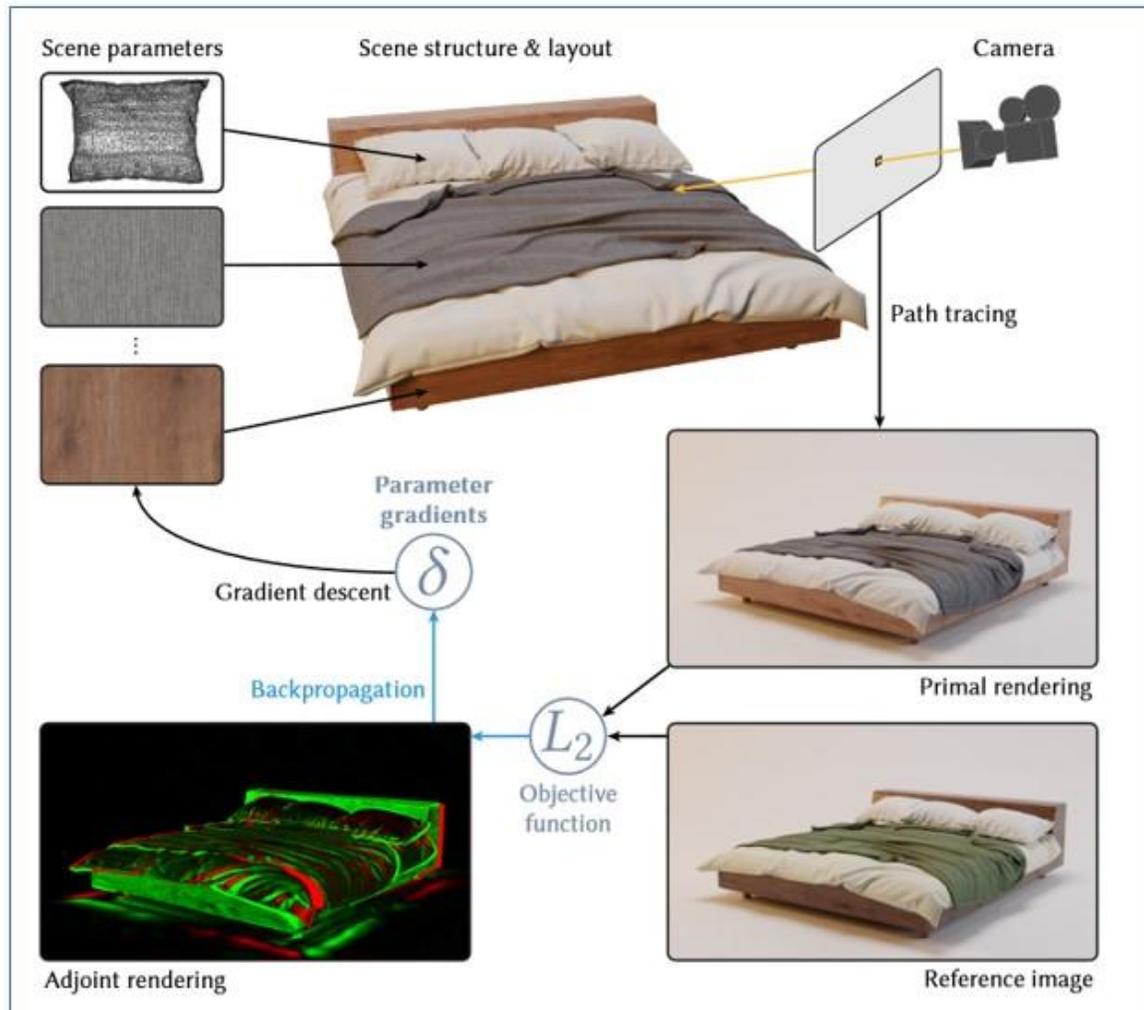
c) Image IR simulée : les motifs de réflexions ne sont pas parfaitement reproduits, sûrement à cause d'une part spéculaire dans les réflexions, non prise en compte ici.

# Pour un rendu plus réaliste : communauté de la synthèse d'image, calculs Monte Carlo



Différence majeure par rapport à notre approche :

- « calculer directement les pixels » au lieu de
- « calcul de toute la scène » + « projection particulière sur les pixels »



Ici dans le visible, recherche des BRDF de différents objets

[Thèse de Merlin Nimier-David \(EPFL, octobre 2022\)](#)

Differentiable Physically Based Rendering: Algorithms, Systems and Applications

[Wenzel Jacob](#), (EPFL, Lausanne, Suisse)

[Shuang Zhao](#) (University of California, Irvine, USA)

**Differentiable Rendering : savoir efficacement dériver les observables** (images) par rapport aux paramètres (pour nous : Températures, BRDF)

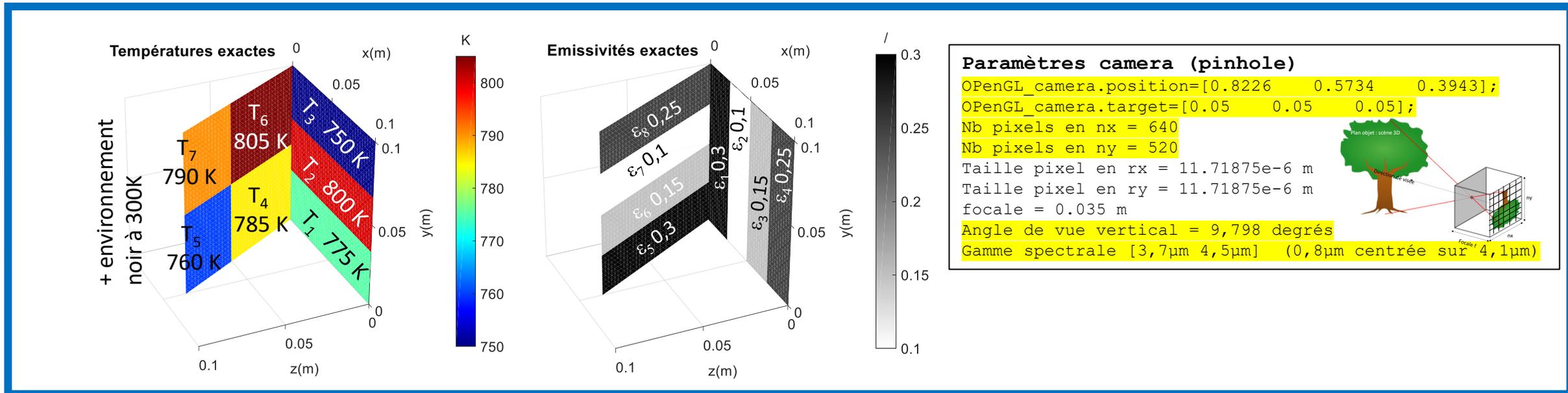
## Radiosités + OpenGL :

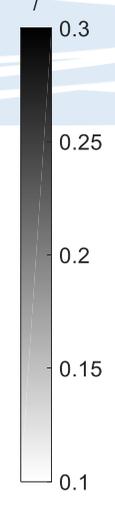
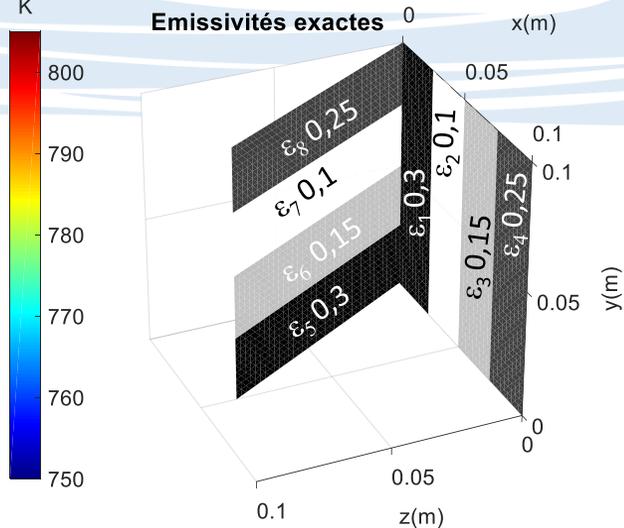
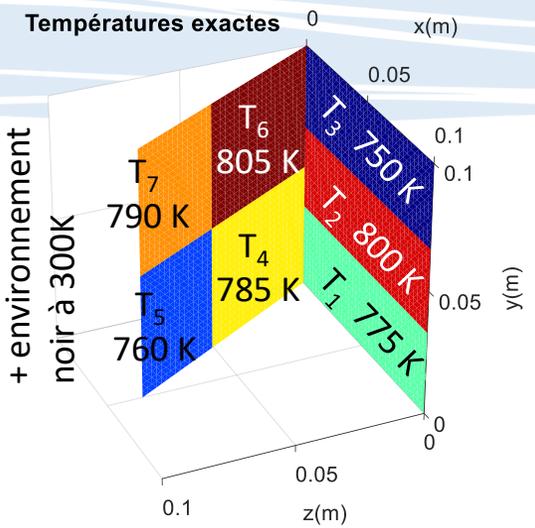
- On calcule toute la scène 3D
- Puis on projette une vue particulière
- Autant de calculs de rendus que de paramètres pour calculer la matrice de sensibilité

## Monte Carlo, Backward Ray tracing :

- On ne calcule que la vue souhaitée (l'observable expérimental)
- **Toutes les sensibilités aux paramètres sont calculées dans ce rendu**

DONNEES



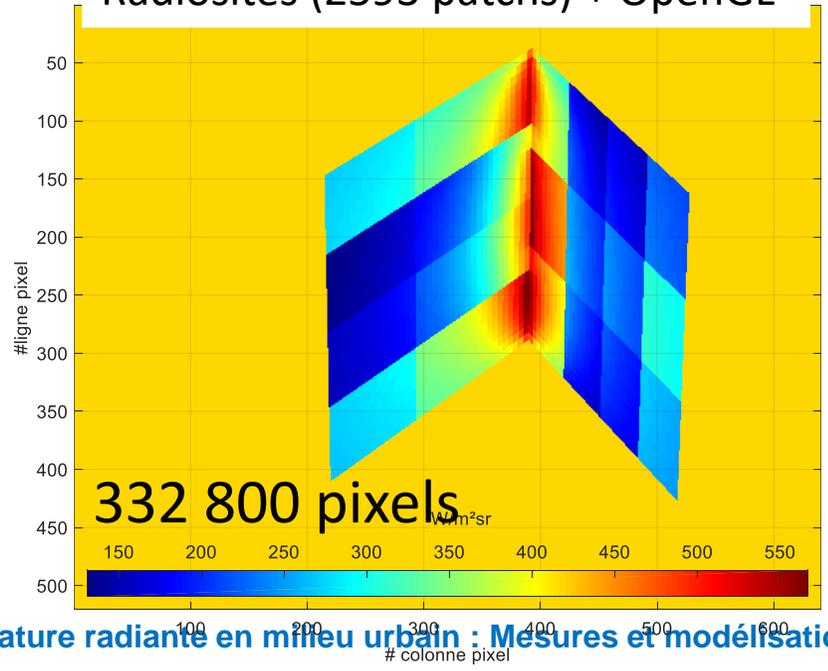


**Paramètres camera (pinhole)**

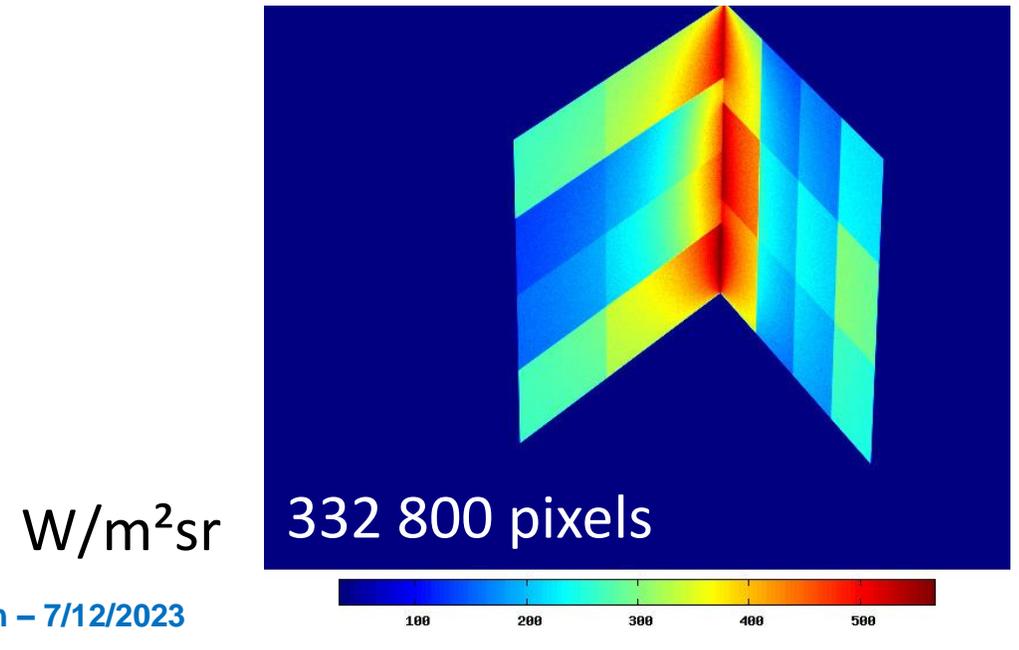
```

OpenGL_camera.position=[0.8226 0.5734 0.3943];
OpenGL_camera.target=[0.05 0.05 0.05];
Nb pixels en nx = 640
Nb pixels en ny = 520
Taille pixel en rx = 11.71875e-6 m
Taille pixel en ry = 11.71875e-6 m
focale = 0.035 m
Angle de vue vertical = 9,798 degrés
Gamme spectrale [3,7µm 4,5µm] (0,8µm centrée sur 4,1µm)
    
```

Radiosités (2593 patches) + OpenGL

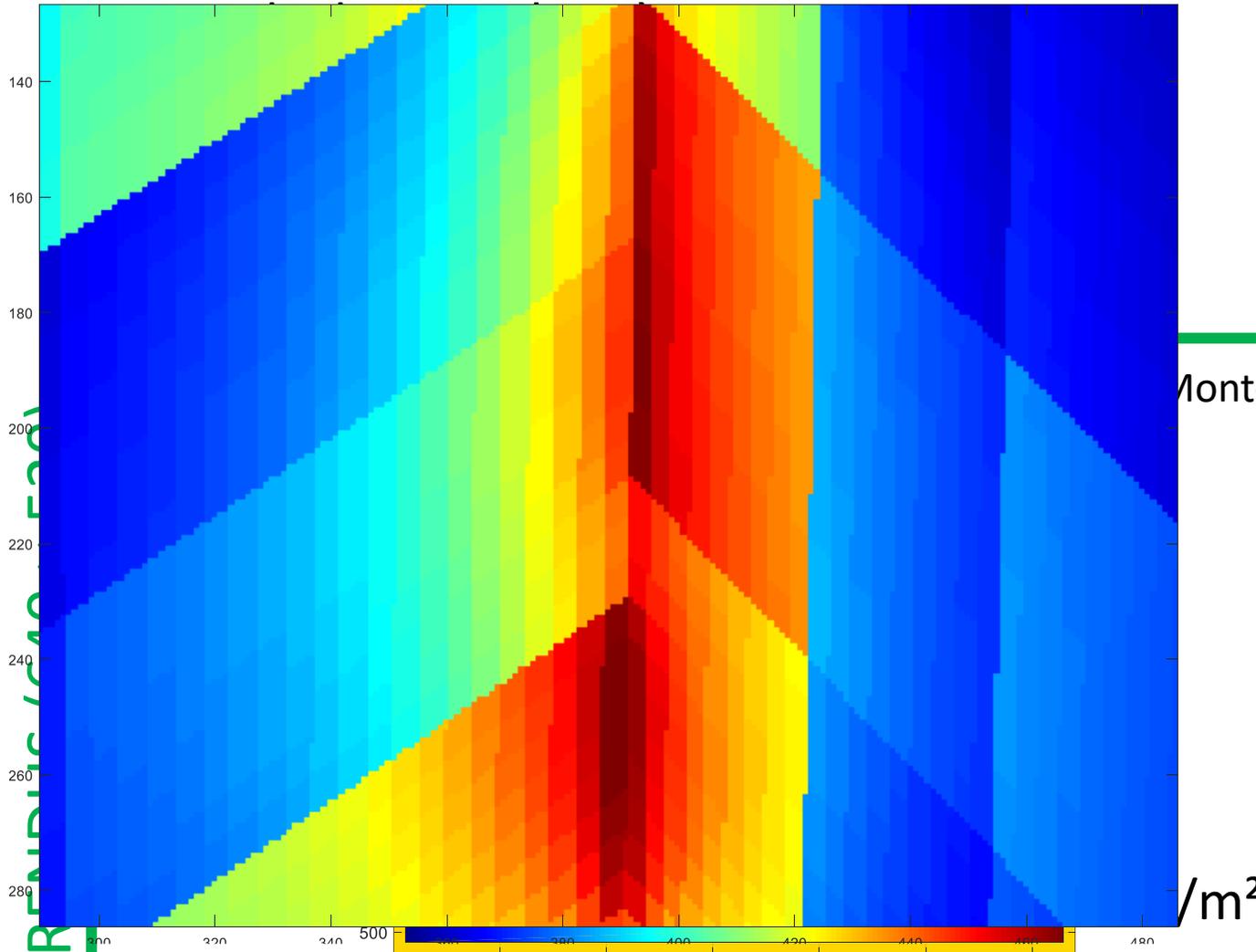


Monte Carlo, surfaces diffuses, 10 000 réalisations par pixels

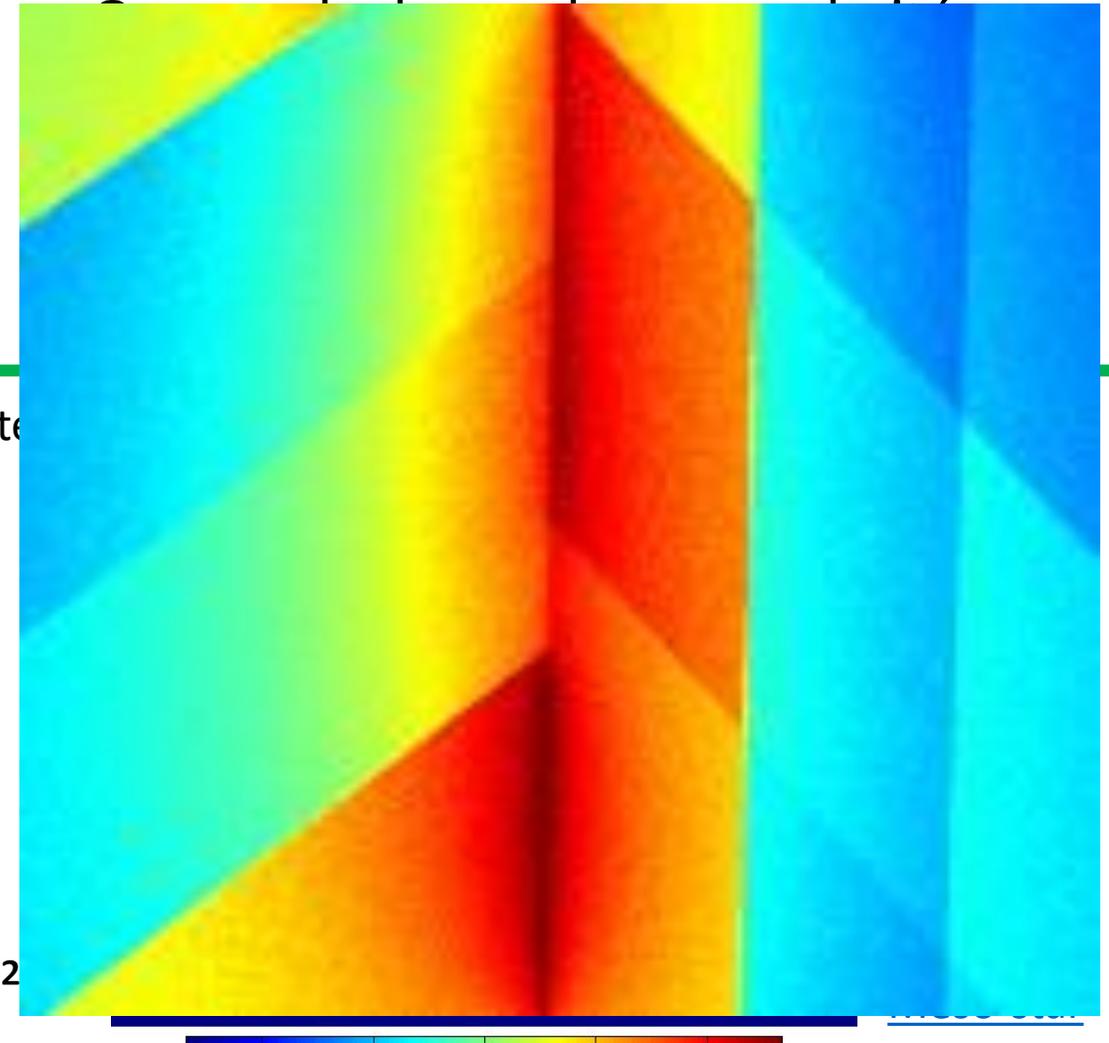


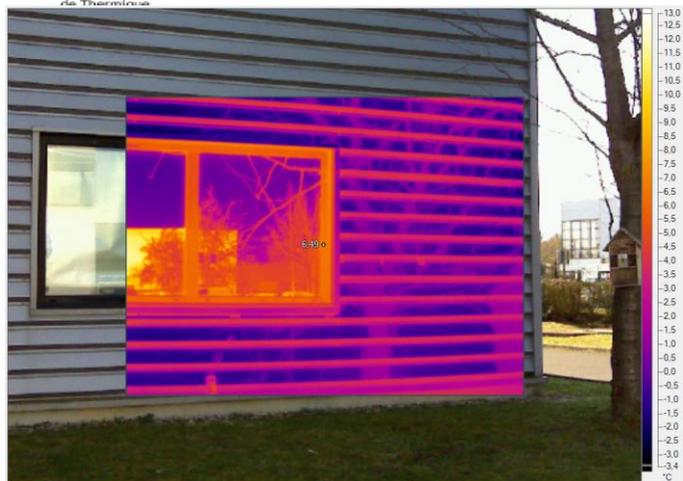
Calcul Meso-star  
(6 min sur laptop 8 cœurs)

## Radiosités + OpenGL :

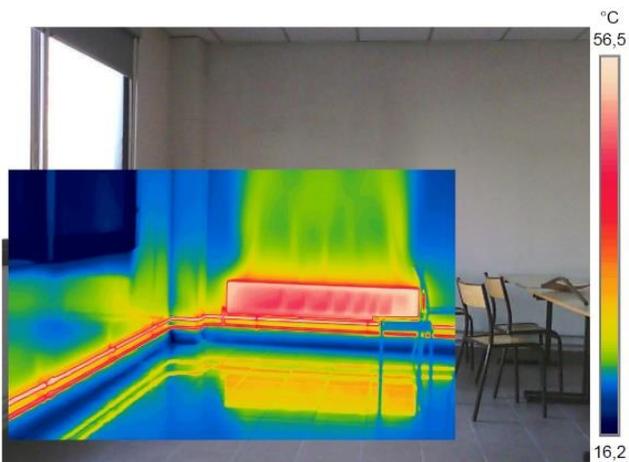


## Monte Carlo, Backward Ray tracing :

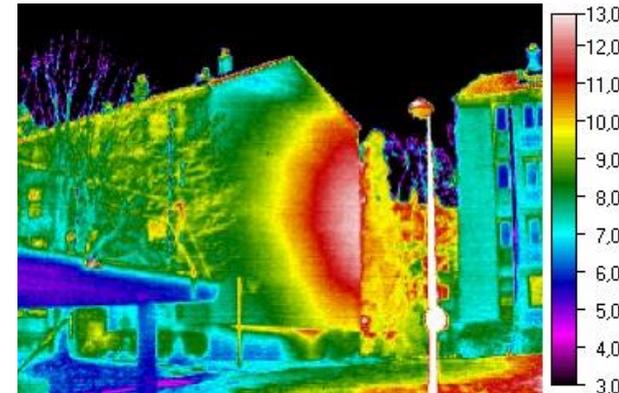




Laurent Ibos



Thermographie intérieure d'un bâtiment (Polytech Marseille). Les réflexions peuvent compliquer, le diagnostic thermique du sol et du mur de façade.



Thermographie extérieure d'un pignon de bâtiment. Le halo visualisé est une réflexion du flux partant du pignon d'en face exposé au soleil et peut compliquer la recherche de zones réellement chaudes, marqueuses de fuites thermiques. (D. Pajani, 'La thermographie du bâtiment : Principes et applications du diagnostic thermique', Ed.Eyrolles, 2012)

Problème inverse sur ces images? Besoins :

- géométrie et propriétés radiatives
- moteur de calcul de rendu **et de ses sensibilités!**

# Actualité à IUSTI (Jérôme Vicente) - CityVox : outil de simulation du microclimat urbain à haute résolution

Dimension de la scène : 722 x 462 x 102 voxels;

Taille de maille : 50cm

Triangles : 3 526 782; Voxels de calculs : 1 618 242

Classification automatique des matériaux



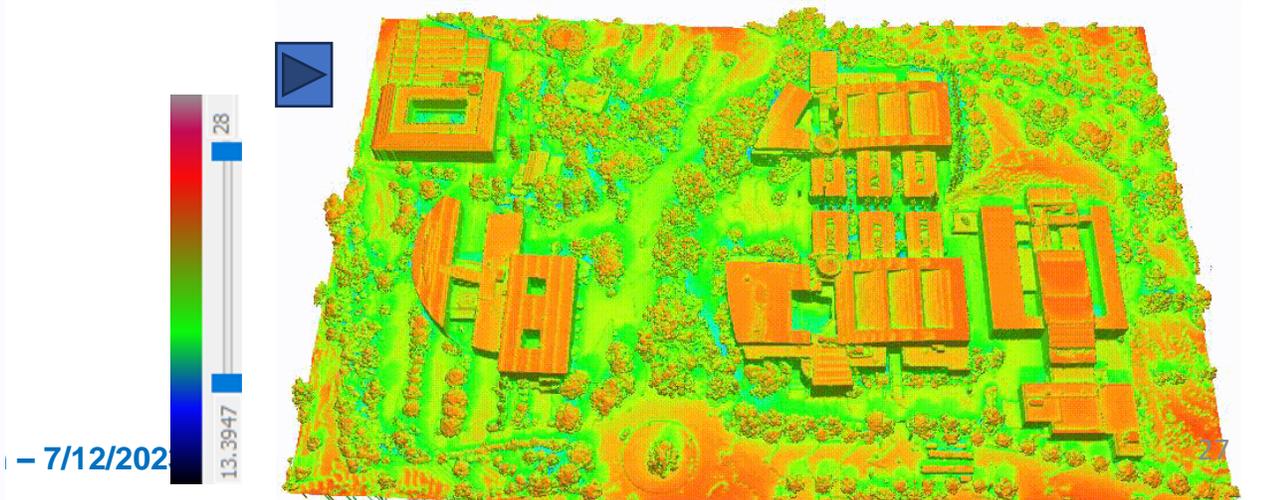
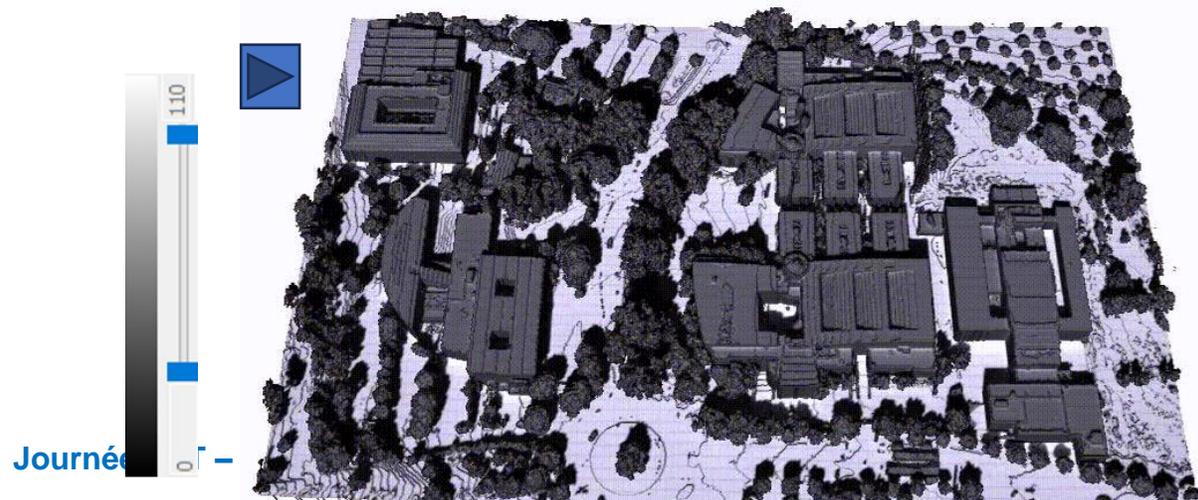
Calcul d'une exposition (multi-réflexions) : ~35 sec  
densité : 225 rayons/ m<sup>2</sup>

Calcul des facteurs de vue du ciel (150 directions) < 5mn



Calcul des facteurs d'échanges (150 directions) ~10minutes

Températures : Calcul d'un pas de temps <4 sec ( 1 cœur)





# Conclusion

- « Thermographie inverse » = utilisation d'un modèle radiatif 'end-to-end' (des surfaces de la scène 3D vers les pixels de l'image 2D) pour estimer les températures de la scène 3D.
- ce modèle est celui utilisé pour produire un « rendu » de la scène, ici dans l'infrarouge. Il tient compte des échanges radiatifs dans la scène (émission et réflexions multiples) ainsi que de la collecte de flux par la caméra virtuelle
- l'estimation des températures s'obtient en résolvant un problème inverse : minimisation entre rendu réel et rendu modélisé, sur des pixels d'intérêt (pas forcément toute l'image). La méthode de type « gradient » a besoin de calculer les sensibilités du rendu (son jacobien) aux paramètres à estimer.
- ce problème est linéaire si les grandeurs cherchées sont les luminances noires  $L^\circ$  des surfaces à  $T$ , en supposant les propriétés radiatives (émissivités ici) connues, résolution sans itération, sensibilités calculées une seule fois.
- ce problème est non-linéaire si les températures sont connues et que les émissivités sont cherchées : minimisation itérative, sensibilités recalculées à chaque itération.
- perspective : mettre à profit les outils de la synthèse d'image (rendu par Monte Carlo), pour simuler des situations réalistes avec BRDF non lambertiennes notamment. Utiliser plusieurs vues d'une même scène.
- perspective déjà développée par le CEA/IRFM pour le problème inverse en Tokamak : utilisation de réseaux de neurones
- en milieu urbain : besoin de connaître la géométrie et les propriétés radiatives des surfaces observées. Principe proche de l'utilisation de DART en *differentiable rendering* (voir présentation de Y. Wang et J. L. Tavares « DART: a 3D radiative transfer model for urban studies »)

## Références

### Inversion en Tokamak, avec méthode de gradient

- M-H. Aumeunier *et al.*, Infrared thermography in metallic environments of WEST and ASDEX Upgrade, [Nuclear Materials and Energy, 2021](#)
- C. Talatizi *et al.*, Inverse radiation problem with infrared images to monitor plasma-facing components temperature in metallic fusion devices, [Fusion Engineering and Design, 2020](#)
- C. Talatizi *et al.*, Solving the infrared reflections contribution by inversion of synthetic diagnostics: First results on WEST, [Fusion Engineering and Design, 2021](#)
- C. Talatizi, Vers une mesure thermique maîtrisée pour la protection des composants face au plasma métalliques d'un Tokamak : expérimentation et modélisation photonique, [PhD AMU/CEA, 2021](#)

### Inversion en Tokamak, avec réseaux de neurones

- M.-H. Aumeunier, A. Juven, Réseaux neuronaux convolutifs pour la thermographie quantitative en environnement complexe, [Journée SFT-Groupe METTI](#) « Inversion de données faisant appel à un modèle en thermique, quels apports de l'intelligence artificielle ? », 8 juin 2023, Paris
- A. Juven *et al.*, U-Net for temperature estimation from simulated infrared images in tokamaks, [Nuclear Materials and Energy, 2024](#)
- M-H. Aumeunier *et al.*, Surface Temperature measurement from infrared synthetic diagnostic in preparation for ITER operations, Fusion Conference, London, Oct. 2023, pub. in Nuclear Fusion (2024)
- M-H. Aumeunier *et al.*, Development of inverse methods for infrared thermography in fusion devices, [Nuclear Materials and Energy, 2022](#)

### Inverse rendering, Differentiable rendering (dans le visible)

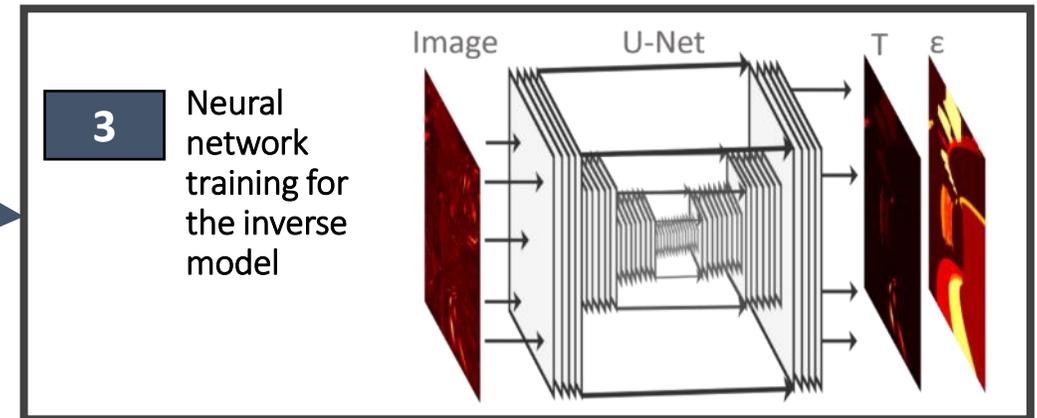
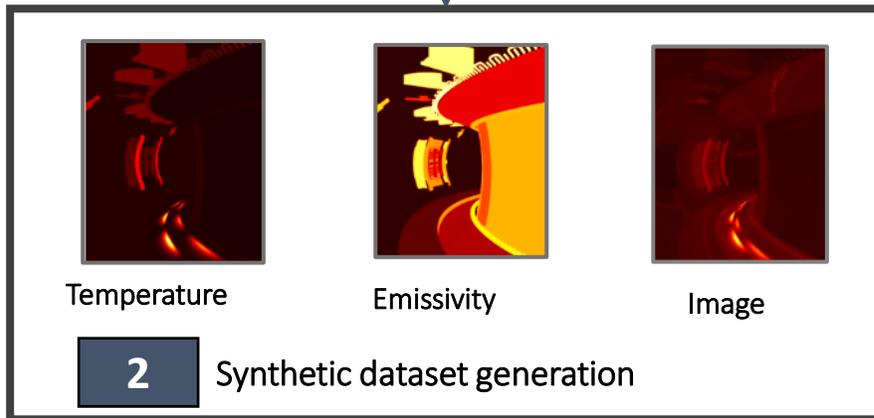
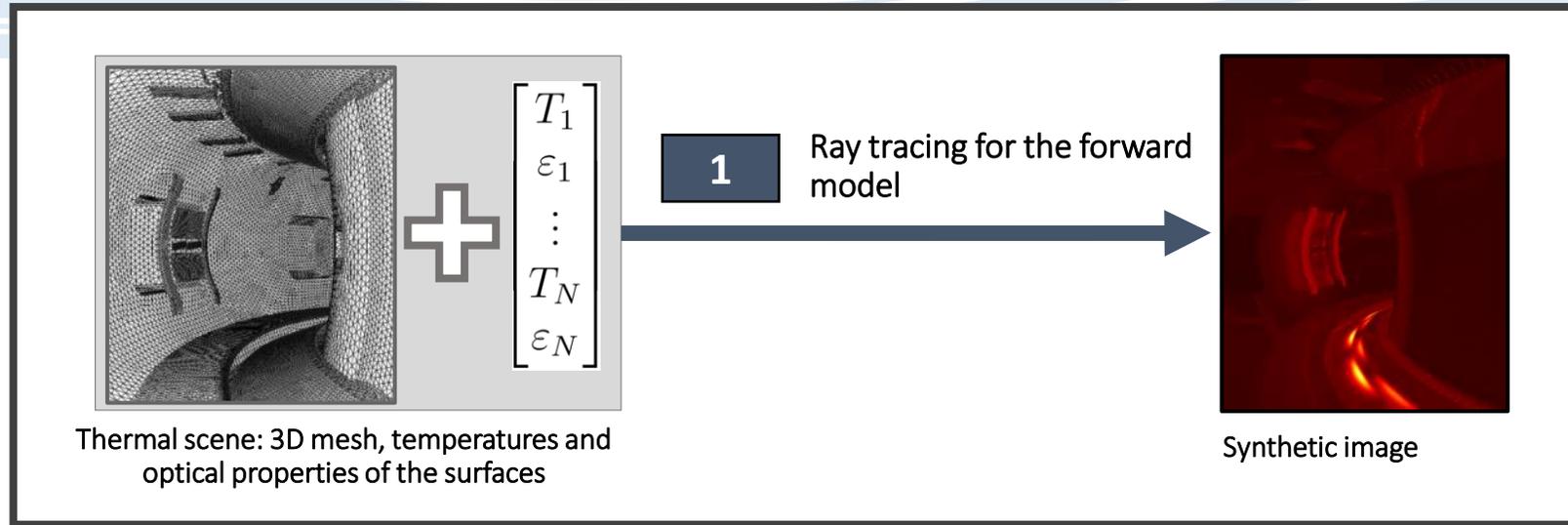
- C. Loscos *et al.*, Inverse Rendering: From Concept to Applications, [Eurographics 2006](#)
- Merlin Nimier-David, Differentiable Physically Based Rendering: Algorithms, Systems and Applications. [Thèse EPFL](#) (Suisse), octobre 2022
- [Site de Wenzel Jacob](#), leading the Realistic Graphics Lab at EPFL's School of Computer and Communication Sciences
- [Site de Shuang Zhao](#), University of California, Irvine (UCI, USA), co-direct UCI's Interactive Graphics & Visualization Lab (iGravi)

### Formulation en espace de chemins statistiques, Utilisation des outils de synthèse d'image appliqués à la modélisation des transferts thermiques

- Plateforme ED Star : <http://www.demonstrator.edstar.cnrs.fr/prod/fr/>
- Entreprise | Mésos | Star > : <https://www.meso-star.com/>
- N. Villefranque *et al.*, The “teapot in a city”: A paradigm shift in urban climate modeling. [Science advances, 2022](#)

# Compléments

# Model inversion from simulation-assisted machine learning



- Présenté à : [Journée SFT-Groupe METTI](#) « Inversion de données faisant appel à un modèle en thermique, quels apports de l'intelligence artificielle ? », 8 juin 2023, Paris.

- A. Juven *et al.*, U-Net for temperature estimation from simulated infrared images in tokamaks, Nuclear Materials and Energy, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101562>

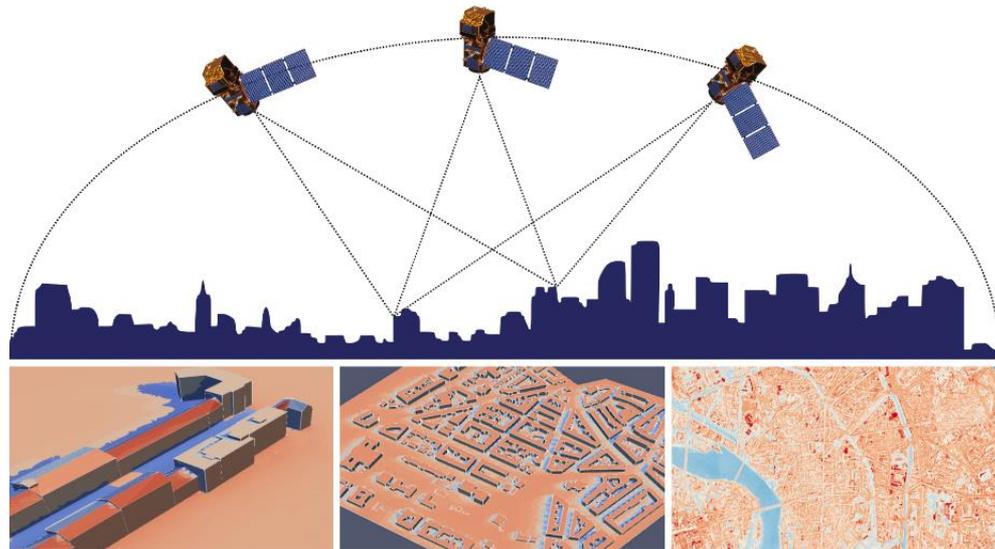
# Téledétection IRT spatiale : application au milieu urbain

**Laure Roupioz, Xavier Briottet**

*ONERA, Toulouse*

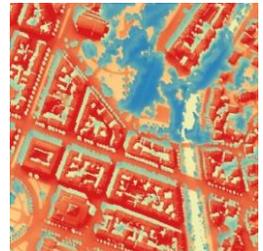
**Auline Rodler**

*CEREMA, Nantes*



# Sommaire

- Principes de la mesure par télédétection et particularités liées aux milieux urbains
- Défis pour l'estimation de la température de surface et de l'émissivité en milieu urbain
- Utilisation de données de télédétection IRT pour l'étude du climat urbain



# Les milieux urbains et la télédétection

---

## Température de surface déductible des données de télédétection optique

- Diagnostiquer le comportement thermique des villes (ICUS  $\neq$  ICU)
- Grâce à un échantillonnage spatio-temporel régulier :
  - Vue instantanée de l'ensemble d'une agglomération
  - Suivi multi temporel
  - Capacité à appréhender les effets de la géométrie urbaine et de son hétérogénéité

# Principes de la mesure par télédétection

## Télédétection infrarouge thermique dans le système Terre - atmosphère

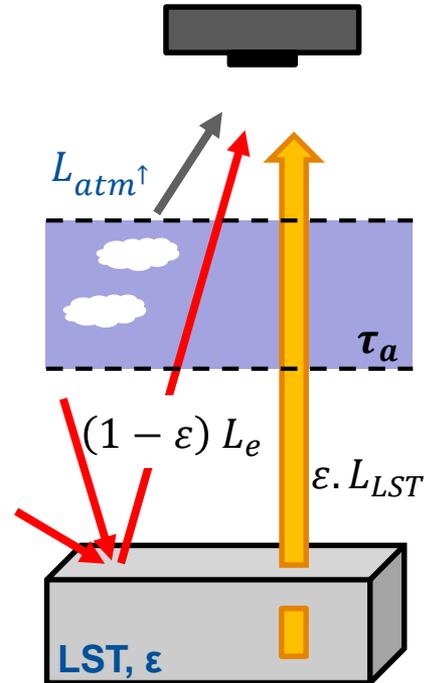
Mesure du rayonnement émis par un objet (flux radiatif en  $W/m^2/\mu m/sr$ ) afin de dériver sa température de surface (LST)

- Emissivité de l'objet (capacité à émettre de l'énergie radiative)
- Contribution de l'environnement (atm., nuages, objets environnants)

$$L_m = \tau_a \cdot \epsilon \cdot L_{LST} + \tau_a \cdot (1 - \epsilon) L_e + L_{atm\uparrow}$$

**Mesure IRT** : jour/nuit, flux émis plus faible, sensible à l'atmosphère, forte anisotropie

**LST** : forte variabilité spatiale et temporelle, effets de turbulence, impact de la structure 3D de la surface



# Principes de la mesure par télédétection

## Importance de l'émissivité

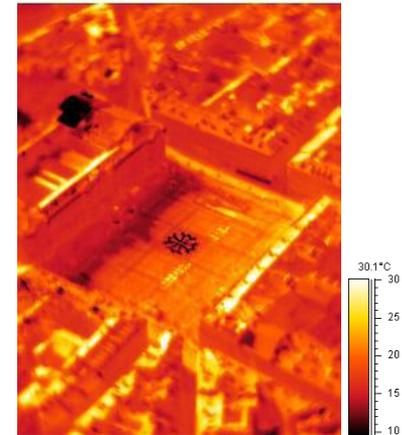
$$L_M = \tau_a \cdot \epsilon \cdot L_{LST} + L_{e\uparrow} + \tau_a(1 - \epsilon) L_{e\downarrow}$$

Matériaux	Emissivité moyenne (8-14 $\mu\text{m}$ )
Eau claire	0.98-0.99
Bois	0.93-0.94
Verre	0.77-0.81
Métal poli	0.16-0.21
Pavé en grès	0.90-0.93

Sur une image IRT, différentes températures de brillance ne signifient pas forcément que les objets ont une température de surface différente



Source: Dr. Claudia Künzer



Températures de brillance aéroportées  
11/07/2004, 10h (heure locale)

# Algorithmes d'estimation de la LST

## Méthodes opérationnelles pour l'estimation de la LST à partir d'images IRT

### Split-window (Becker and Li – 1990)

- Utilise deux bandes spectrales (radiance TOA)
- Emissivité à fournir en entrée

### Temperature and emissivity separation TES (Gillespie - 1998)

- Nécessite min 3 bandes spectrales et une correction atmosphérique (radiance BOA)
- Estimation simultanée de l'émissivité et de la température de surface

### Dual-angle (Sobrino - 1996)

- 1 bande spectrale et deux angles d'observation
- Problème en cas de relief

- ➔ Différents produits de LST et LSE disponibles
- ➔ Précision ~1K sur les surfaces naturelles

# Capteurs actuels et à venir (non exhaustif)

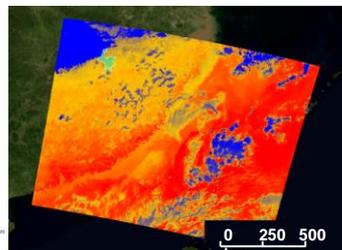
	ASTER (NASA/METI)	Landsat 9 (NASA)	MODIS (NASA)	Sentinel 3 (ESA/EUMETSAT)	MTG-I (EUMETSAT)	TRISHNA (CNES/ISRO)	SBG (NASA)	LSTM (ESA)
Résolution spatiale	90 m	100 m	1 km	1 km	2 km	60m	60m	50m
Résolution temporelle	16 jours	16 jours	2 x par jour	1 jour	10 minutes	3-4 jours	3-4 jours	4 jours
Nb de bandes (8-14 $\mu\text{m}$ )	5	2	8	2	7	4	5	5
Date de lancement	1999	2021	1999	2016	2022	2025	2027	2028

+ ECOSTRESS (ISS)

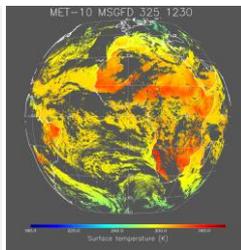
+ Constellations (new space)



ASTER LST



Sentinel 3 LST



MeteoSat 10 LST

- ➔ Actuel : Compromis spatio-temporel
- ➔ A venir : meilleures résolutions spatiale et temporelle + complémentarité entre missions

# Estimation de la LST en milieu urbain

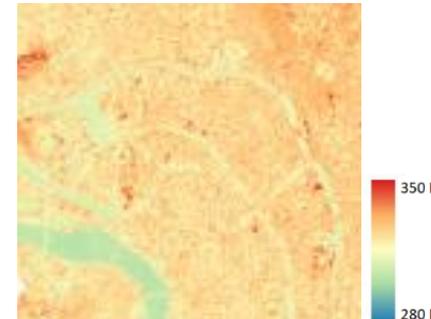
## Complexe d'estimer la LST en milieu urbain

- Résolution spatiale : pixels purs/mixtes
- Adéquation entre résolutions spatiale et temporelle
- Forte variabilité de l'émissivité (naturels/artificiels)
- Structure 3D complexe de la surface:
  - ➔ Effets directionnels
  - ➔ Effet 'cavité': réflexions multiples, diffusion de la canopée urbaine

## Impact du changement d'échelle sur la mesure IRT

- Signification différente des températures et paramètres de surface ( $\alpha$ ,  $\epsilon$ , ...) selon l'échelle : matériau élémentaire ➔ bâtiment ➔ quartier

Exemple de l'émissivité :  $\epsilon_{\text{matériau}} \neq \epsilon_{\text{canopée urbaine}}$  (effet cavité)

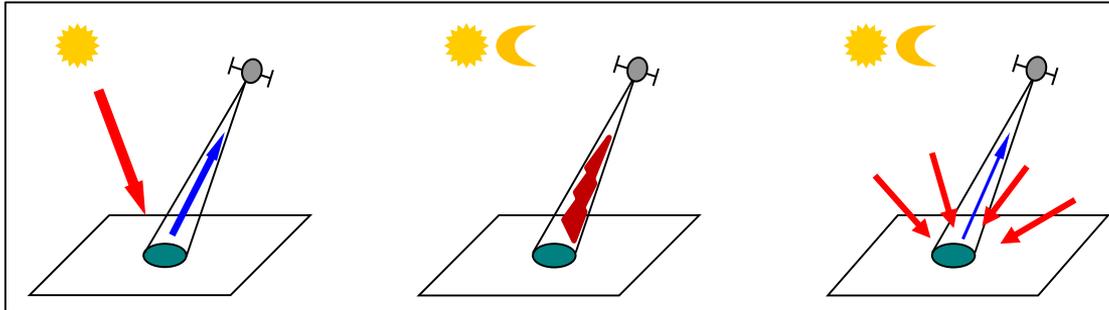


# Transfert radiatif [8-14 $\mu\text{m}$ ]

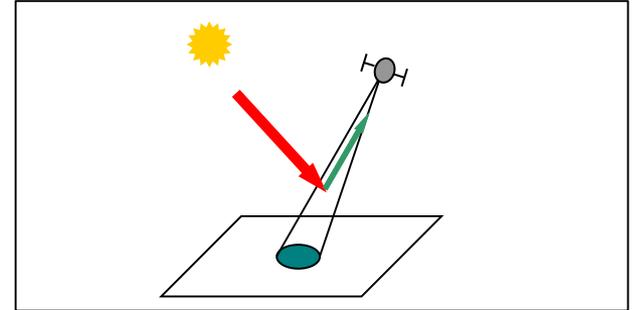
## Modélisation du transfert radiatif 3D dans une scène urbaine

- Analyser les processus radiatifs au sein de la canopée urbaine
  - Identifier les différentes contributions au signal et évaluer leur impact sur la mesure à différentes échelles
- Développer des méthodes d'estimation adaptées et évaluer l'incertitude

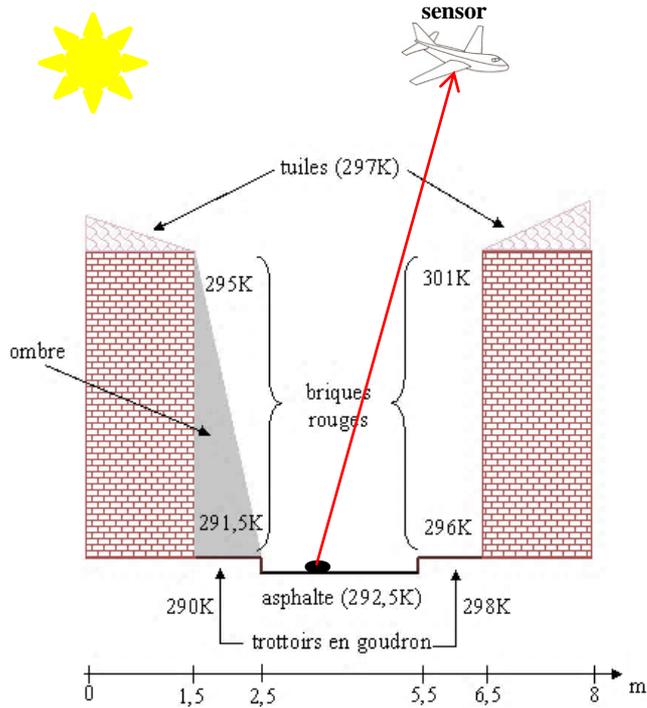
Luminance provenant de la cible



Luminance ne provenant pas de la cible

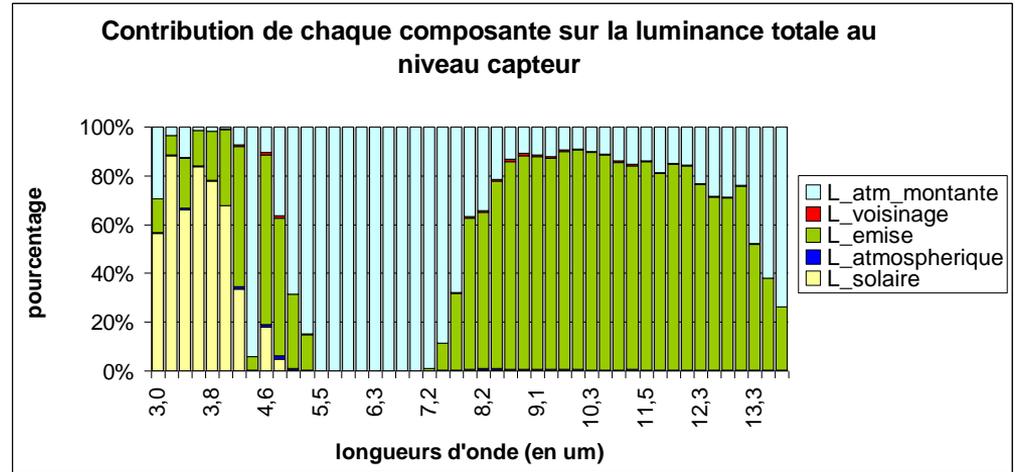


# Transfert radiatif [8-14 $\mu\text{m}$ ]



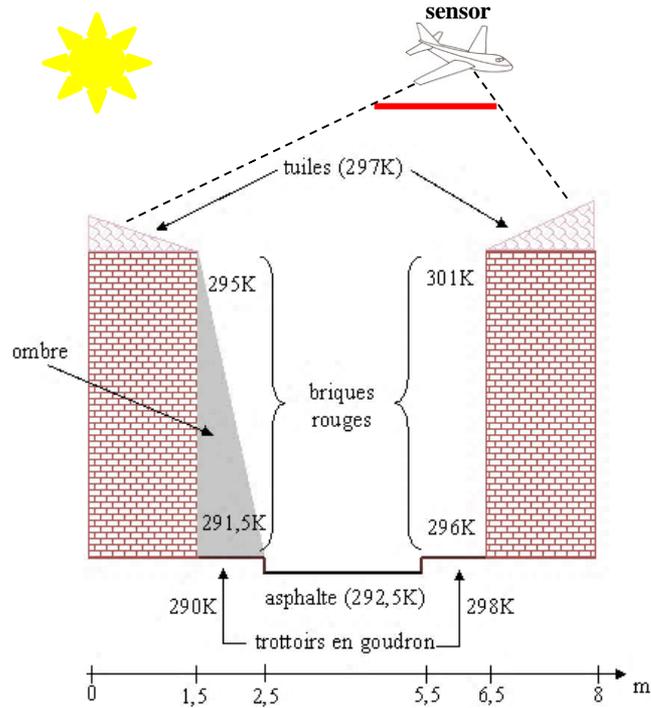
## Analyse radiative à l'échelle du canyon

### ➤ Décomposition au niveau capteur



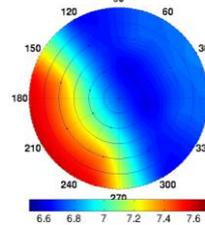
Fontanilles et al. 2008. TITAN : an Infrared Radiative Transfer Model for Heterogeneous 3D Surface - Application over Urban Areas, *Applied Optics*, 47(31)

# Transfert radiatif [8-14 $\mu\text{m}$ ]

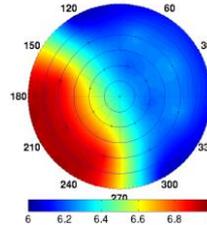


## Effets directionnels ( $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}^{-1}$ )

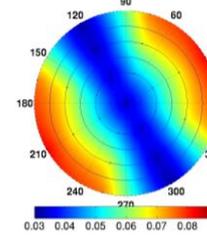
Luminance capteur à 8,6  $\mu\text{m}$



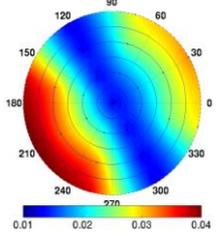
Luminance émise



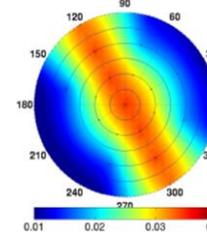
Luminance solaire



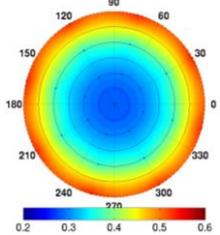
Luminance atmosphérique



Luminance due au voisinage



Luminance atm. montante

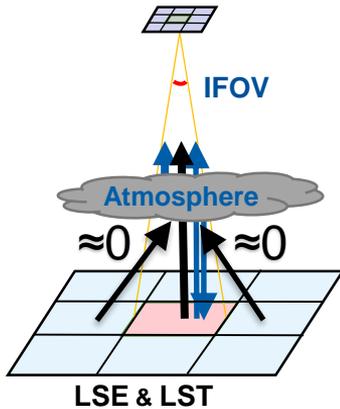


Fontanilles et al. 2008. TITAN : an Infrared Radiative Transfer Model for Heterogeneous 3D Surface - Application over Urban Areas, *Applied Optics*, 47(31)

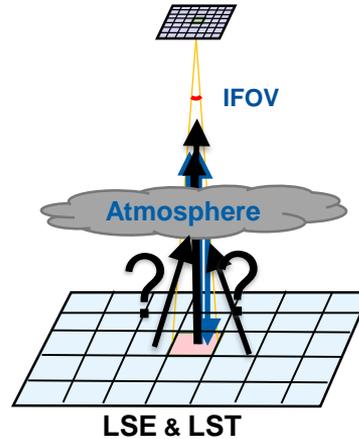
# Transfert radiatif [8-14 $\mu\text{m}$ ]

## Analyse radiative à l'échelle du satellite

Résolution spatiale *basse*  
(GSD > 100 m)

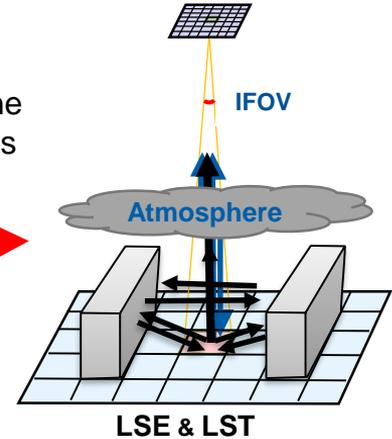


Résolution spatiale *haute*  
(GSD < 100 m)



Certains effets radiatifs ne peuvent pas être négligés

- Effet d'adjacence
- Structure 3D



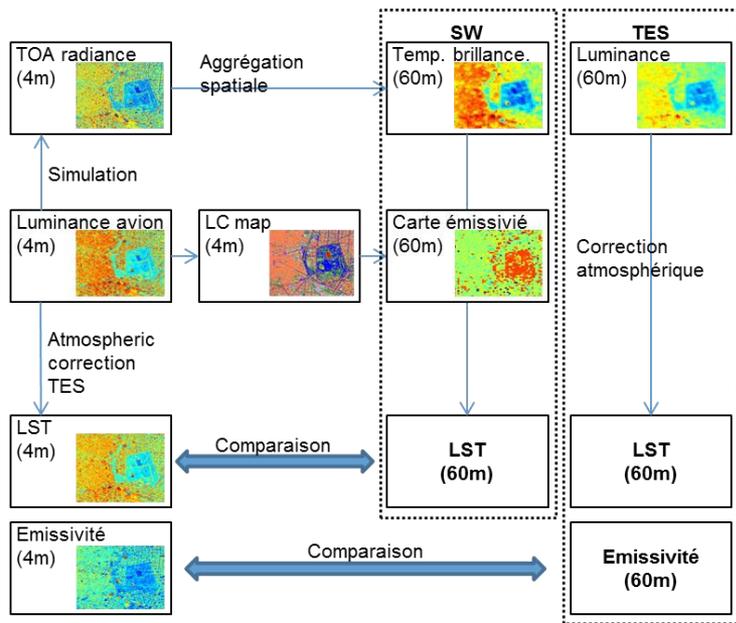
➔ Erreur jusqu'à 4 K avec la méthode SW ou TES en utilisant une hypothèse sol plat

Zheng 2020. Land surface temperature retrieval in urban areas from high spatial resolution thermal infrared data, PhD (ICube)

# Evaluation des méthodes d'estimation en milieu urbain

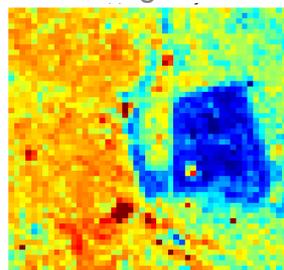
## Evaluation de la précision des méthodes SW et TES sur la LST

Images satellites TRISHNA simulées à partir de données aéroportées IRT



### SW

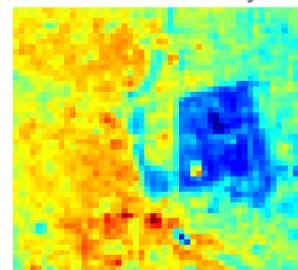
RMSE day LST < 2K  
RMSE night LST < 0.7K



SW LST map (K)

### TES (4 bandes)

RMSE LST < 1K  
RMSE emissivity < 1%



TES 4b LST map (K)

### Limites

- Matériaux peu émissifs (ex: métaux)
- Zones à effet de cavité (3D)

Michel et al. 2019. Land Surface Temperature Retrieval over Urban Areas from simulated TRISHNA data. JURSE Event, 22-24 May 2019, Vannes, France.

# Défis en milieu urbain

## Amélioration de l'estimation et du suivi de la LST en ville

- Hétérogénéité des matériaux (matériaux artificiels)
  - Algorithme TES adapté aux matériaux urbains
- Géométrie complexe : effets de cavité, effets directionnels
  - Prise en compte de l'impact de la 3D
  - Effets directionnels de la température
- Résolution spatiale et temporelle des capteurs actuels
  - Désagrégation (amélioration de la résolution spatiale)
- Maitrise des incertitudes



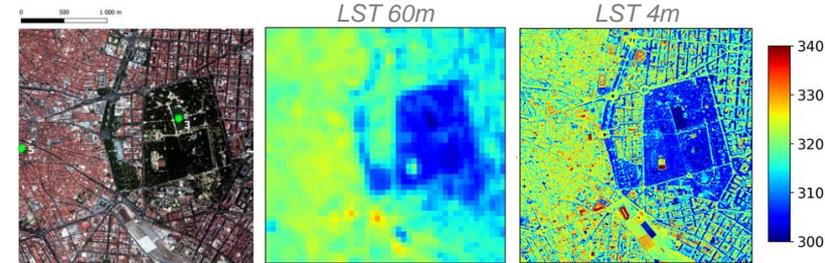
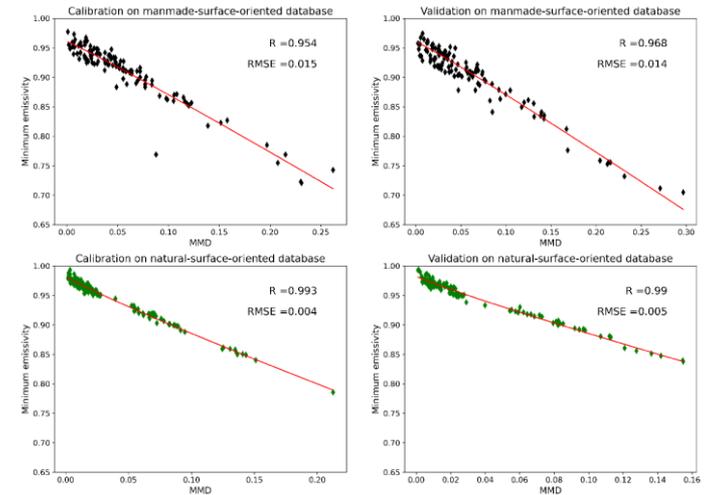
# Algorithme TES adapté au milieu urbain

## Paramétrisation sur des matériaux urbains

- 1 loi MMD calibrée sur base de données urbaine
- 2 lois MMD calibrées sur matériaux naturels et artificiels

## Validation à 4 m (AHS) et 60 m (TRISHNA)

- Meilleurs résultats en utilisant 2 lois
  - Matériaux artificiels : RMSE réduite de 1.6 K (original 7b) et 0.5 K (1 MMD)
  - Matériaux naturels : performances similaires
  - Avec 1 loi : surestimation sur naturels et sous-estimation sur artificiels
- Limitation : pixels mixtes



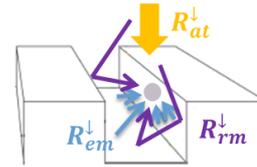
Michel et al. 2021. A New Material-Oriented TES for Land Surface Temperature and SUHI Retrieval in Urban Areas. *Remote Sensing*, 13 (24)

# Impact de la structure 3D

## Emissivité effective intégrant l'impact de la structure 3D

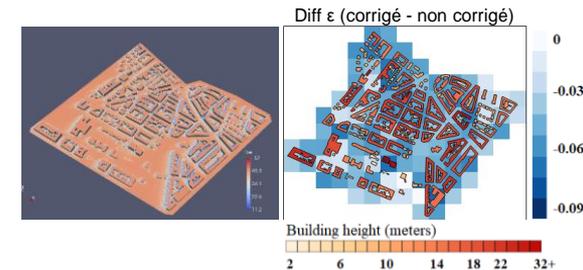
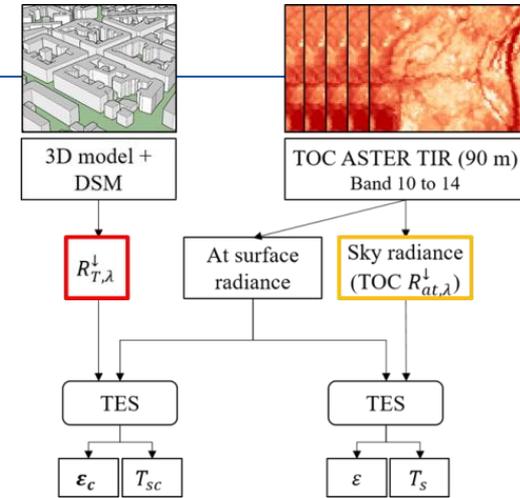
- Estimation du rayonnement incident en prenant en compte toutes les contributions
- MNS + modèle radiatif 3D
- Correction de l'impact du 3D dans TES

$$R_T^\downarrow = R_{at}^\downarrow + R_{em}^\downarrow + R_{rm}^\downarrow$$



## Tests sur des données ASTER (90 m)

- $R_T^\downarrow$  : différence jusqu'à  $68 \text{ W.m}^{-2}$  ( $\sim 25\%$ )  $\rightarrow \Delta\varepsilon \approx 0.05$  ;  $\Delta\text{LST} \approx 4 \text{ K}$ 
  - Surestimation des températures si aucune correction
  - Impact de la hauteur du bâti plus que de la densité
- Mise en évidence de l'hétérogénéité des LST après correction



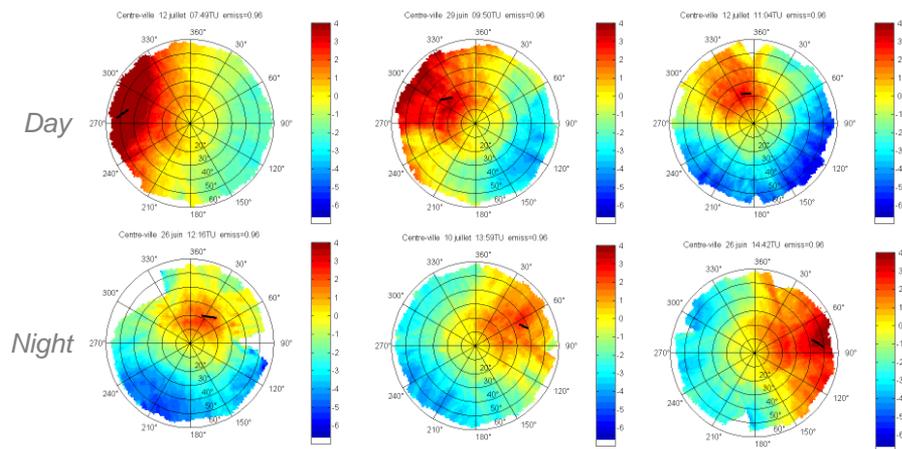
Roupioz et al. 2018. Correction for the impact of the surface characteristics on the estimation of the effective emissivity at fine resolution in urban areas, *Rem. Sens.*, 10 (5).

# Effets directionnels

## Effets directionnels de la température à l'échelle de la ville

- Le bilan d'énergie et son suivi requièrent une LST normalisée
- La structure 3D complexe génère des effets d'anisotropie pouvant conduire à une variabilité directionnelle de la LST urbaine jusqu'à 10 K

'Hot spot' en relation avec le déplacement solaire au cours de la journée sur le centre ville de Marseille (ESCOMPTE 2001)



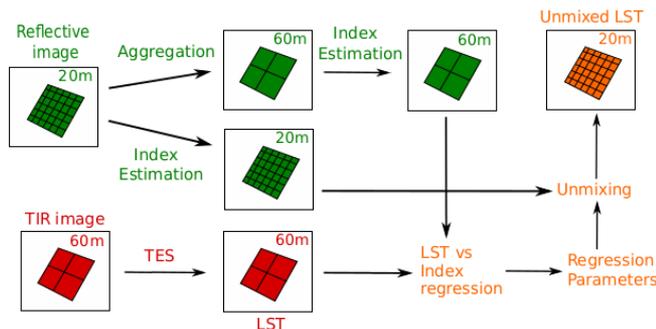
➔ Modélisation et analyse des effets directionnels à la résolution TRISHNA (en cours)

Lagouarde et al., 2010. Modelling daytime thermal infrared directional anisotropy over Toulouse city centre, *RSE*, 114 (1), pp. Pages 87-105

# Désagrégation

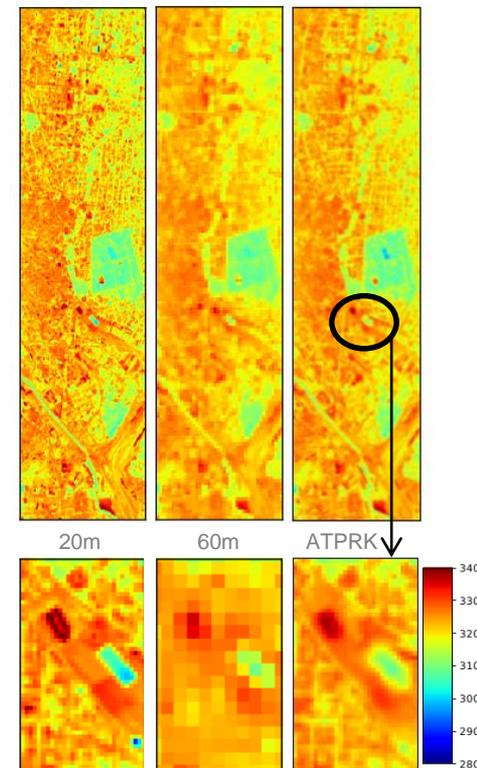
## Démélange en LST

- Relation entre LST et indice spectral construite à la résolution de l'image TIR
- Fonction empirique supposée invariante à l'échelle



## Evaluation de plusieurs méthodes et indices sur des données VNIRSWIR (20m) and TIR (40, 60, 80, 100m)

- ATPRK + NDBI : méthode la plus performante de 20m à 60m, puis dégradation (RMSE 2K)
- Structure géométrique de la ville retrouvée
- Limitations en zones denses (effet cavité) + extrêmes thermiques



Granero-Belinchon et al. 2019. Multi-Resolution Study of Thermal Unmixing Techniques over Madrid Urban Area: Case Study of TRISHNA Mission. *Rem. Sens.*, 11(10).

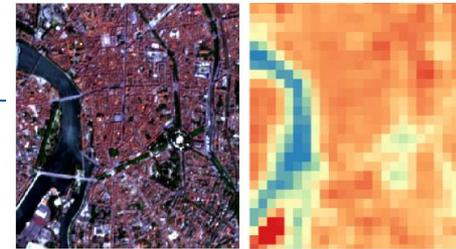
# Applications de méthodes développées

## THERMOCITY: la thermographie de la ville depuis l'espace

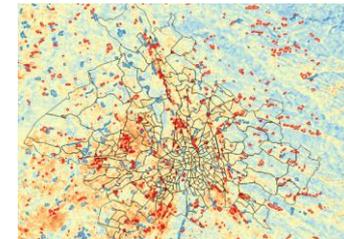
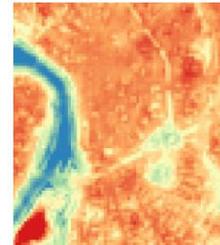
- Données : ASTER (90m) et ECOSTRESS (70m)
- LST estimée avec le TES orienté urbain (+ corrections géo et atm)
- Désagrégation des données ASTER de 90 m à 30 m
- Indicateur de qualité associé aux données

→ *Images disponibles sur le portail THEIA (open-access)*

- Applications : anomalie thermique, performance d'aménagements urbains, croisement avec des données SE et des sorties de modèles
- Applications fine-échelle encore limitées par la résolution spatiale des données IRT
- **Perspective dans un futur proche avec TRISHNA, LSTM, SBG et constellations**



Toulouse  
23/06/2018  
≈ 13h [20-45 °C]



*Détection points  
chauds/froids +  
interprétation*

THERMOCITY: CNES, ONERA, Météo France, CSTB et 5 Métropoles: Toulouse , Montpellier Méditerranée, Strasbourg, Aix-Marseille Provence  
[Description finale sur le site internet du Space Climate Observatory](#)

## Complémentarité entre modèles de climatologie urbaine et données dérivées de la télédétection

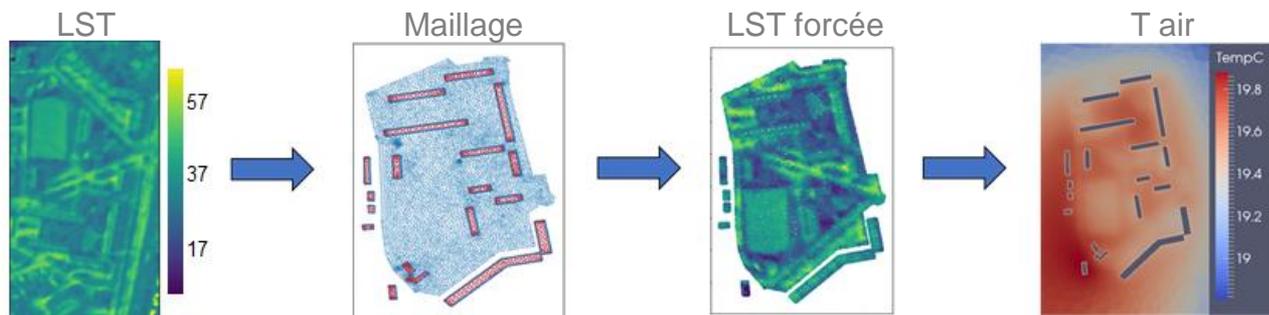
- Aller plus loin que la LST et l'indice ICUS
- Explorer les liens entre température de l'air/indice de confort et mesure de télédétection à fine échelle en milieu urbain
- Travaux dans le cadre des futures missions IRT satellitaires



# Etude du climat urbain

## CNES DIRT: Apport des LST satellitaires dans la simulation du microclimat urbain, estimation des températures d'air et indices de confort thermique – Post doc B. Bouyer

- **Défi scientifique** : relier les LST TRISHNA (57 m) aux températures de l'air et aux indices de confort à l'échelle d'un quartier



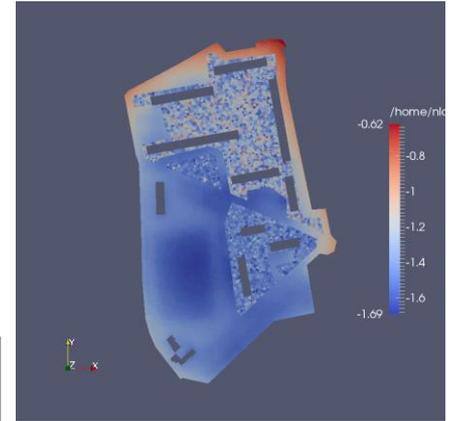
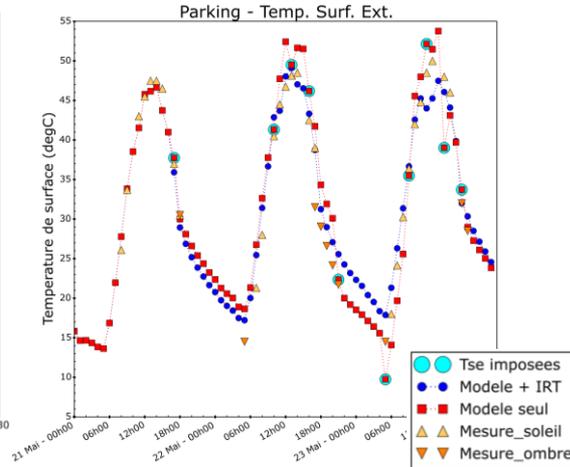
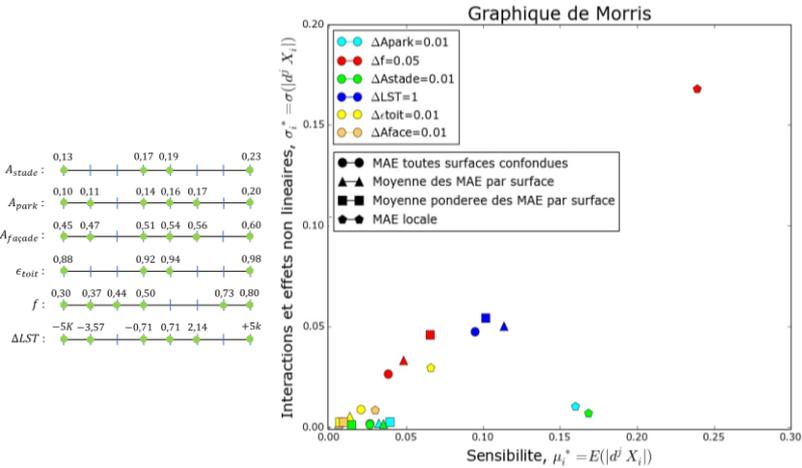
- **Méthode** : génération de LST TRISHNA (nadir) et assimilation dans l'outil microclimatique SOLENE-microclimat
- **Etude de cas** : quartier du Pin Sec (Nantes), Campagne expérimentale FluxSAP2010 → Températures de surface et émissivité mesurées au sol, Images aéroportées TIR

Bouyer et al. 2022. Apport de la télédétection dans la modélisation numérique du microclimat urbain à l'échelle du quartier. 30ème congrès annuel de la SFT, Valenciennes, France.

# Etude du climat urbain

## CNES DIRT: Apport des LST satellitaires dans la simulation du microclimat urbain, estimation des températures d'air et indices de confort thermique – Post doc B. Bouyer

- **Solene-microclimat** : amélioration des transferts par conduction, impact sur la Tair (0.6-1.6° C)



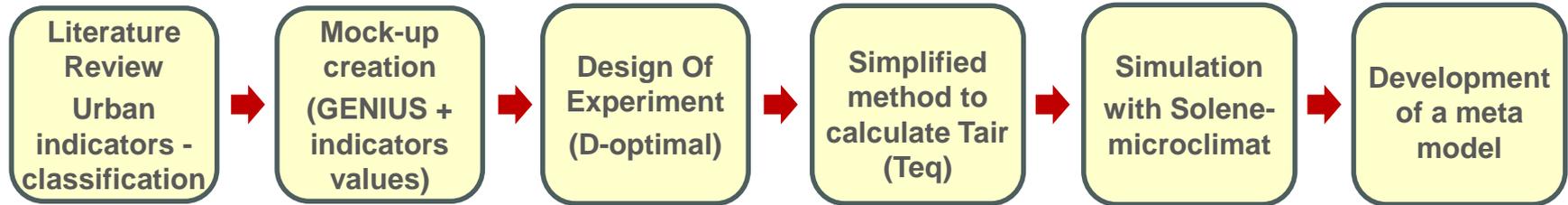
- **Limites** : façades non visibles, écarts entre mesures au sol et IRT, données tri-horaires, modèle seul déjà bien paramétré

Bouyer et al. 2022. Apport de la télédétection dans la modélisation numérique du microclimat urbain à l'échelle du quartier. 30ème congrès annuel de la SFT, Valenciennes, France.

# Etude du climat urbain

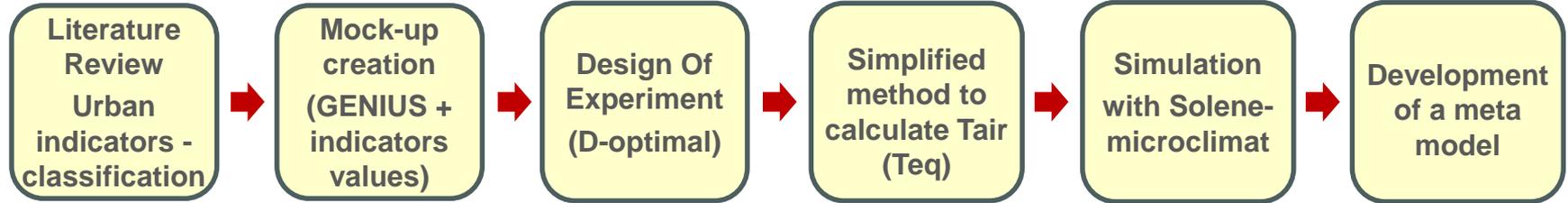
## CNES DIRT: Influence of urban form and thermal radiative properties on urban air temperature – Stage D. Yao

- **Défi scientifique** : relier le LST TRISHNA (57 m) aux températures de l'air et aux indices de confort à l'échelle d'un quartier pour de la prévision court terme → pour différentes typologies urbaines, proposer une méthode simplifiée

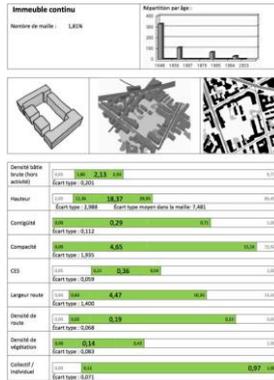


# Etude du climat urbain

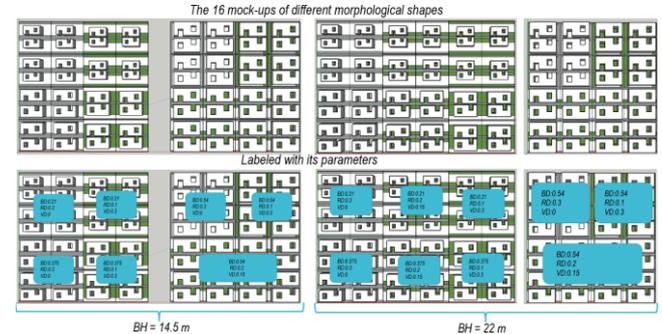
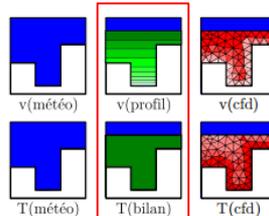
## CNES DIRT: Influence of urban form and thermal radiative properties on urban air temperature – Stage D. Yao



Continuous pavilion	
Discontinuous pavilion	
Continuous block	
Discontinuous block	
High-rise tower	
Ancient center	
Industrial building	



<b>Building height</b>	14, 5, 22
<b>Building density</b>	0, 21, 0, 375, 0, 54
<b>Vegetation density &amp; Road density</b>	Vege: 0, 0, 15, 0, 3 Road: 0, 3, 0, 2, 0, 1
<b>Albedo of wall</b>	0, 1, 0, 45, 0, 8
<b>Albedo of roof</b>	0, 1, 0, 3, 0, 5
<b>Albedo of road</b>	0, 05, 0, 275, 0, 5



### Regression Equation

$$T_{eq} = -0.223 BD - 18.39 RD - 9.263 VD - 0.062 AW + 1.715 AR + 1.402 AS + 0.0983 BH + 1.223 T_{météo} + 1.638 BD^*BD + 4.46 RD^*RD + 0.707 AW^*AW + 0.154 AR^*AR - 0.388 AS^*AS - 0.001890 T_{météo}^*T_{météo} + 0.504 BD^*RD - 0.287 BD^*AW + 0.212 BD^*AR + 0.271 BD^*AS - 0.0894 BD^*BH + 0.02451 BD^*T_{météo} + 0.257 RD^*AW - 1.115 RD^*AR - 1.255 RD^*AS + 0.0878 RD^*BH + 0.0698 RD^*T_{météo} - 0.198 AW^*AR - 0.576 AW^*AS + 0.02940 AW^*BH - 0.03687 AW^*T_{météo} + 0.202 AR^*AS - 0.03275 AR^*BH - 0.04667 AR^*T_{météo} - 0.04045 AS^*BH - 0.00480 AS^*T_{météo} - 0.003274 BH^*T_{météo}$$

# Etude du climat urbain

---

## ANR DIAMS: DIAGnostic, Modélisation & gestion de la Surchauffe urbaine en période de canicule : apports croisés des outils de simulation microclimatique et de l'imagerie IRT

- Travaux en cours et à venir.
- Défis scientifiques:
  - Relier la LST TRISHNA (57 m) aux températures de l'air et aux indices de confort à l'échelle d'un quartier → pour différentes typologies urbaines, proposer une méthode simplifiée pour de la prévision microclimatique (court terme)
  - Assimilation des LST dans les modèles de microclimat urbain (+CETHIL)
  - Comment attribuer une LST aux façades? Quelle résolution spatiale et temporelle des LST pour une bonne estimation des indicateurs de confort/Tair?

# Etude du climat urbain

## Couplage de DART et de Solene-Microclimat

Les deux modèles permettent une représentation 3D détaillée du paysage urbain

### SOLENE-microclimat

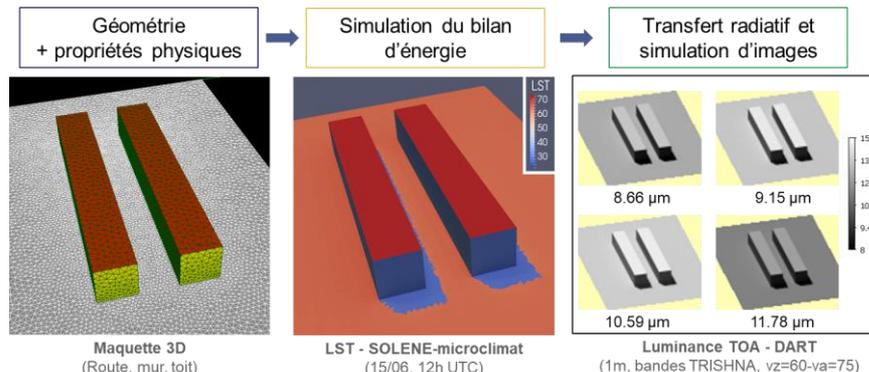
Bilan d'énergie 3D complet → LST à l'échelle métrique + températures de l'air

... bilan radiatif simplifié pour 2 bandes larges (solaire + TIR)

### DART

Transfert radiatif 3D à haute résolution spectrale + observations de télédétection

... nécessite les LST en entrée (pas de modèle thermique)



→ Générer des images IRT avec une distribution des LST basée sur la physique dans la scène

# Etude du climat urbain

---

## Couplage de DART et de Solene-Microclimat

- Etudier l'impact de l'hétérogénéité de la surface urbaine et de la structure 3D sur l'estimation de la LST
  - Quels paramètres de surface prendre en compte dans les algorithmes d'estimation de la LST ?
  - Quelles incertitudes sont induites par les hypothèses méthodologiques ou les propriétés inconnues de la surface urbaine ?
- Distribuer les LST satellitaires dans une scène urbaine 3D pour utilisation dans des modèles urbains travaillant à l'échelle locale
  - Approche d'inversion prenant en compte la géométrie 3D et les propriétés optiques de la scène (résolution des futures missions IRT ~ 60 m)
- Préparation des futures missions IRT : améliorer la LST urbaine, évaluer les incertitudes, étudier les effets directionnels pour générer des produits LST comparables

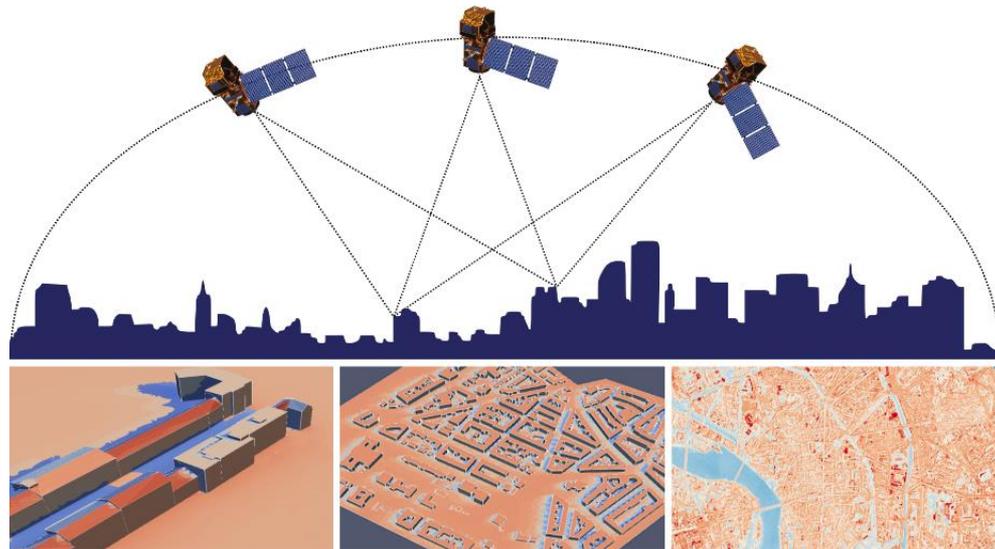
# Téledétection IRT spatiale : application au milieu urbain

**Laure Roupioz, Xavier Briottet**

*ONERA, Toulouse*

**Auline Rodler**

*CEREMA, Nantes*





# Réseau de recherche interdisciplinaire en climatologie urbaine

Du **f**ondamental aux solutions d'**a**daptation au  
**c**hangement climatique

**Martin Hendel, Manon Kohler, Auline Rodler**

Journée thématique SFT

FIAP Paris

Jeudi 7 décembre 2023

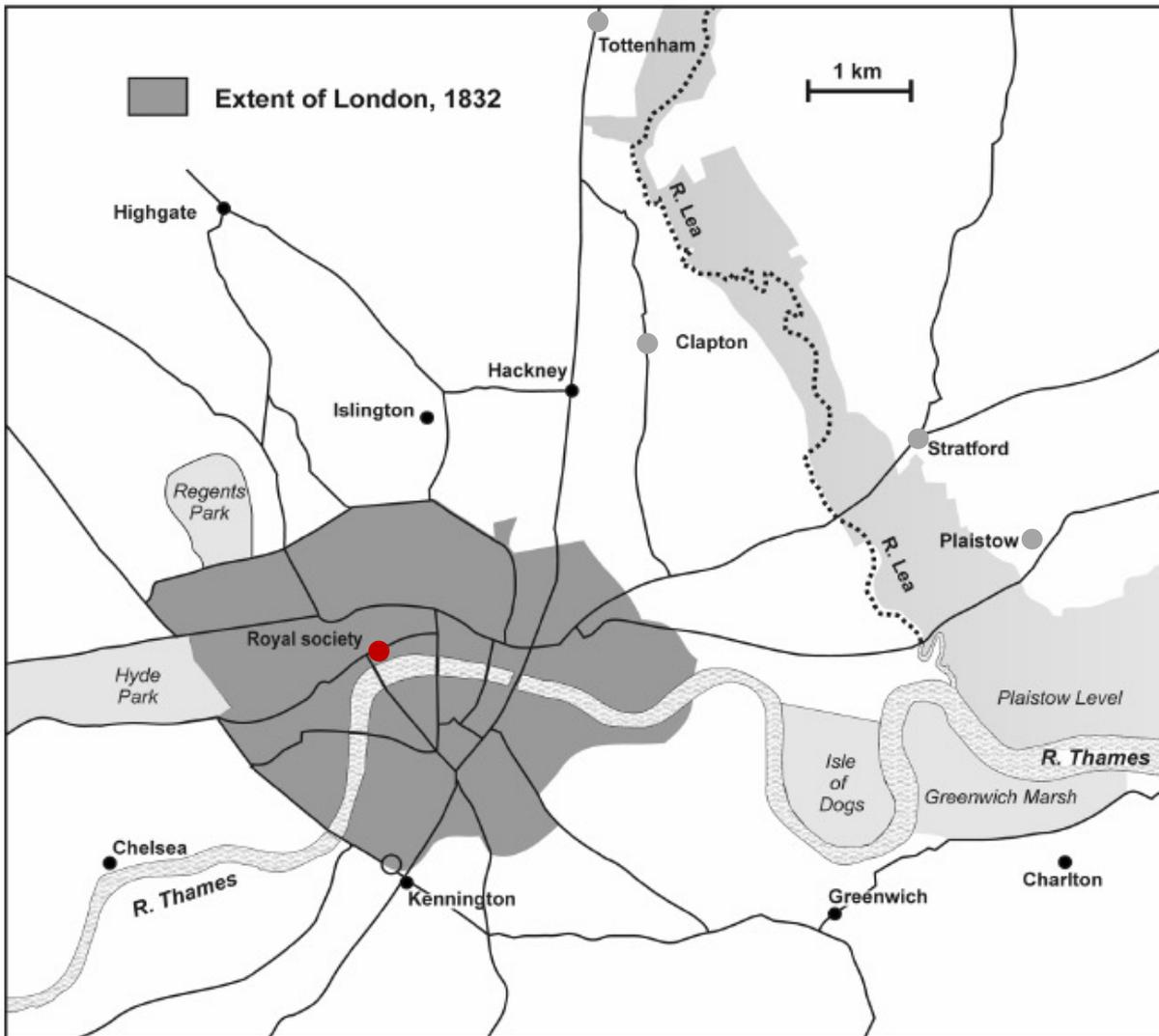


# So what is an Urban Heat Island Anyway?



Source : [www.coolcommunitiesflorida.com](http://www.coolcommunitiesflorida.com)

# ICU : Londres, XIX<sup>e</sup> siècle

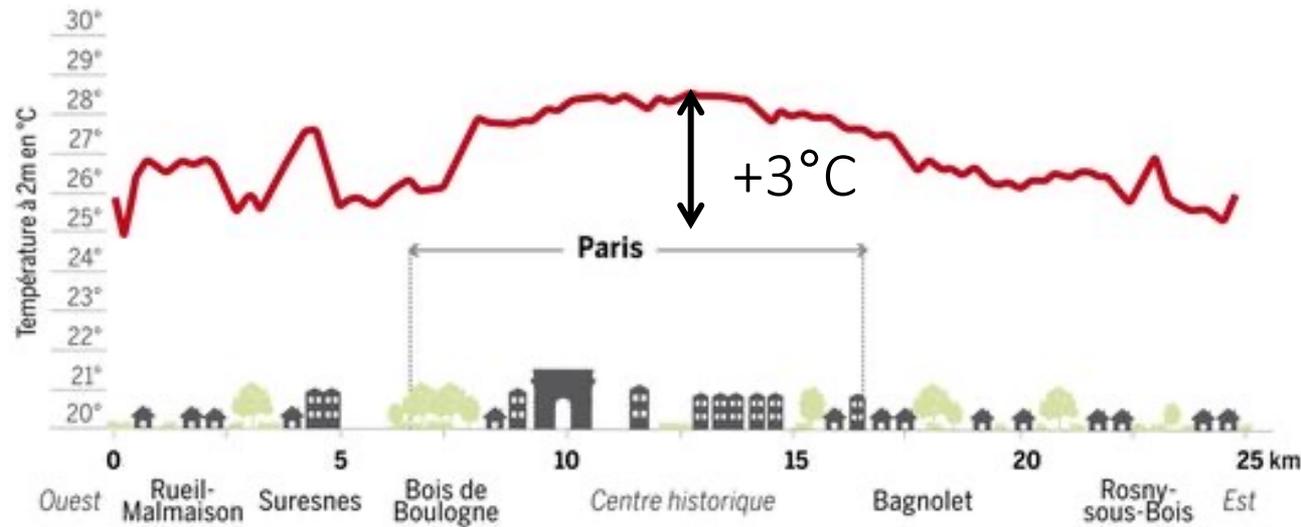


Luke Howard (1772-1864)  
"Namer of Clouds"

# ICU Parisien

Phénomène de réchauffement localisé des villes

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



SOURCES : MÉTÉO FRANCE ; CSTB ; MAIRIE DE PARIS

# ICU Parisien

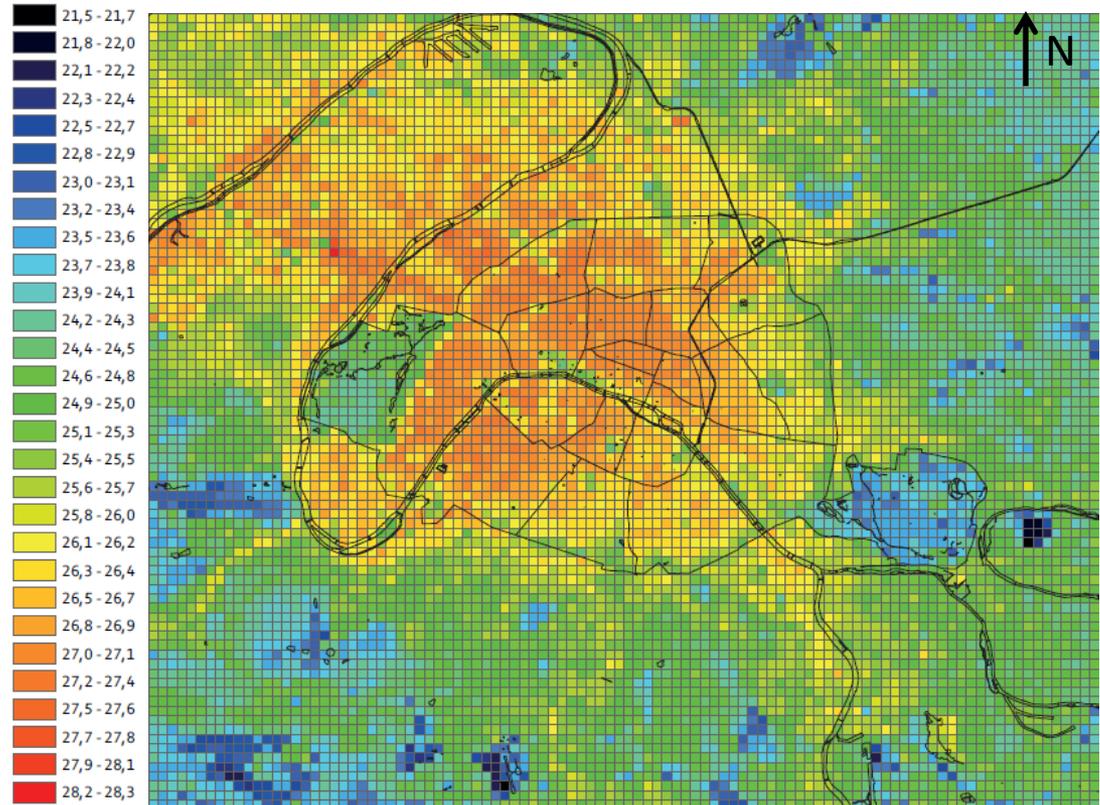
Phénomène de  
réchauffement  
localisé des villes

Ordre de grandeur :

$$T_{\text{urbain}} - T_{\text{rural}} = +3^{\circ}\text{C}$$

**Fortement amplifiés lors  
de conditions  
anticycloniques...**

$T_{\text{urbain}} - T_{\text{rural}}$  jusqu'à  $12^{\circ}\text{C}$



Simulation de la température d'air à 2m à 6h le 10 août 2003

Source: EPICEA, 2012

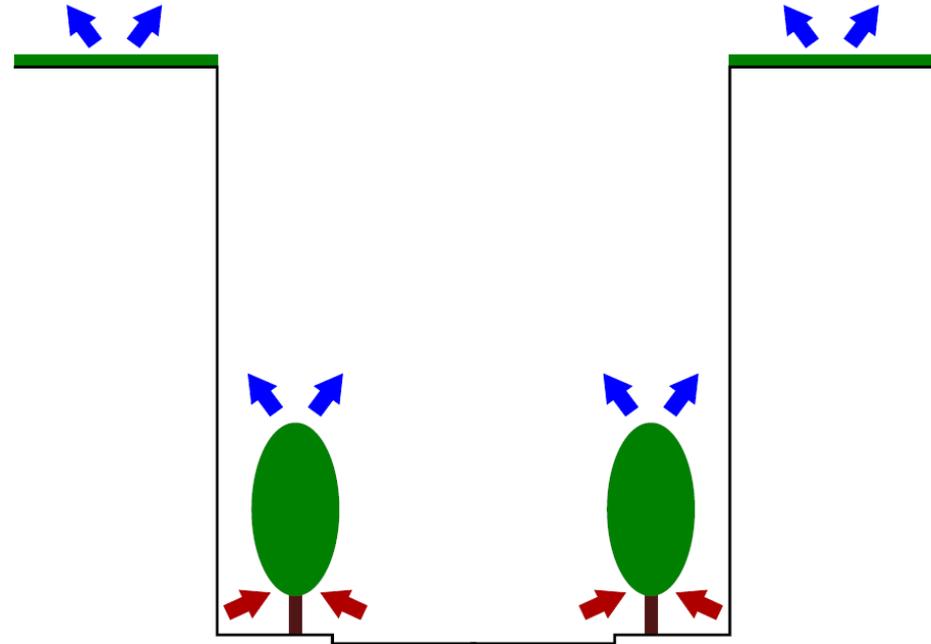
# ICU : Mécanismes

Piégeage radiatif

Manque  
d'évapotranspiration

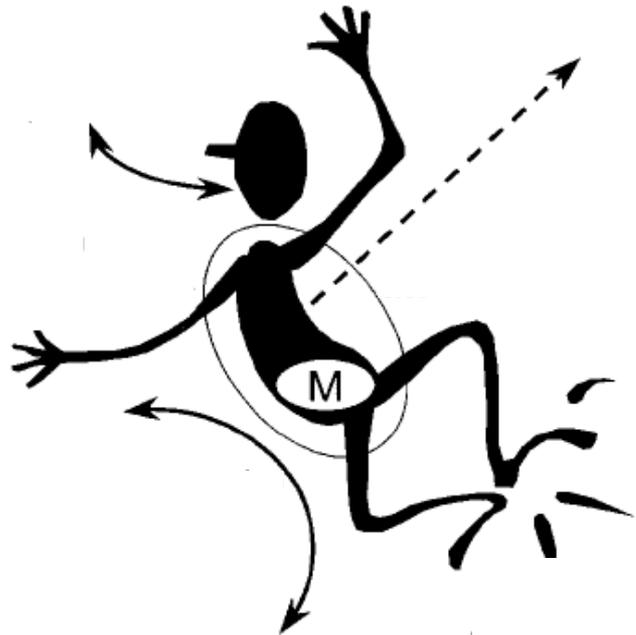
Obstruction du vent

Chaleur anthropique



# Stress thermique

- Il s'agit d'un état 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.



# Objectifs

1. **Fédérer les chercheurs** qui ont pour objet (ou en objet connexe) la climatologie urbaine
2. **Création d'un savoir commun** autour de l'objet "climat urbain"
3. **Diffuser et valoriser les connaissances**
  - entre experts scientifiques (interdisciplinarité)
  - entre experts scientifiques et acteurs opérationnels (intersectorialité)

# Objectifs

1. **Fédérer les chercheurs** qui ont pour objet (ou en objet connexe) la climatologie urbaine
2. **Création d'un savoir commun** autour de l'objet "climat urbain"
3. **Diffuser et valoriser les connaissances**
  - entre experts scientifiques (interdisciplinarité)
  - entre experts scientifiques et acteurs opérationnels (intersectorialité)

# Structure



(Inter)Disciplines (non exhaustive) :

aménagement du territoire, architecture,  
urbanisme, biologie, biométéorologie, géographie-  
climatologie, hydrologie urbaine, météorologie,  
physique du bâtiment, physique et chimie de  
l'atmosphère, sciences pour l'ingénieur,  
sociologie, thermique, ...

Echelles :

Régionale  
Urbaine/ville  
Quartier  
Bâtiment  
Piéton  
Matériaux

# Axes thématiques

## 1. Simulation numérique

*Animation : B. Morille, L. Merlier*



## 2. Approches expérimentales

*Animation : J. Bernard, P. Keravec*



## 3. Capitalisation et applications opérationnelles

*Animation : J. Hidalgo, J. Bouyer*



## 4. Formation et diffusion de l'information technique et scientifique au public

*Animation : F. Leconte, A. Gros, S. Herpin*

**MON  
MASTER**

# Activités depuis 2019

2019

- Initiation, 23 janvier
- Journée Rafrâichissement Urbain, 18 novembre

2021

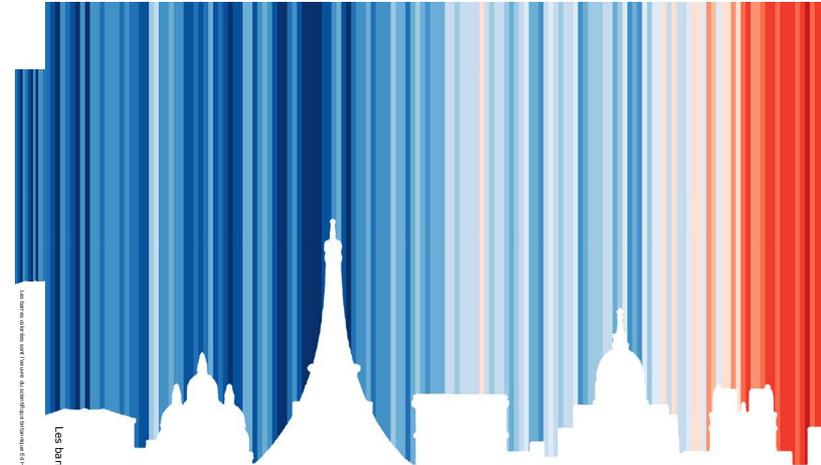
- eWorkshops (jeunes chercheur.es) 11 février, 8 avril et 10 juin

2022

- Séminaire conjoint Sciences Po et GT3 Cours d'école le 15 mars – invité: M. Roth
- Journée du 1er juin

2023

- Journée du 22 mars – invité F. Lindberg



Les barres colorées sont l'œuvre du scientifique britannique Ed Hawkins Mering Stripes



Les barres colorées sont l'œuvre du scientifique britannique Ed Hawkins Mering Stripes

## 5<sup>e</sup> Workshop Climat Urbain

Du fondamental aux solutions d'adaptation au changement climatique

+ Activités des axes  
thématiques depuis 2022

Mercredi 22 mars 2023

9h30-17h30

# Composition depuis 2019

Début 2019  
(30 pers. + 10 visio)

Surtout des laboratoires + quelques participations “privées”  
de chercheurs, doctorants CIFRE

Fin 2019  
(50 pers. inscrites)

Idem

Mi-2022  
(87 pers. inscrites)

Idem + collectivités, bureau d'études, entreprises publiques  
(eg. EPIC), notamment via CIFRE + autres établissements  
publics

Intérêt de + en + fort du monde opérationnel pour la thématique (coll. et entreprises)

Liste de diffusion 116 personnes (au 6/12/23)

32 établissements universitaires ou assimilés (21 UMR + 1 FR CNRS)

5 établissements publics (2 EPIC, 2 EPA et 1 IRD)

3 entreprises (PME proches monde académique)

+ qq's collectivités territoriales, associations et autres via thèses CIFRE

# Collaborations et interactions depuis 2019

- En France
  - SNO Observil
  - GDR MAGIS
  - SFT (!)
  - Labex IMU
  - IRSTV
  - ...
- A l'international
  - AIC
  - UERA
  - EGU
  - IAUC
  - COST FAIRNESS
  - ...

# Projet RT Climat Urbain

Nom du réseau : Réseau de recherche interdisciplinaire en climatologie urbaine

Sigle du RT : Climat Urbain

Instituts et sections :

INSHS 39

INSIS 9 et 10

INSU 19 et 30

INEE 30 et 31

+ CID 52

Dossier déposé début 2023 auprès du CNRS (INSHS)

# Activités prévues

## Routinières

Séminaires scientifiques:

- Séminaire général : une à deux fois par an
- Axes thématiques : à l'exemple de l'Axe 3 soit, 3 séminaires et 3 webinaires par an

## Périodiques

Sessions Climat Urbain et workshop de l'axe 3 à l'AIC → Paris 2024, ? 2026

## Occasionelles

Colloque/Formation à destination des opérationnels

Ecole thématique, Réponse commune à la Fête de la science

# Merci de votre attention

Pour nous rejoindre : [climat\\_urbain-request@listes.univ-paris-diderot.fr](mailto:climat_urbain-request@listes.univ-paris-diderot.fr)

Martin Hendel, pour le compte du RT Climat Urbain  
[martin.hendel@u-paris.fr](mailto:martin.hendel@u-paris.fr)

ResearchGate  
[https://www.researchgate.net/profile/Martin\\_Hendel](https://www.researchgate.net/profile/Martin_Hendel)

Université Gustave Eiffel, ESIEE Paris, Département SEED  
Université Paris Cité, Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain (LIED) - UMR 8236 CNRS  
Sciences Po, Laboratoire Interdisciplinaire d'Évaluation des Politiques Publiques (LIEPP)



vito



UNIVERSITÉ  
TOULOUSE III  
PAUL SABATIER

# DART: a 3D radiative transfer model for urban studies

Jonathan Leon Tavares<sup>a</sup>, Yingjie Wang<sup>b</sup>, Zhijun Zhen<sup>b, c</sup>,  
Nicolas Lauret<sup>b</sup>, Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry<sup>b</sup>

<sup>a</sup> VITO NV Remote Sensing, Mol, Belgium

<sup>b</sup> CESBIO-CNES/CNRS/IRD/INRAE/UT3-Paul Sabatier, Toulouse, France

<sup>c</sup> University of Jilin, Jilin, China



**DART** Discrete Anisotropic  
since 1992 Radiative Transfer

**CESBIO**

# Outline

1. Introduction to DART
2. 3D urban scenes and simulations
3. Inversion & Differentiable radiative transfer



# Outline

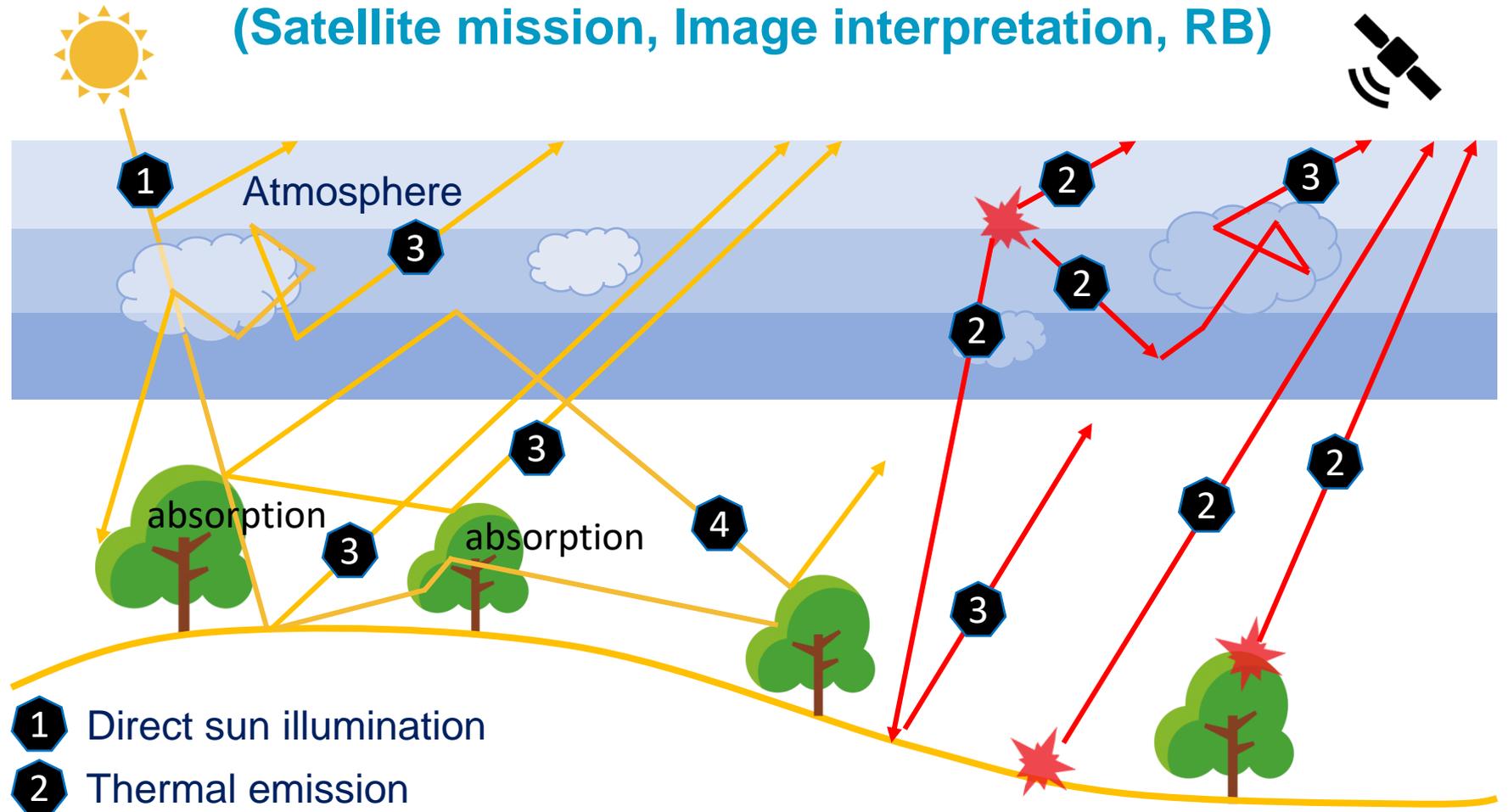
- 1. Introduction to DART**
2. 3D urban scenes and simulations
3. Inversion & Differentiable radiative transfer





# Radiative transfer modelling

(Satellite mission, Image interpretation, RB)



- 1 Direct sun illumination
- 2 Thermal emission
- 3 Single & multiple scattering

4 Surface-Atmosphere coupling



# DART model: an overview

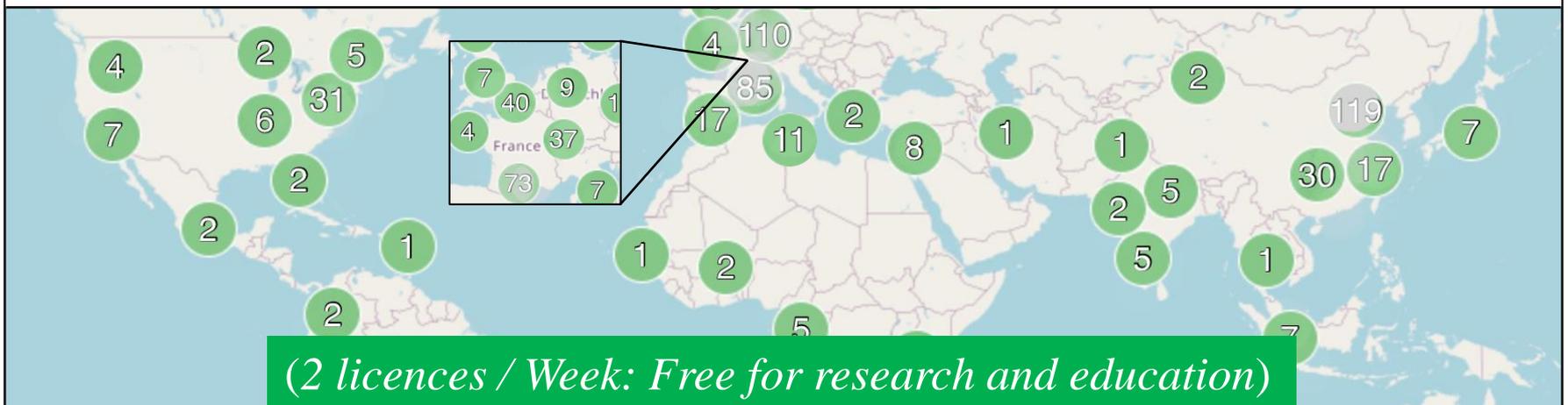
**History:** developed in CESBIO since 1992 by 10 scientists. Patented in 2003

**Accuracy** (relative difference  $\varepsilon$ , RMSE) assessed with:

- Monte Carlo models (RAMI-III experiment):  $\varepsilon_{\rho} \leq 1\%$  ([Widlowski et al., 2007](#))
- Measurements:  $\varepsilon_{\rho} \leq 2.5\%$  ([Landier et al., 2018](#)),  $RMSE_{T_B} < 2K$  ([Sobrino et al., 2011](#))

**Community code certification:** enhance research collaboration using DART. 

**635 DART licences:** Universities, Research centres (CNES, ESA, ...)





## DART Team (CESBIO)

**Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry**

*Professor (UT3)*  
Scientific leader



**Nicolas Lauret**

*Dr, Engineer (CNRS)*  
Lead Developer



### Science

**Yingjie Wang**  
*Assoc. Prof (UT3)*  
Atmos., MC

**Zhijun Zhen**  
*Lecturer (Univ. Jilin)*  
Inversion

**Paul Boitard**  
*PhD (UT3)*  
Biosphere processes

**Romain Demoulin**  
*PhD (UT3)*  
Vegetation

**Ameni Mkaouar**  
*Post-Doc (NASA)*  
Space mission

**Luka Lesage**  
*Engineer (CNRS)*  
Energy balance

### Computer science

**Jordan Guilleux**  
*Engineer (CNRS)*  
Interfaces, databases, ...

**Eric Chavanon**  
*Engineer (UT3)*  
Compilation, Scientific tools, ...

#### Outside CESBIO:

**Z. Malenovsky, O. Regaieg, T. Nguyen** (Univ. Bonn, Germany): SIF, TIR, RB.

**A. Kallel** (CRNS, Tunisia): Monte Carlo

**T. Yin** (HPU, China): Photogrammetry, LiDAR

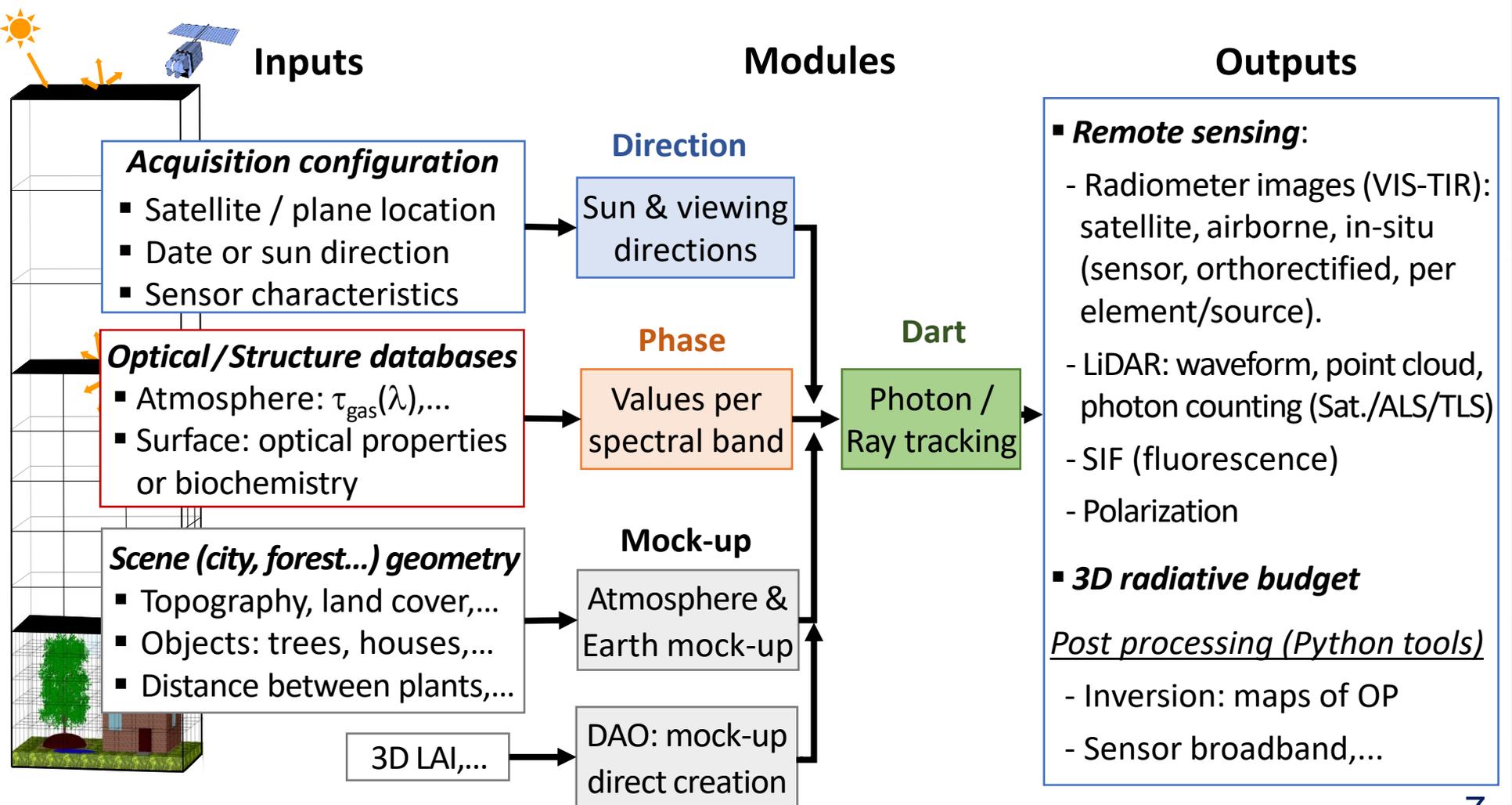
**R. Paugam** (UCP, Spain): Fire

TETIS (Montpellier): F. De Boissieu, J.-B. Feret, S. Durrieu

Pytools4dart: <https://gitlab.com/pytools4dart>



## DART model: an overview



# Outline

1. Introduction to DART
- 2. 3D urban scenes and simulations**
3. Inversion & Differentiable radiative transfer





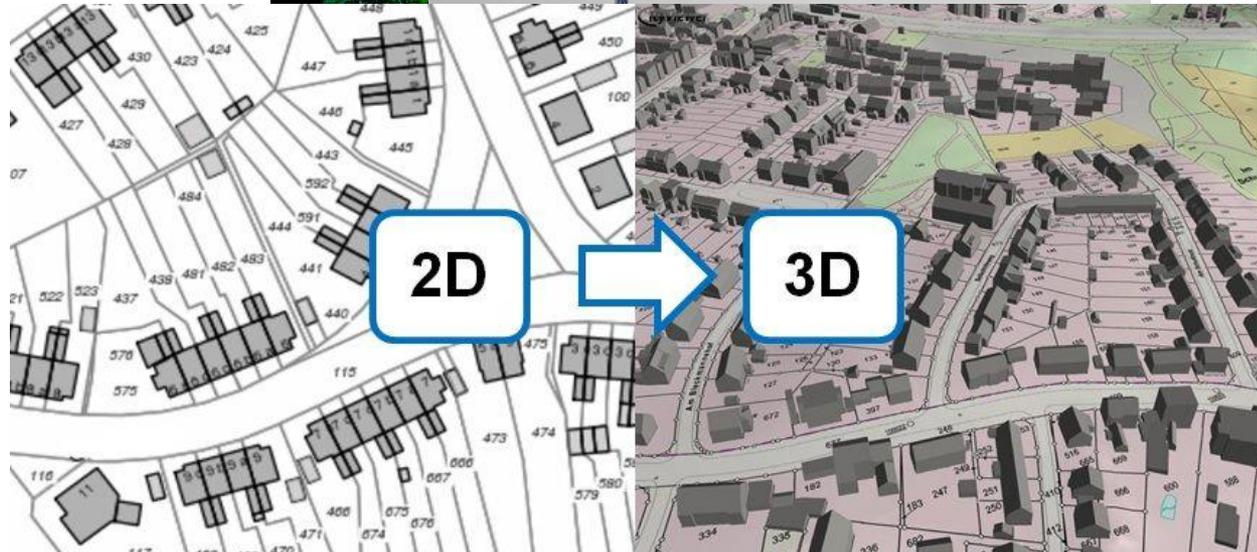
## 3D city representation

Common techniques for 3D city construction:

(1) LiDAR point clouds

(2) Photogrammetry

(3) Cadastre





# 3D city representation

Brussels city 3D mock-up (17 x 17 km).  
*(Suabe project, Belgium)*



Google Map



DART simu



# 3D city representation

**Basel** city 3D mock-up (10 x 11 km).

*(UrbanFluxes, Horizon2020, EU)*



Google Map



# 3D city representation

London city 3D mock-up (5 x 4 km).

[\(UrbanFluxes, Horizon2020, EU\)](#)



Google Map



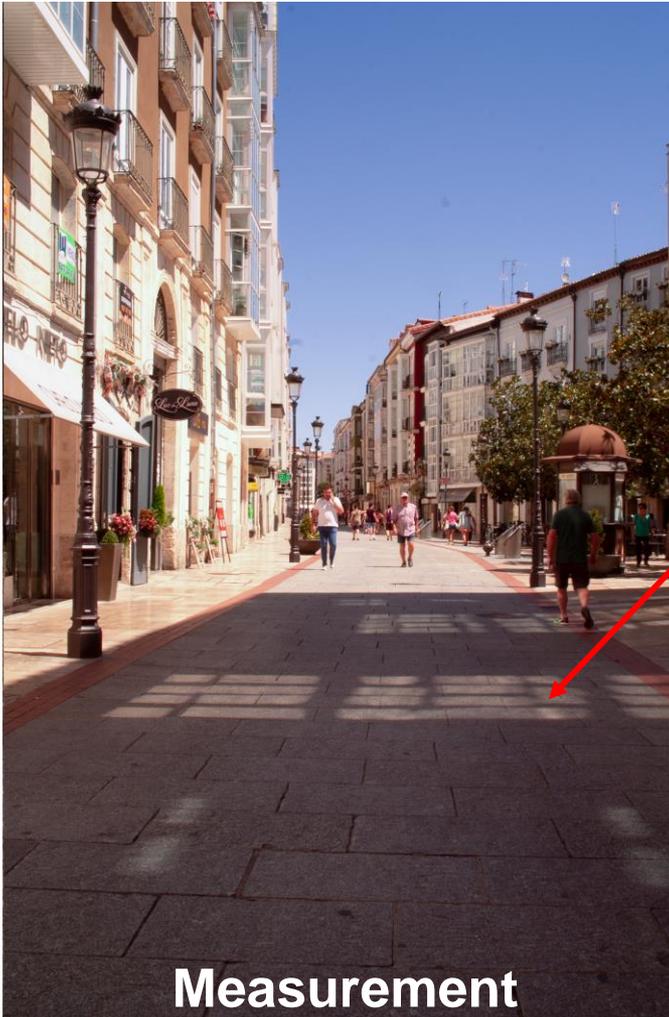
# DART urban simulations



Brussels (From Nicolas Lauret)



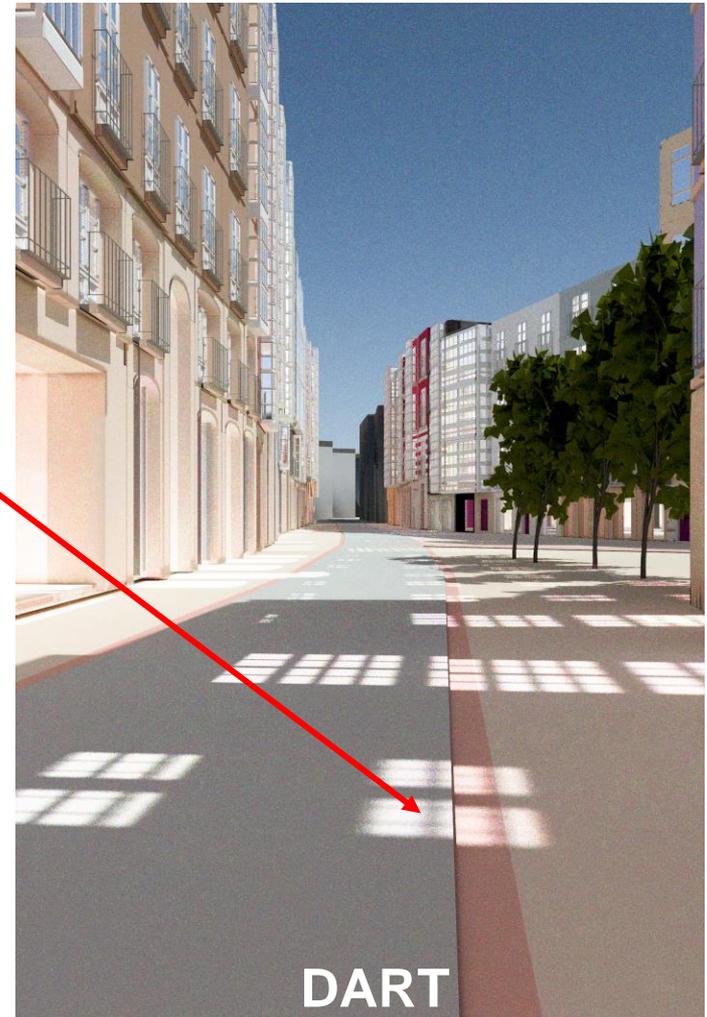
# DART urban simulations



**Measurement**

**Reflection from windows**

Work from **Diego Granados Lopez**  
[dgranados@ubu.es](mailto:dgranados@ubu.es)



**DART**



## DART urban simulations

**SOLENE** model  $\Rightarrow$  3D energy balance (2 broad bands)  $\Rightarrow$  LST +  $T_{air}$

**DART** model  $\Rightarrow$  hyperspectral RTM (more accurate RB)  $\Rightarrow$  RS observations

Impact of urban surface heterogeneity on LST estimation from TIR satellites  
**(TRISHNA, LSTM)**

LST – SOLENE microclimate



Strasbourg, cathedral district,

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB



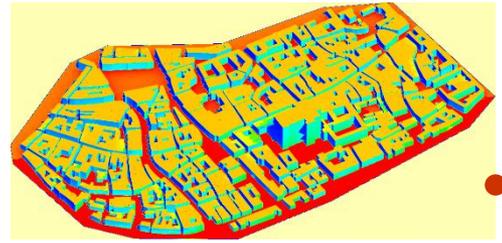
Brightness temperature at 4 view zenith ( $v_z$ ) angles



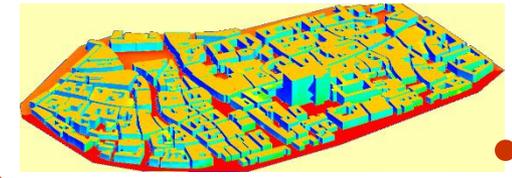
$v_z = 15^\circ$



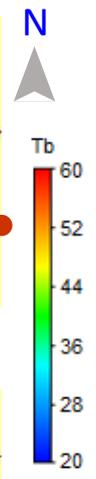
$v_z = 30^\circ$



$v_z = 45^\circ$



$v_z = 60^\circ$

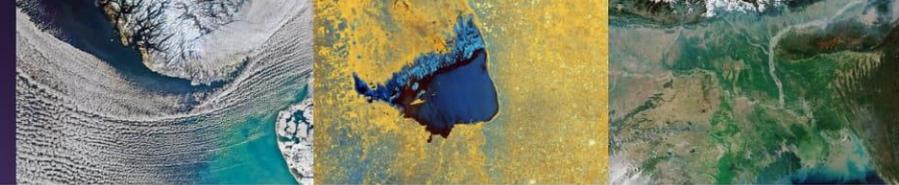


● Sun position

# Outline

1. Introduction to DART
2. 3D urban scenes and simulations
- 3. Inversion & Differentiable radiative transfer**





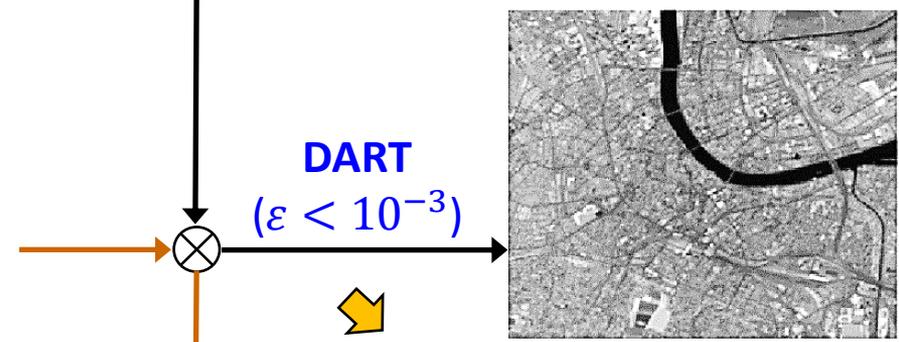
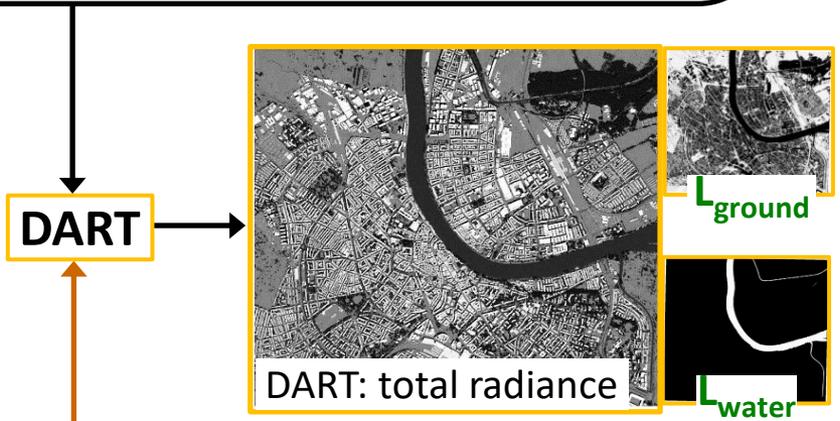
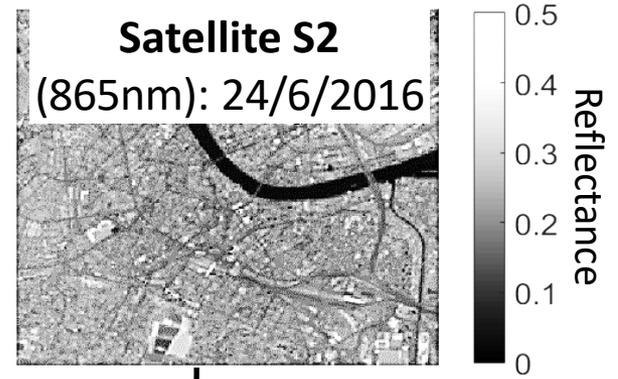
## Inversion

*(Zhen et al., 2021)*

**Urban database**



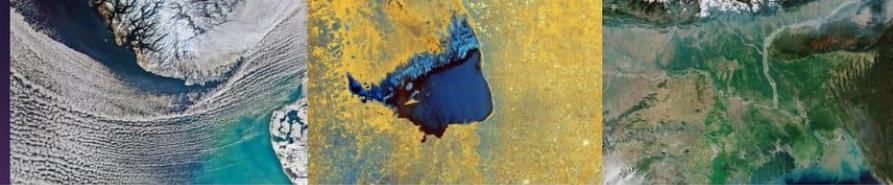
+ Spatially constant **optical properties (OP)**  
+ **Atmosphere** and **Satellite** configurations



**New OP maps**  
of roofs, streets,...

**Solving linear equations**  
using DART Jacobian

- **Satellite image: any sun, view, atmosphere**
- **Albedo & RB maps: time series, satellite driven**

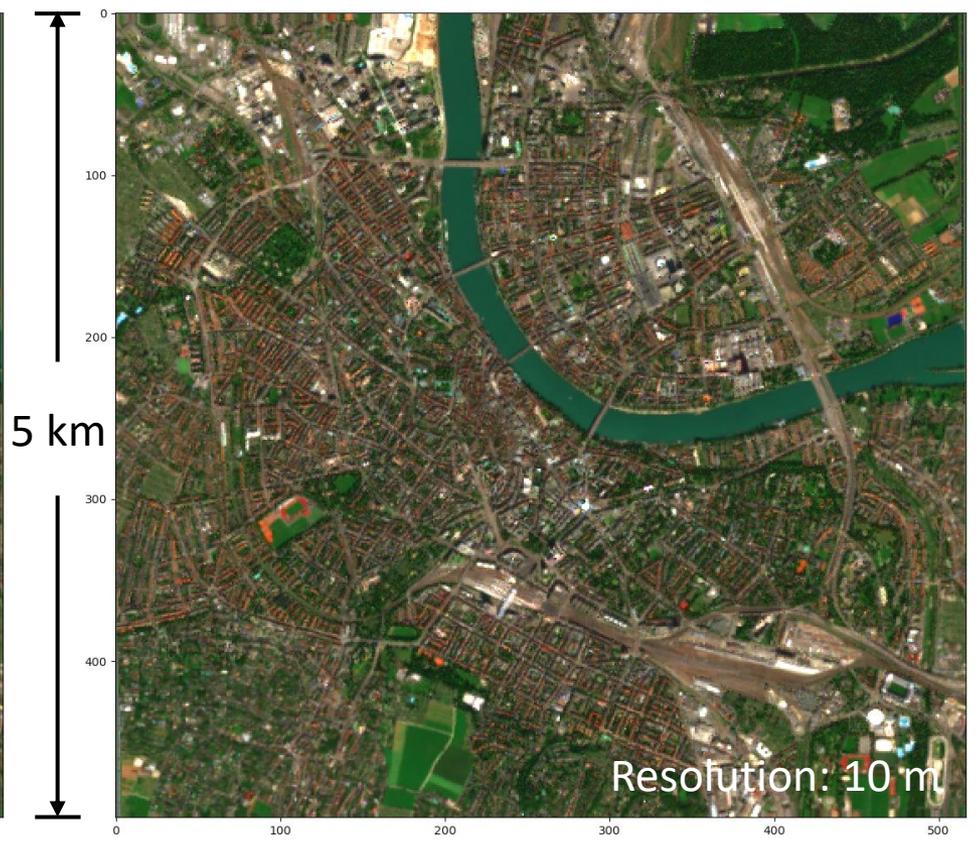


## Inversion

*(Zhen et al., 2021)*



**Sentinel 2 (B2, B3, B4)**



**DART simulation with OP maps**

# Jacobian matrix

## What is Jacobian matrix ?

The derivatives of measurements  $F$  to a series of parameters  $\hat{\pi} = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k, \dots, \pi_N]$ .

$$J = \left[ \frac{\partial F}{\partial \pi_1}, \frac{\partial F}{\partial \pi_2}, \dots, \frac{\partial F}{\partial \pi_k}, \dots, \frac{\partial F}{\partial \pi_N} \right]$$

Jacobian matrix quantifies the change of RS signal due to the change of parameters:

- (a) Retrieve parameters  $\hat{\pi}$  from RS observation  $F$
- (b) Estimate uncertainties of remote sensing products  $u(\hat{\pi})$  from  $u(F)$
- (c) Estimate uncertainties of radiative transfer modelling  $u(F)$  from  $u(\hat{\pi})$
- (d) ...

# Finite difference method

**FD method:** straightforward Jacobian matrix computation.

$$\frac{\partial F(\hat{\pi})}{\partial \pi_k} = \frac{F(\pi_1, \dots, \pi_k + h\pi_k, \dots, \pi_N) - F(\pi_1, \dots, \pi_k - h\pi_k, \dots, \pi_N)}{2h\pi_k}$$

$F(\hat{\pi}) \Rightarrow$  Radiative transfer modelling

**Advantages:** Acceptable accuracy + Easy to chain with RT code (Current implementation in DART)

**Disadvantages:**

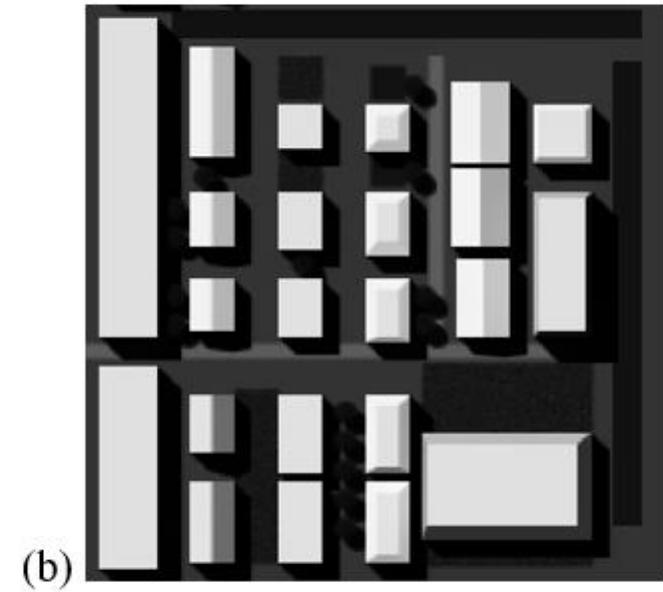
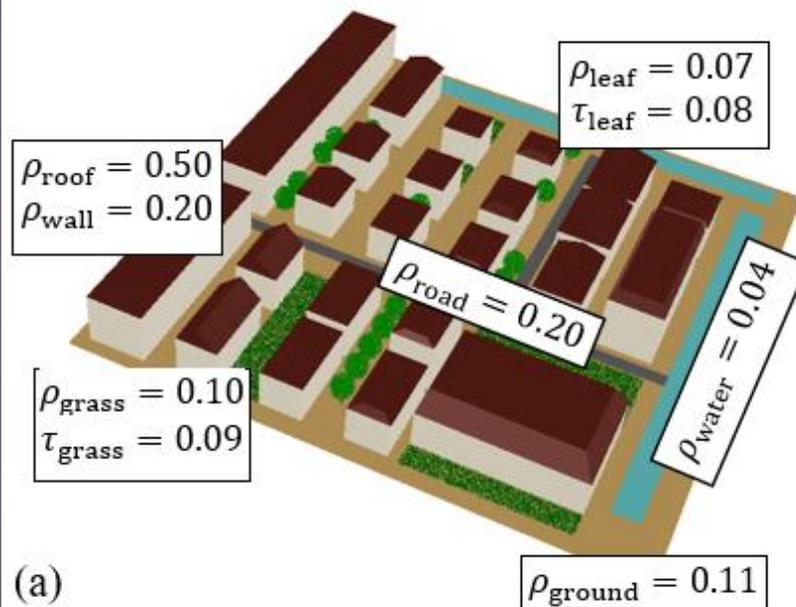
- (1) Efficiency:  $N$  derivatives  $\Rightarrow 2N$  simulations.
- (2) Accuracy: Non-linearity between  $\hat{\pi}$  and  $F(\hat{\pi})$ .
  - Large  $h \Rightarrow$  biased derivative (error of approximation)
  - Small  $h \Rightarrow$  biased derivative (error of RT modelling)

**$\Rightarrow$  Forward modelling of Jacobian Matrix**

# Differentiable radiative transfer

Differentiable radiative transfer modelling with DART

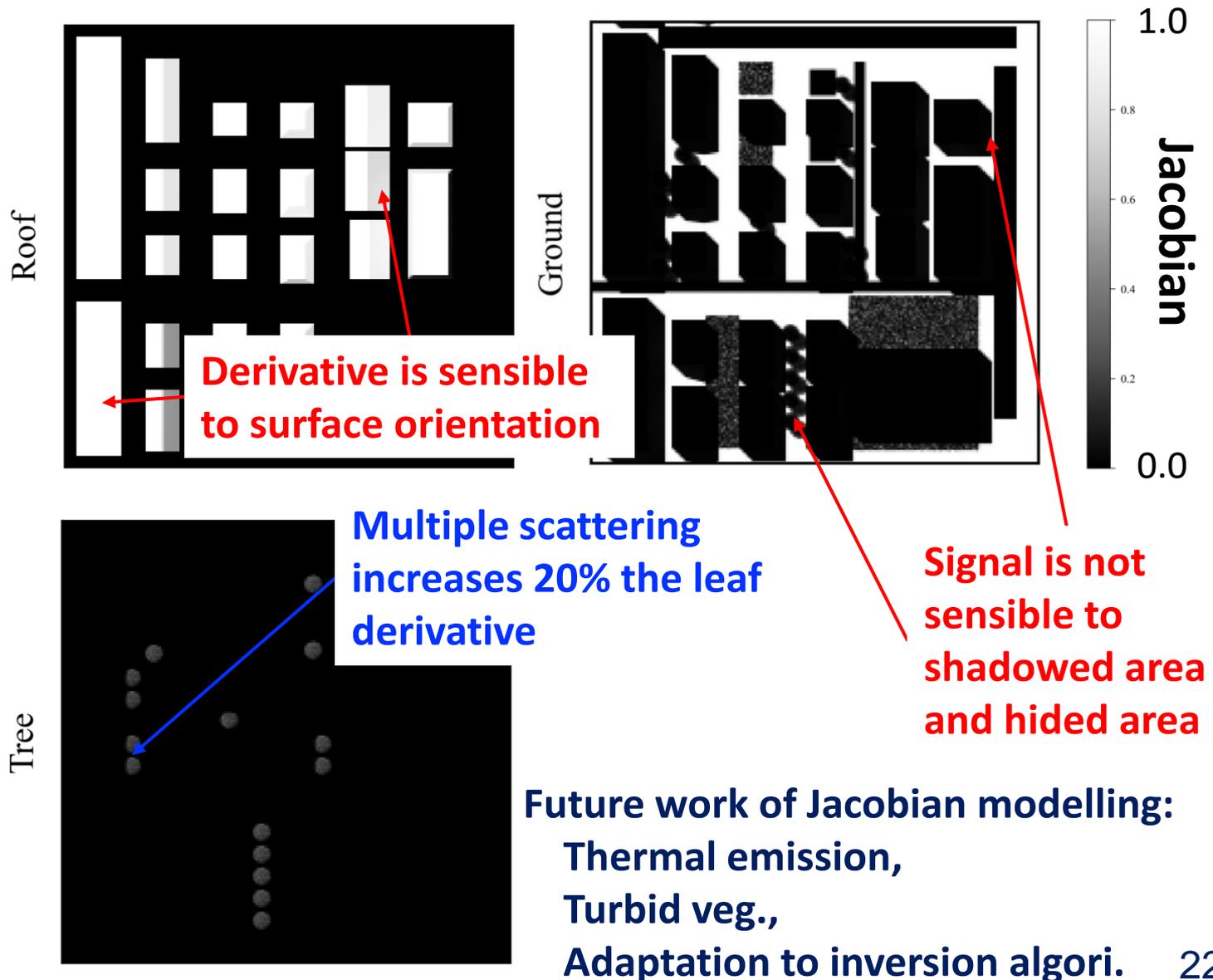
⇒ DART scene consists of 7 elements (roof, wall, roads, tree, grass, ground, water)



DART Scene

Nadir image

# Differentiable radiative transfer





# Experimental Heat Transfer Characterization of Outdoor PV Modules

*December 07<sup>th</sup>, 2023*

*Liliane BOU NASSIF*

*Stéphanie GIROUX-JULIEN*

*Hervé PABIOU*

Contact : [herve.pabiou@insa-lyon.fr](mailto:herve.pabiou@insa-lyon.fr)

# Thermal Challenges in PV

Why heat exchanges are important for PV plants ?

**Predicting energy production is crucial for energy market**

Need to balance electricity production on a daily basis → Intraday or day-ahead trading

Precise forecasting of electricity production is a matter of competitiveness

→ **Efficiency is temperature – dependent (crystalline silicon)**

Power temperature coefficient:  $\frac{dP}{P} = \frac{d\eta}{\eta} \sim -\beta(T_{cell} - T_{STC})$

For crystalline silicon:  $\beta \simeq -0.004 \text{ K}^{-1}$

$$T_{cell} = T_{STC} + 25^{\circ}\text{C} \Rightarrow \frac{dP}{P} \simeq -10\%$$

→ **PV module ageing :**

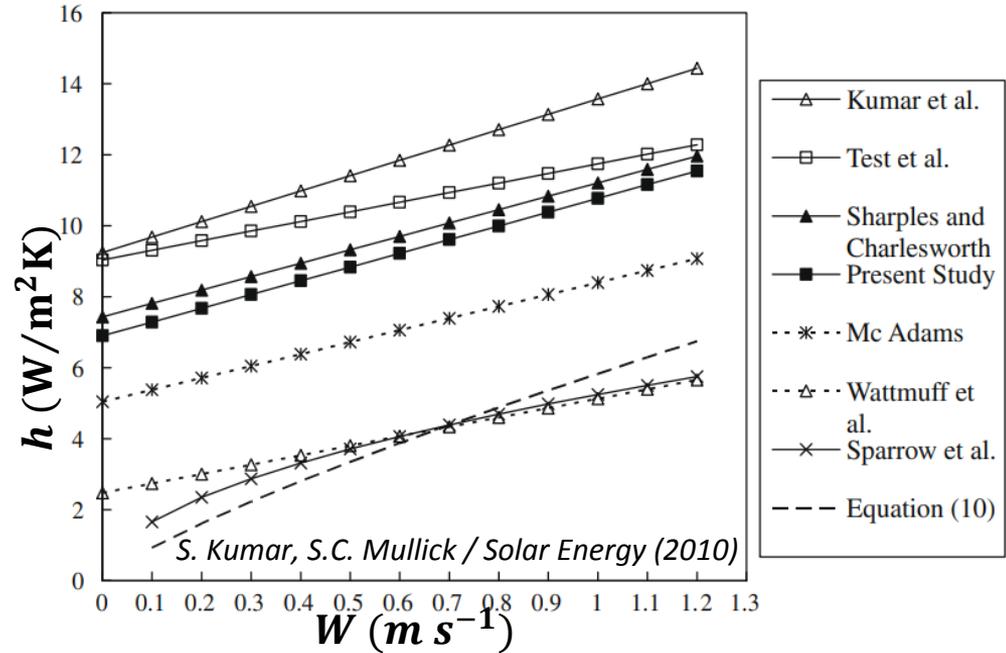
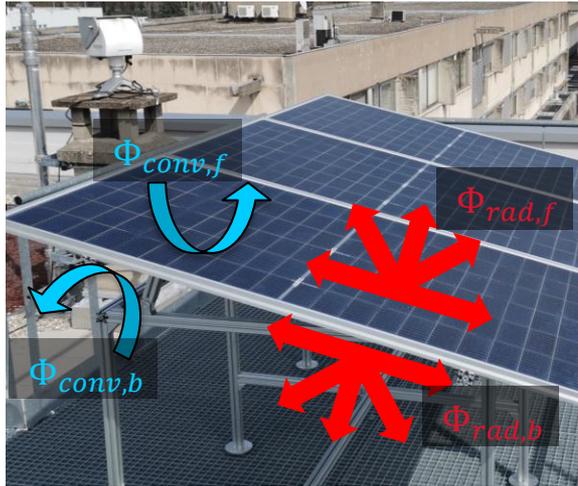
+1°C causes 3-5-years drop in modules lifetime(\*)

(\*) Xia, Z., Wohlgemuth, J. H. & Cunningham, D. W. *IEEE Photovolt. Spec. Conf.* (2009)

# Thermal Challenges in PV

Heat exchange on PV module

$$h_{global} = h_{conv} + h_{rad}$$



Forced convection:

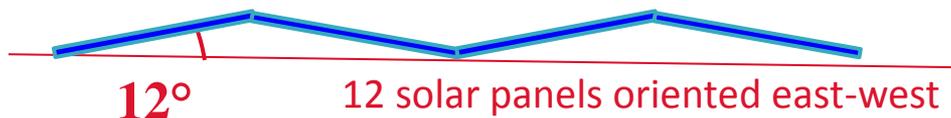
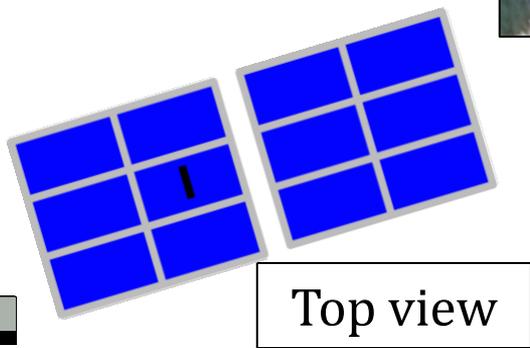
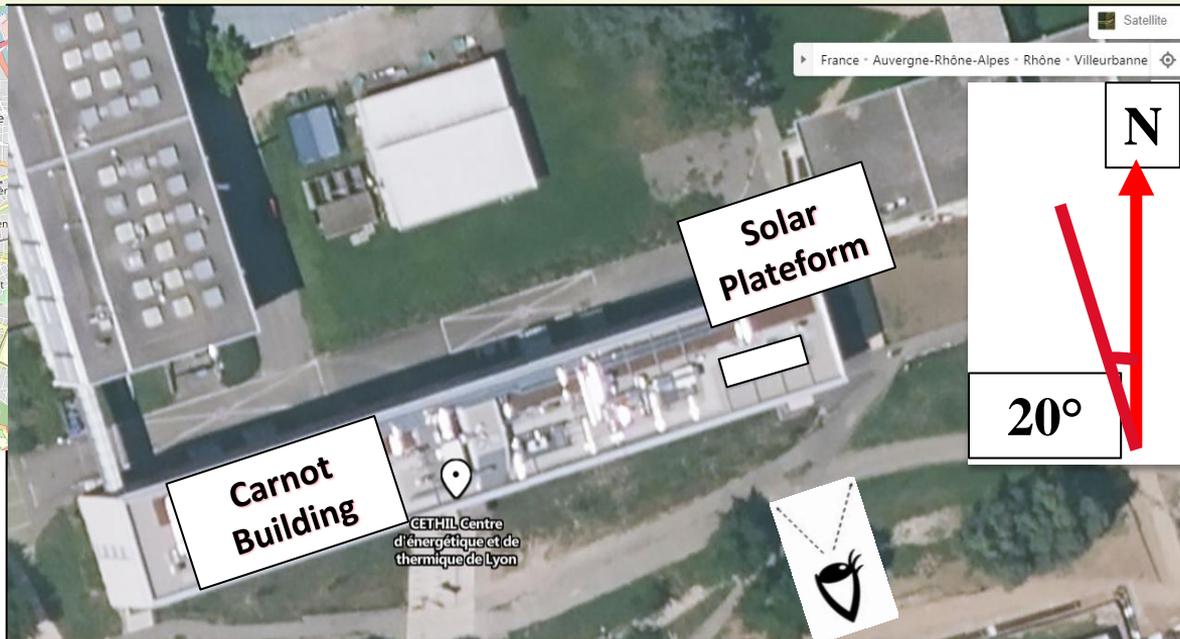
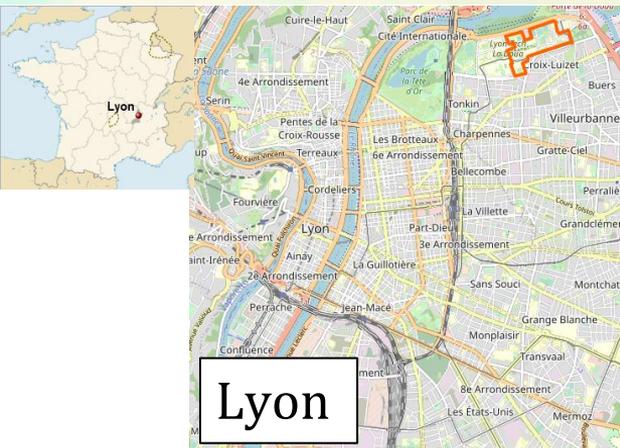
$$\rightarrow Nu = aRe^b \quad Re \gtrsim Re_0 \quad Nu(Re_0) + abRe_0^{b-1} (Re - Re_0)$$

$$\rightarrow h = h_c + h_v W$$

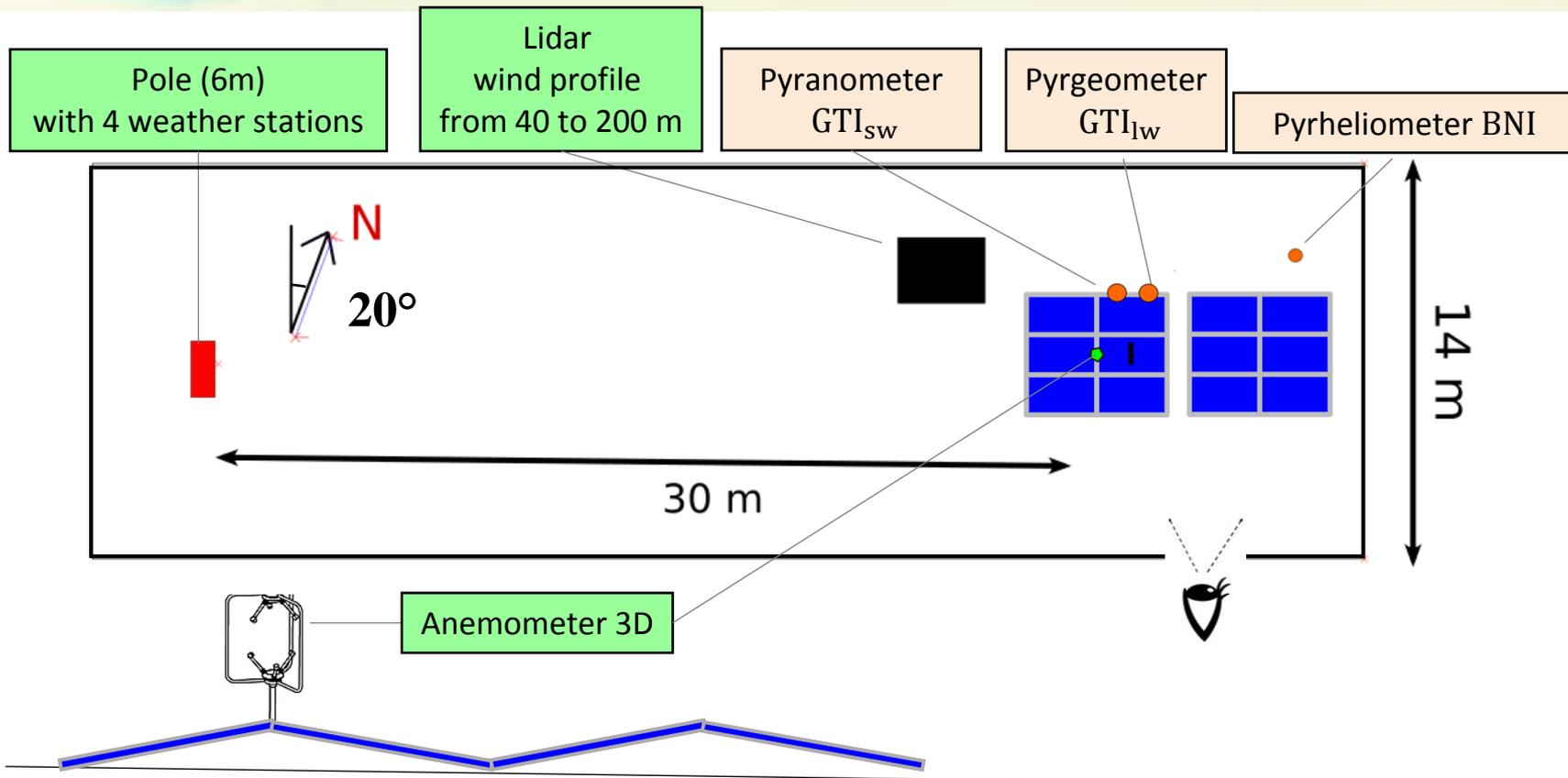
**Convective heat transfer coefficient:**

- Measurement ?
- Modelling ?

# Solar Platform at CETHIL

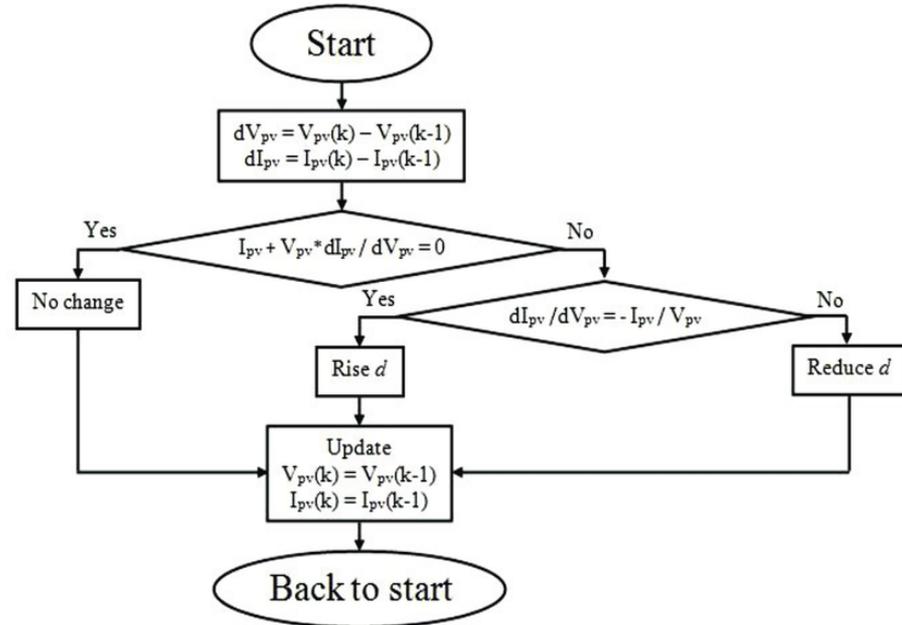
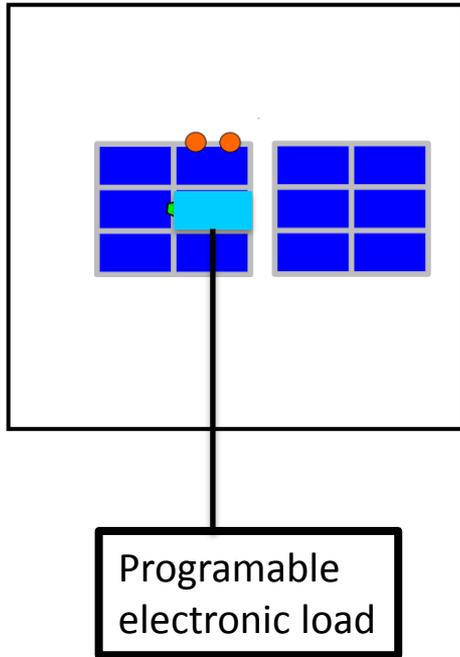


# Solar Platform at CETHIL



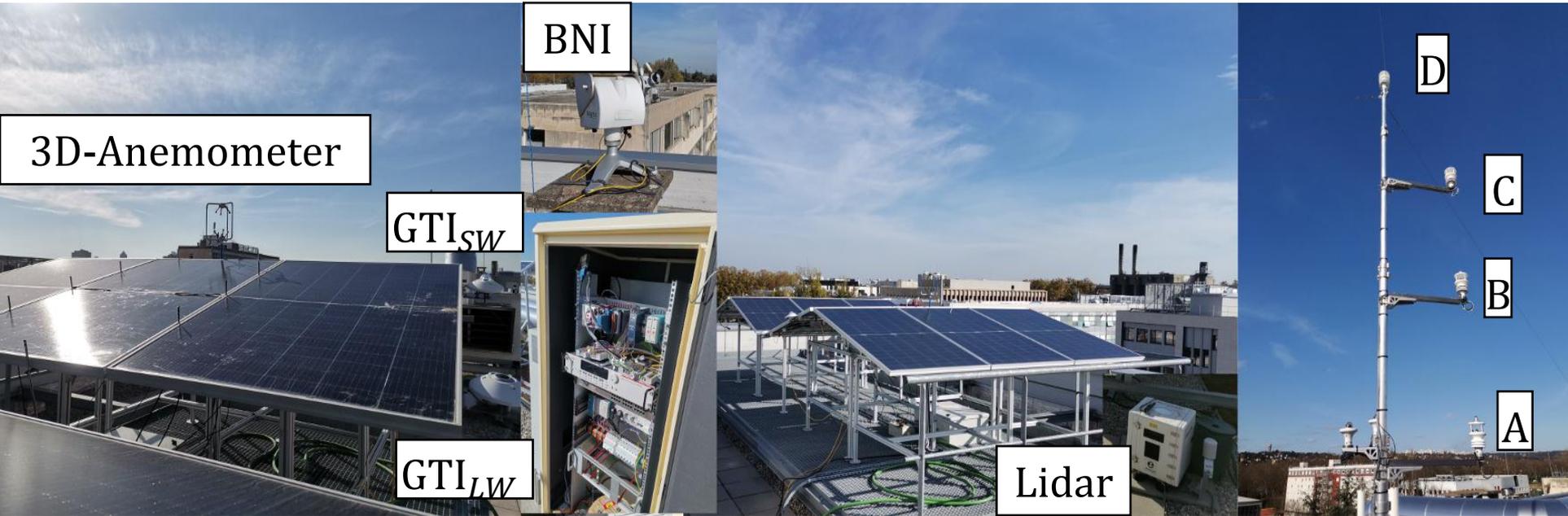
# Solar Platform at CETHIL

Electrical power: 1 panel at maximum power point



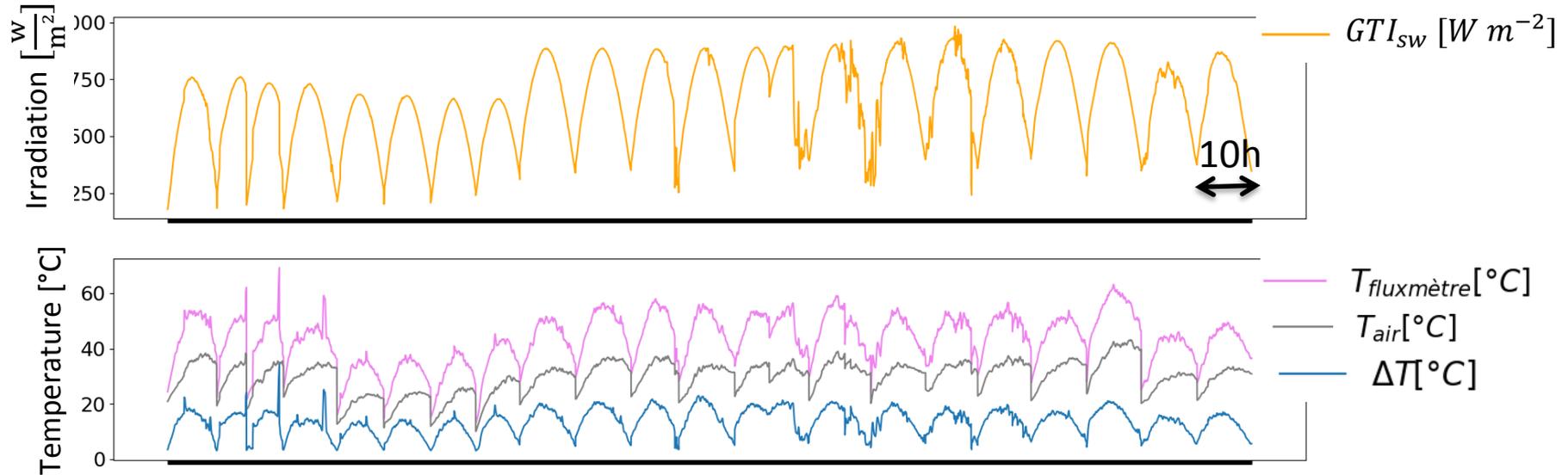
Incremental conductance algorithm

# Solar Platform at CETHIL



# Convective Heat Transfer - Dataset

Dataset: 10h/d x 22d = 220h ; 10min-rolling-average ;  $f=1\text{min}^{-1}$



# Convective Heat Transfer – Reference Measurement

## Heat balance of an instrumented plate

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha_{sw} GTI_{sw} S_p - \varepsilon_{lw,f} (\sigma T_m^4 - GTI_{lw}) S_p - h_f (T_m - T_{air}) S_p - \Phi_b$$

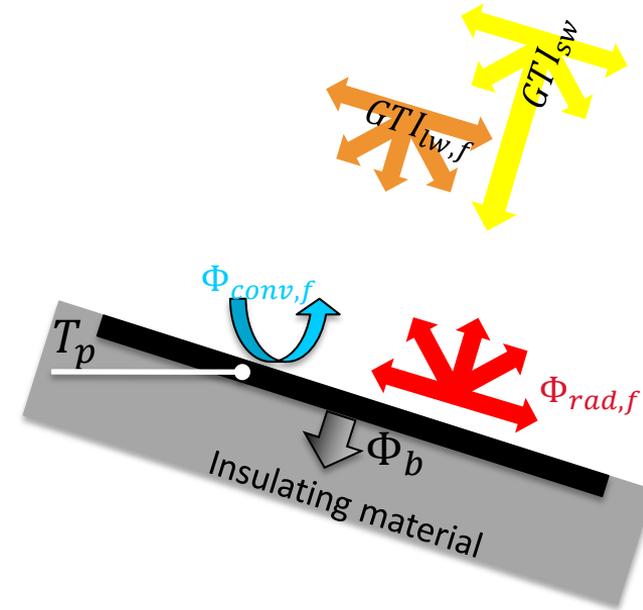
$$h_f = \frac{1}{(T_m - T_{air}) S} \left[ \alpha_{sw} GTI_{sw} S_p - \varepsilon_{lw,f} (\sigma T_m^4 - GTI_{lw}) S_p - \Phi_p - m_p C_p \frac{dT_p}{dt} \right]$$

### Hypothesis

- View factor  $F_{p \rightarrow sky} = 1$
- $h_f$  independent on temperature

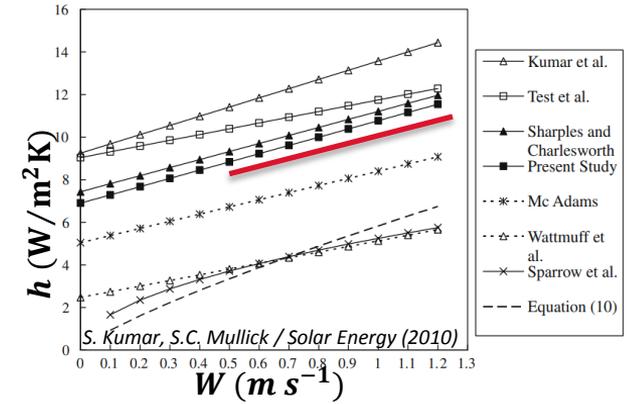
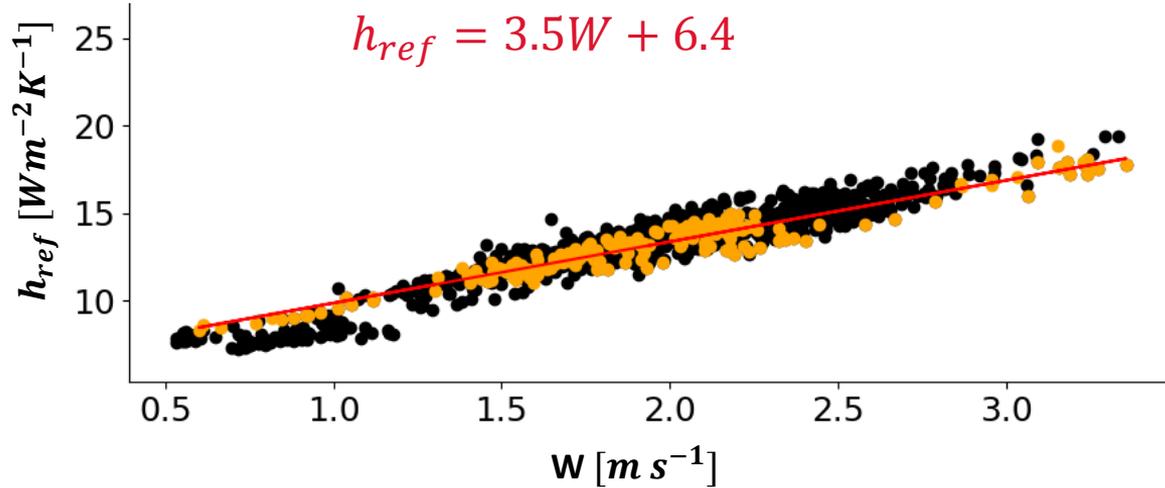
### Measurements

- $T_p, T_{air}$ : thermocouples
- $\alpha_{sw}, \varepsilon_{lw,f}$ : spectrometer measurements
- $GTI_{sw}$ : pyranometer
- $GTI_{lw}$ : pyrgeometer or empirical law for  $T_{sky}$
- $\Phi_p$ : heat flux meter or neglected
- $m_p C_p \frac{dT_p}{dt}$ : may be neglected for thin film



Warning: plate can heat up to 90°C !!

# Convective Heat Transfer – Reference Measurement



How to measure  $h_f$  on a PV panel in operation ?

# Convective Heat Transfer – Direct Measurement

## Heat flux sensor

- Custom-made sensor to avoid shading effect
- Sensitivity:  $6 \mu V / (W m^{-2})$

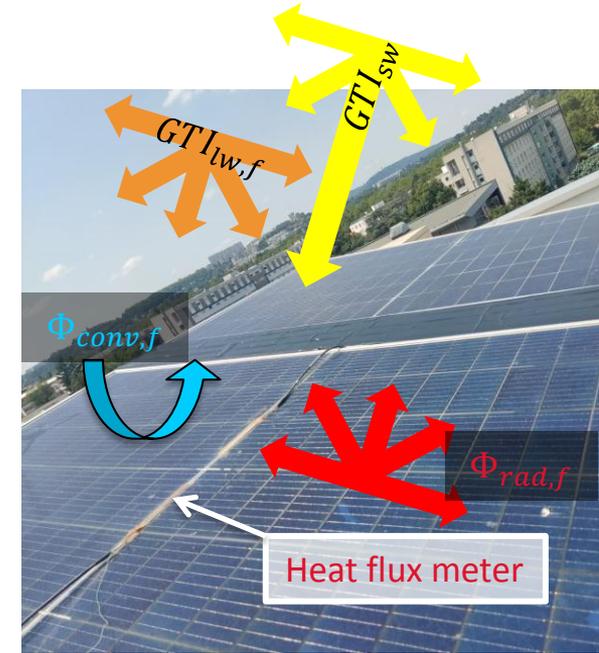
$$\Phi_{meas} = \Phi_{conv} + \Phi_{net\_rad}$$

$$\Phi_{net\_rad} = [\Phi_{emi} - \Phi_{abs}]_{sw} + [\Phi_{emi} - \Phi_{abs}]_{lw}$$

$$\Phi_{meas} = \underbrace{h_f(T_{fl} - T_{air})}_{conv} - \underbrace{\alpha_{fl,sw} GTI_{sw}}_{net\_rad_{sw}} + \underbrace{\alpha_{fl,lw}(\sigma T_{fl}^4 - GTI_{lw})}_{net\_rad_{lw}}$$

$T_{fl}$ : temperature of the heat flux meter

$\alpha_{fl,sw}$ ;  $\alpha_{fl,lw}$ : absorptivity of the heat flux meter in the short and long wavelength ranges

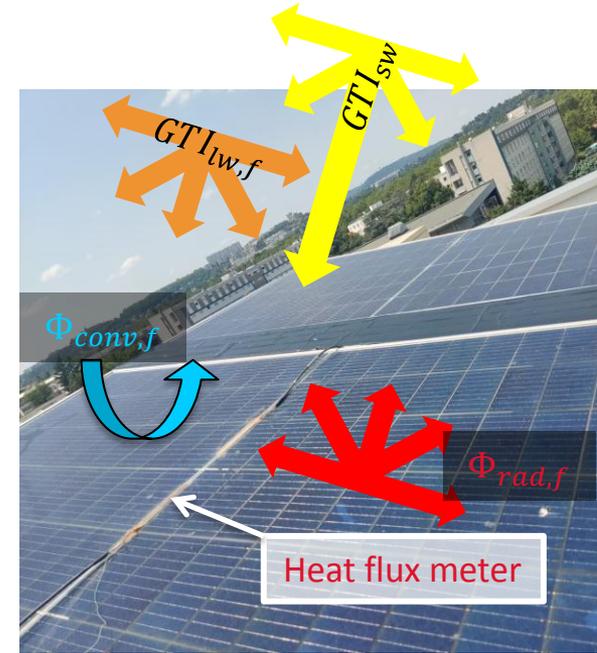


# Convective Heat Transfer – Direct Measurement

$$\Phi_{meas} = \underbrace{h_f(T_{fl} - T_{air})}_{conv} - \underbrace{\alpha_{sw}GTI_{sw}}_{net\_rad_{sw}} + \underbrace{\alpha_{lw}(\sigma T_{fl}^4 - GTI_{lw})}_{net\_rad_{lw}}$$

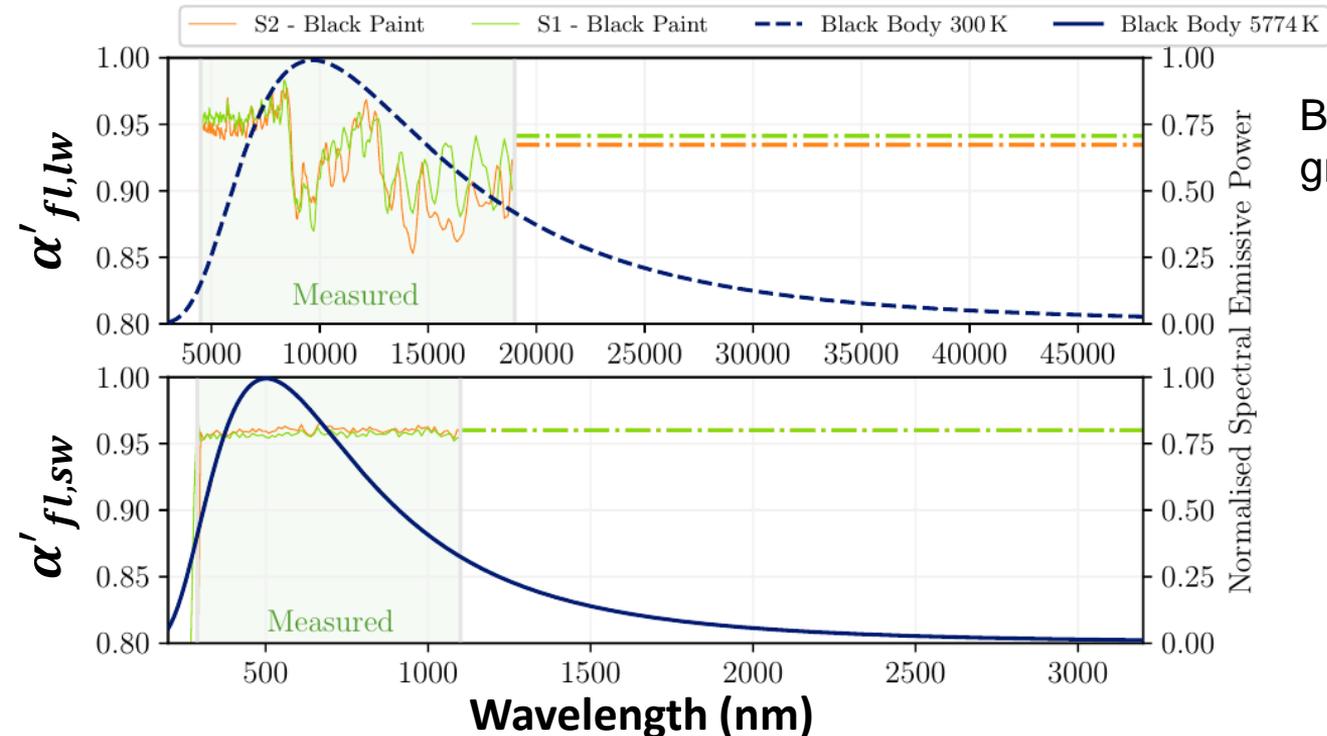
## Measurements:

- $\Phi_{meas}$
- $T_{fl}; T_{air}$
- $\alpha_{fl,sw}; \alpha_{fl,lw}$  (black coating)
- $GTI_{sw}; GTI_{lw}$  or  $T_{sky}$



# Convective Heat Transfer – Direct Measurement

## Absorptivity of black painted heat flux meter measured by spectrometer



Black coating is assumed to be grey on the sw and lw bands

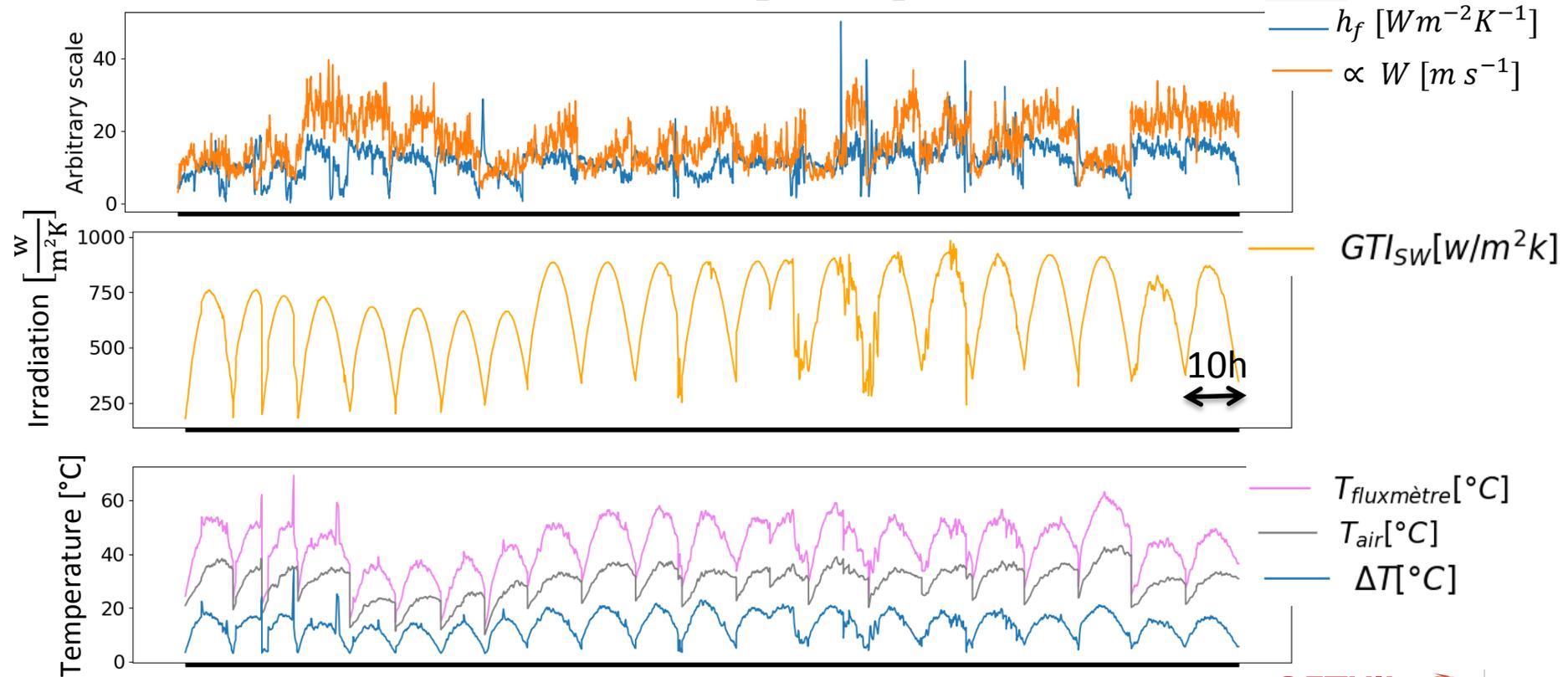
$$\alpha_{fl} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha'_{fl}(\lambda) d\lambda$$

$$\alpha_{sw} = 0.9$$

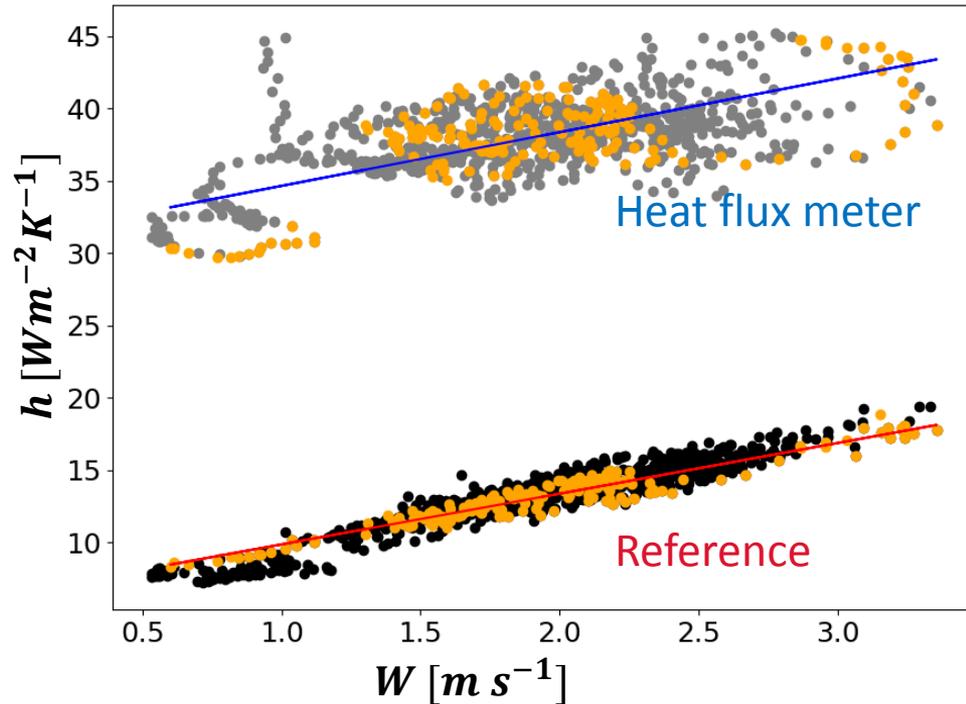
$$\alpha_{lw} = 0.95$$

# Convective Heat Transfer – Direct Measurement

Dataset: 10h/d x 22d = 220h ; 10min-rolling-average ;  $f=1\text{min}^{-1}$



# Convective Heat Transfer – Comparison with Reference



$$h_f = 3.7W + 30.9$$



$$h_{ref} = 3.5W + 6.4$$

# Convective Heat Transfer – Comparison with Reference

$$h_f(T_{fl} - T_{air}) = \Phi_{meas} + \alpha_{sw}GTI_{sw} - \alpha_{lw}(\sigma T_{fl}^4 - GTI_{lw})$$

Visual inspection of the sensor 6 months after installation: sand soiling

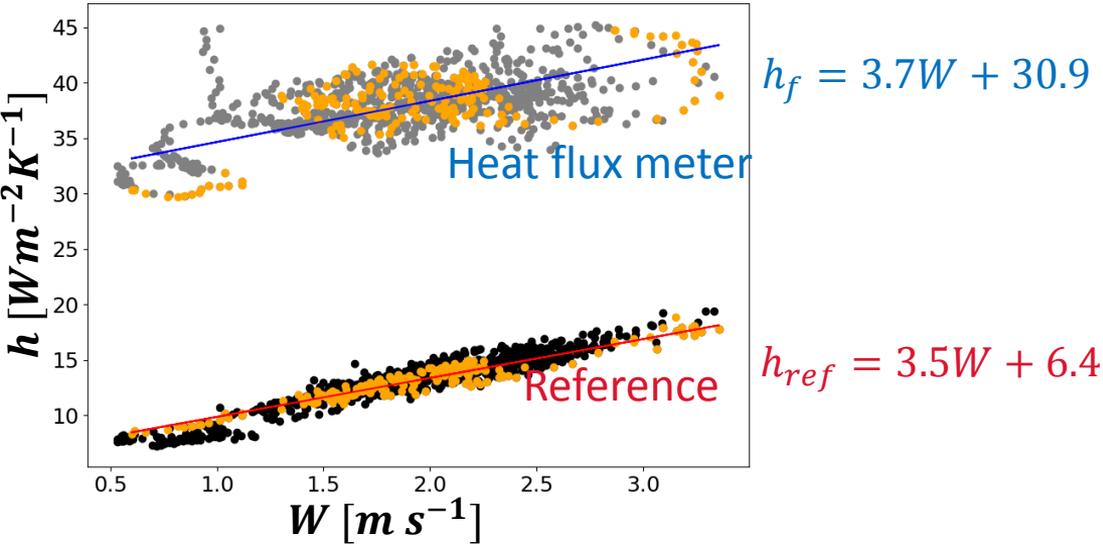
==> Hypothesis: uncertainty comes from a change in the absorptivity in the short wave range

$$\alpha_{sw\_true} = \alpha_{sw\_meas} + \delta\alpha_{sw}$$

$$\underbrace{h_f(\alpha_{sw\_true})}_{corrected} = \underbrace{h_f(\alpha_{sw\_meas})}_{measured} + \frac{\partial h_f}{\partial \alpha_{sw}} \delta\alpha_{sw} \quad \text{with} \quad \frac{\partial h_f}{\partial \alpha_{sw}} = \frac{GTI_{sw}}{T_{fl} - T_{air}}$$

$$h_{f,corr} = h_{f,meas} + \frac{GTI_{sw}}{T_{fl} - T_{air}} \delta\alpha_{sw}$$

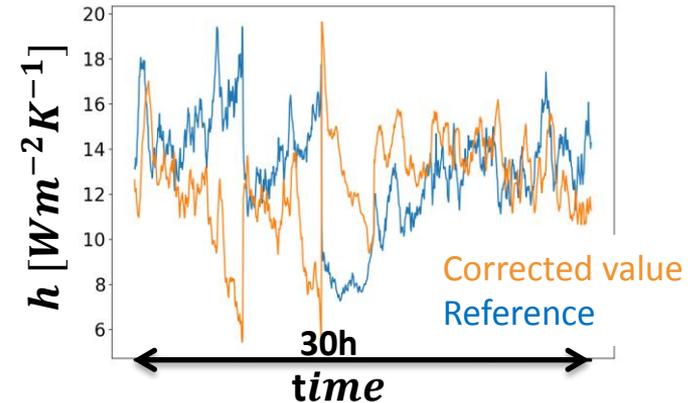
# Convective Heat Transfer – Comparison with Reference



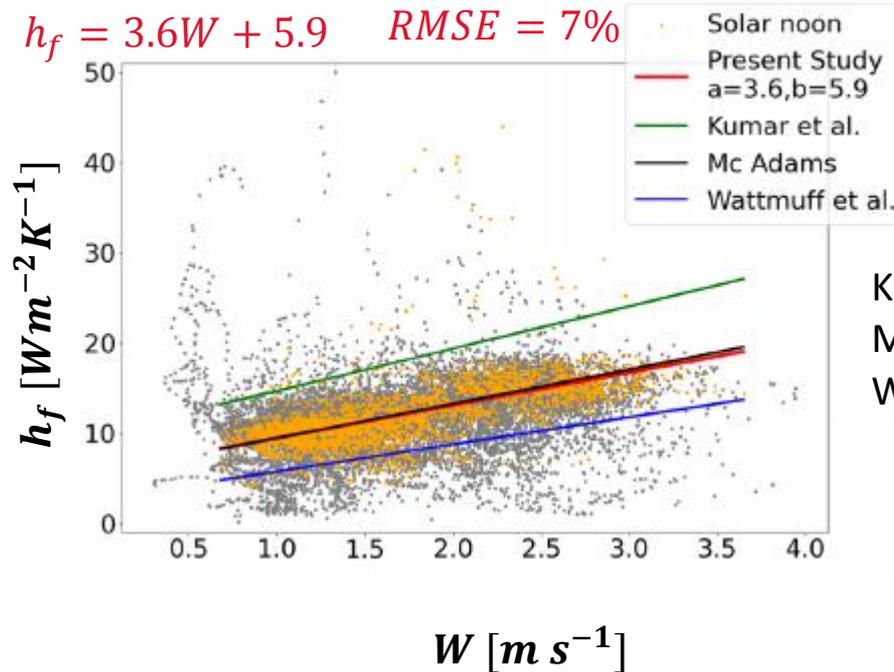
Correction is consistent

$$h_{f,corr} = h_{f,meas} + \frac{GTI_{sw}}{\underbrace{T_{fl} - T_{air}}_{\approx U_{val}}} \delta\alpha_{sw}$$

Best choice  $\rightarrow \alpha_{sw,corr} = 0.45$

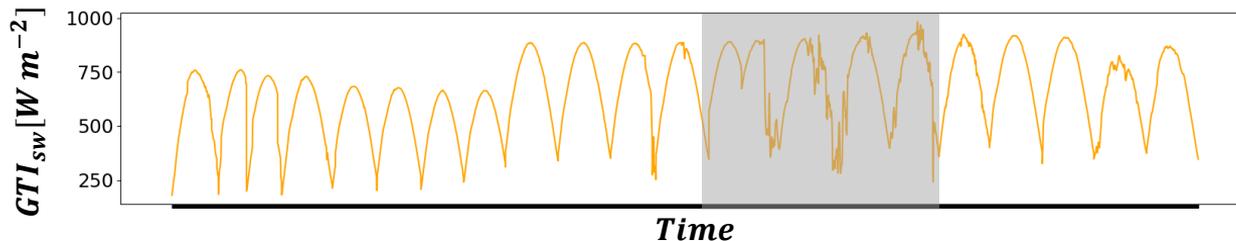
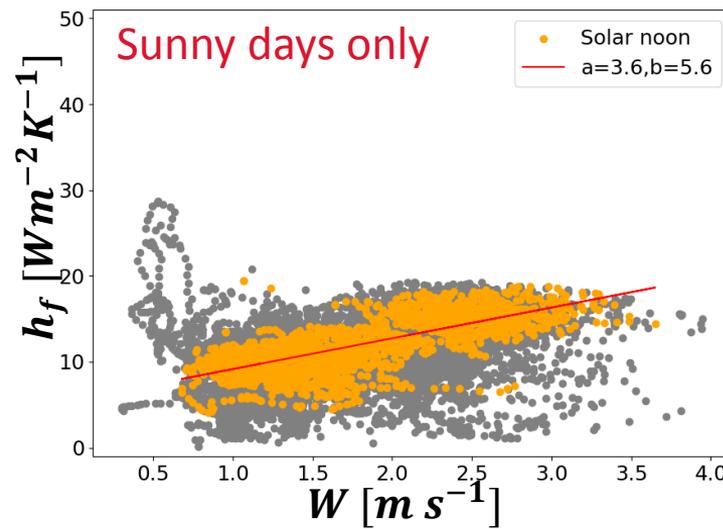
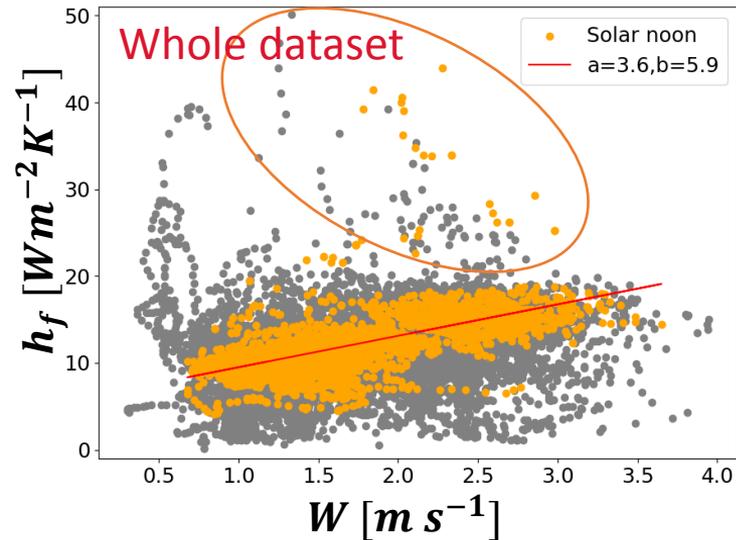


# Convective Heat Transfer – Linear Regression at solar noon



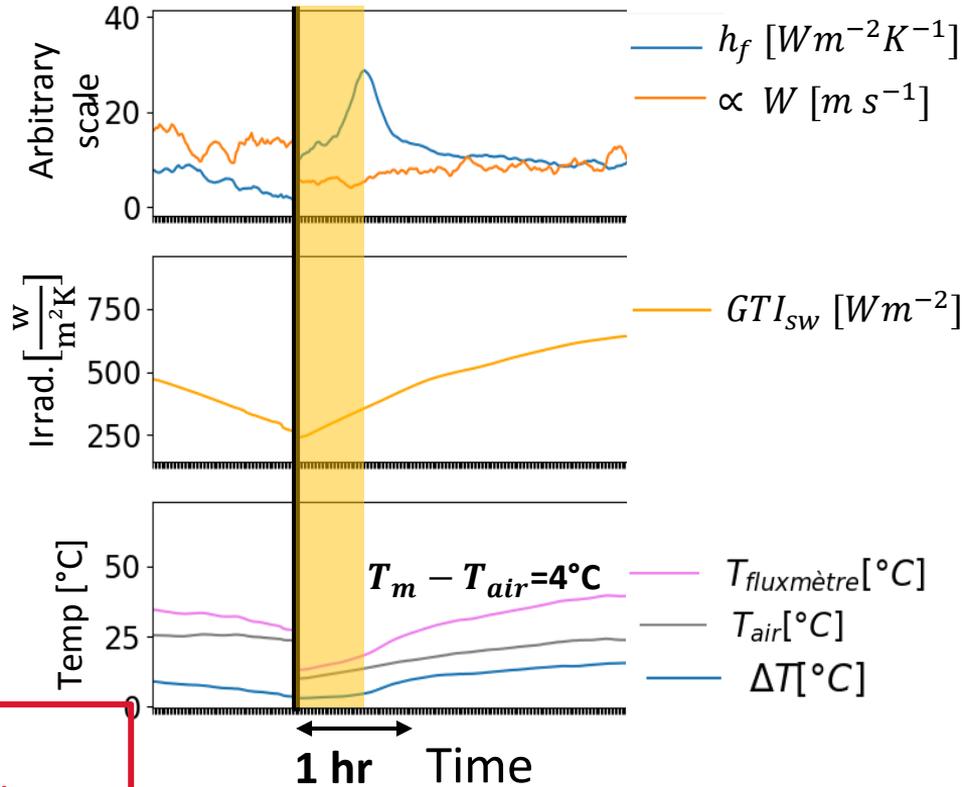
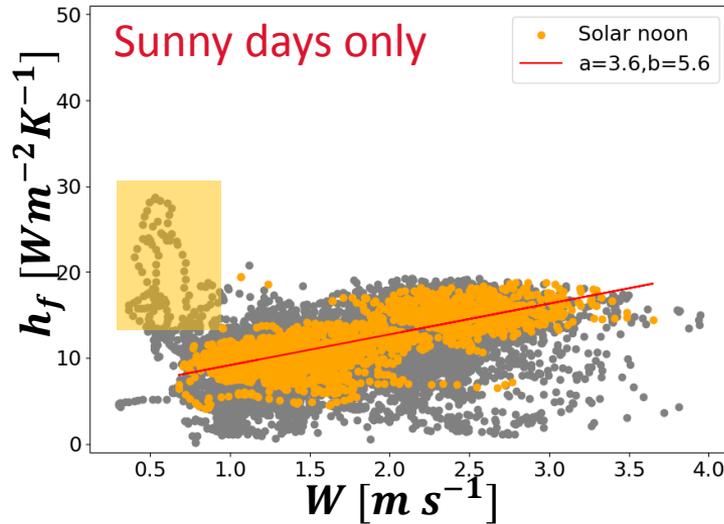
Kumar et al. : indoor experiment  
Mc Adams: Wind tunnel  
Wattmuff et al. : Wind tunnel

# Convective Heat Transfer – Outliers points



Most of outliers occur during cloudy days

# Convective Heat Transfer – Outliers points



Other outliers values due to inertia effect  
 $\rightarrow \Phi_{meas}$  and  $T_m - T_{air}$  are sometimes out of phase

# Conclusions

## Direct measurement of $h_f$

- Custom-made heat-flux meter
- The measurements are valid as long as the coating remains clean or if the measurements are taken immediately after installation
- Promising solution but improvements are needed especially in unsteady conditions (cloudy days) → unsteady model for heat flux meter ?



## Journée thématique

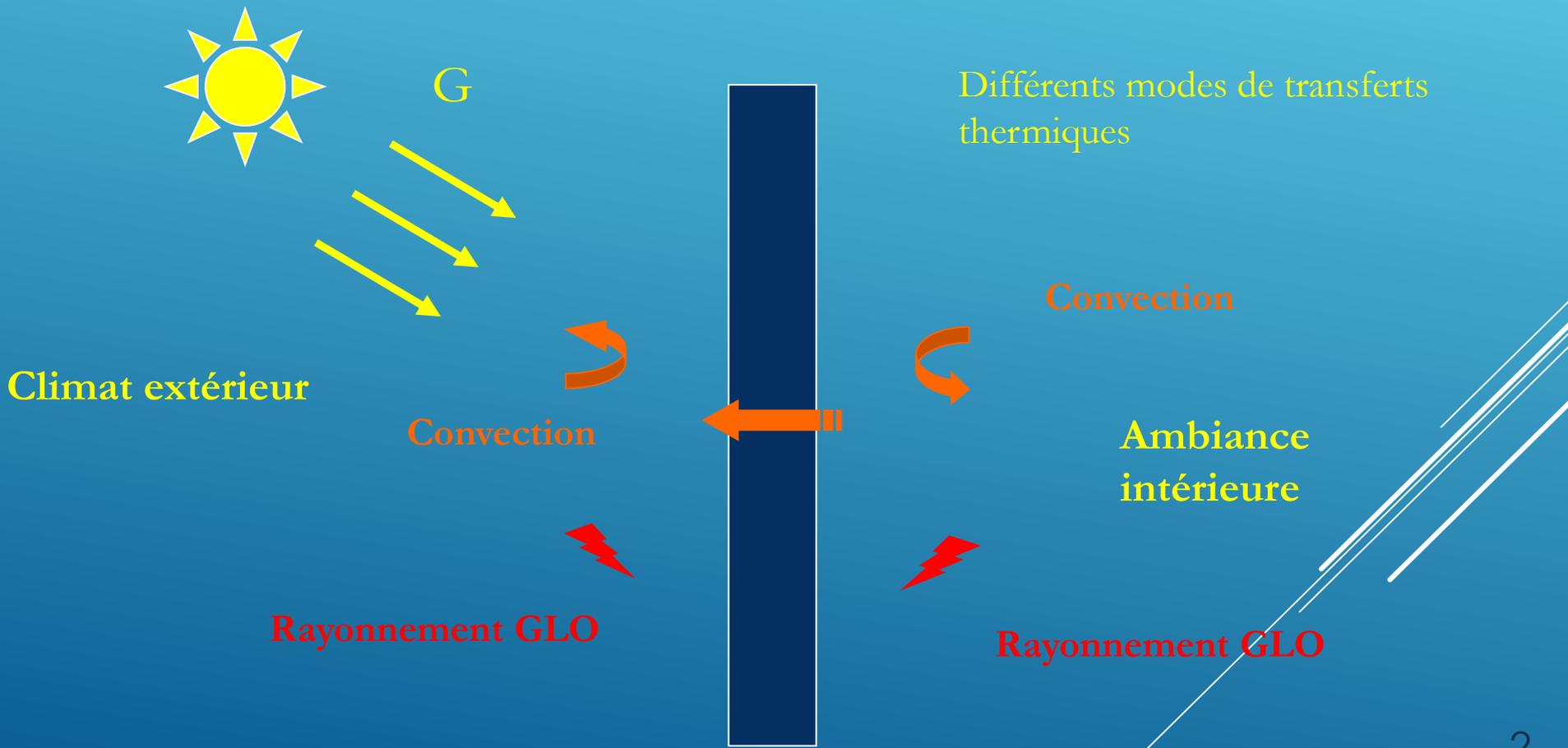
« Température radiante en milieu urbain : Mesures et modélisation »

"Mesures fluxmétriques. Séparation des échanges thermiques superficiels convectifs et radiatifs à la surface d'une paroi de bâtiment"

Stéphane LASSUE, Laurent LIBESSART

## Environnement climatique d'une paroi de l'enveloppe d'un bâtiment

Rayonnement Solaire CLO



## Bilan énergétique instantané d'un vitrage en présence de rayonnement solaire

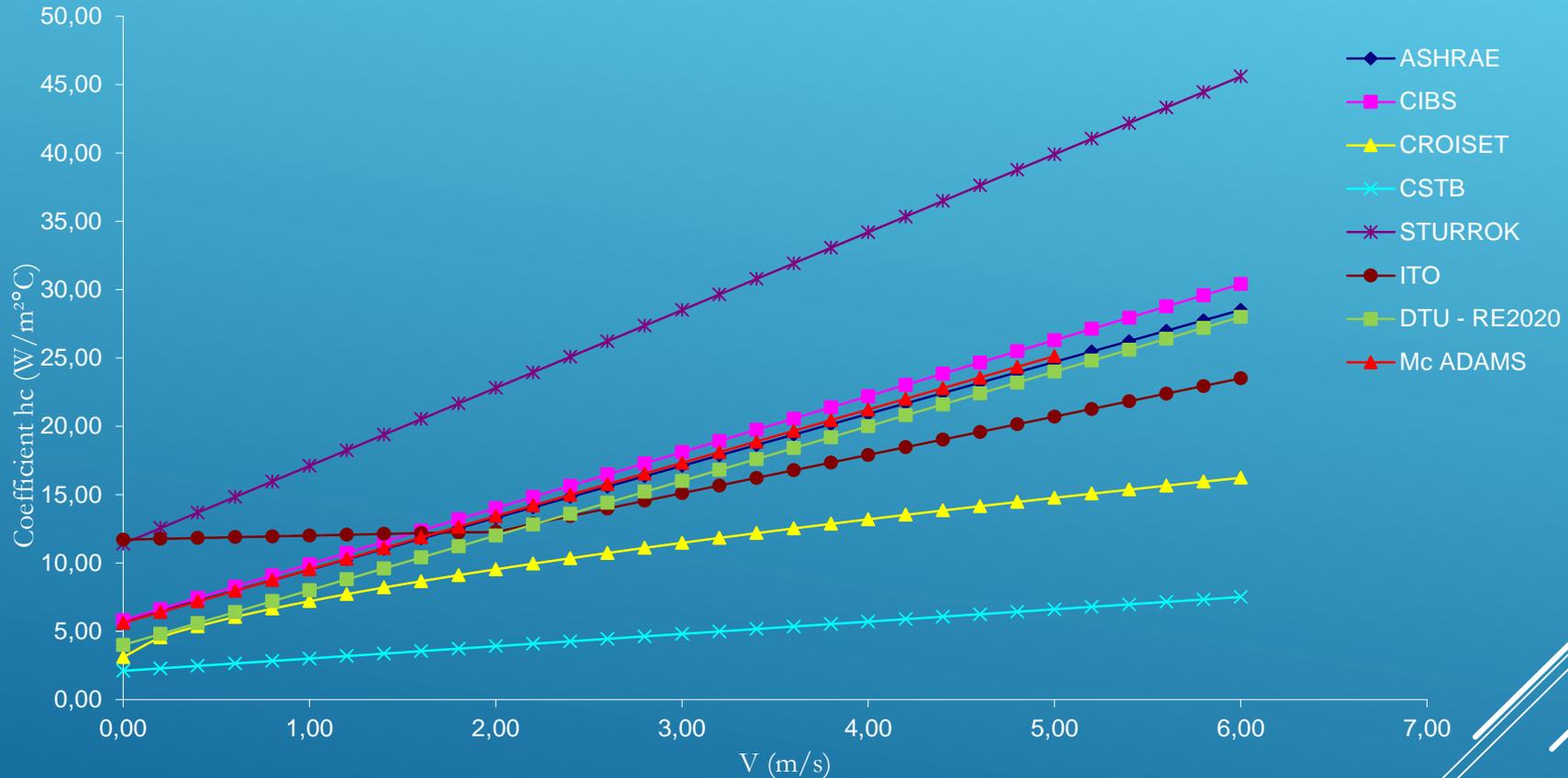
$$\phi = U_g \left[ (\theta_i - \theta_e) - \frac{\alpha_v \cdot G}{h_e} \right] - \tau_v \cdot G \quad (\text{W/m}^2)$$

- La composante solaire peut être très importante
- Le coefficient  $h_e$  est dépendant de la vitesse du vent et de la température d'environnement (GLO)

### Problème:

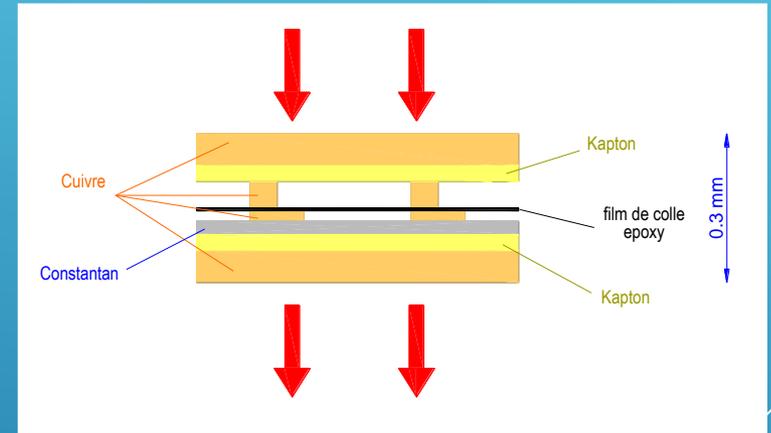
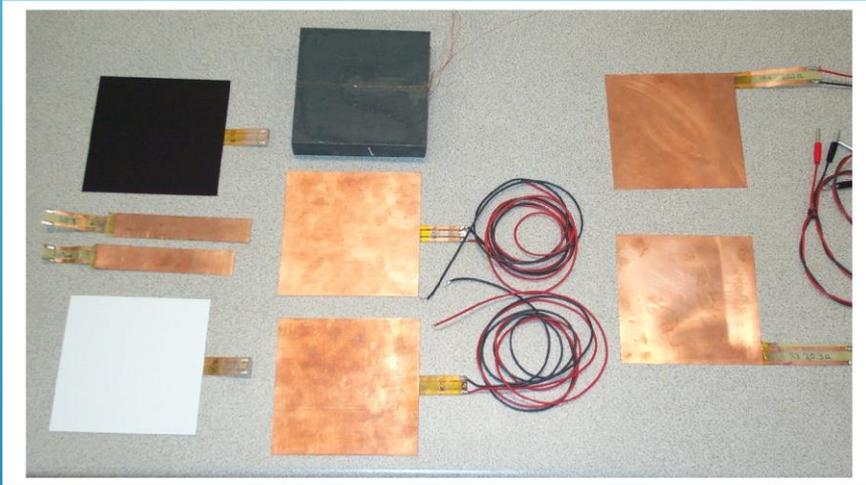
Séparation de phénomènes thermiques très différents et qui peuvent être extrêmement variables

## Diversité des corrélations qui donnent $hc_c$ en fonction du vent

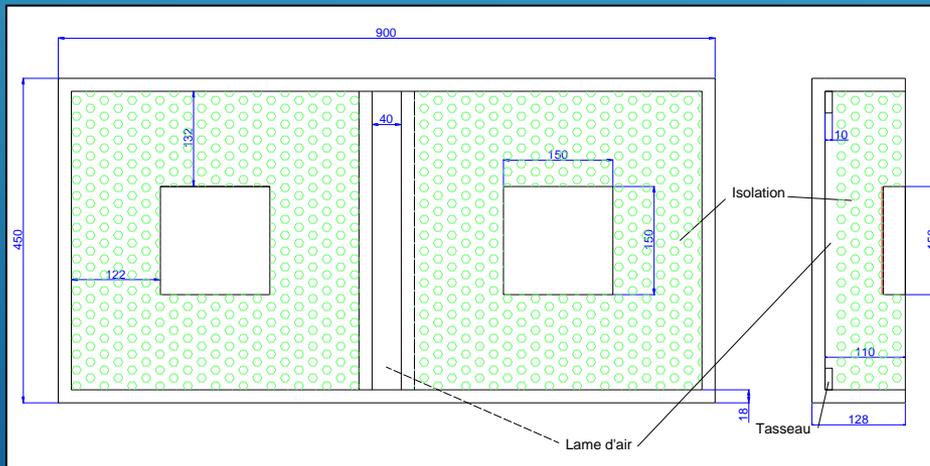


- De plus la configuration des lieux, l'orientation des façades sont des paramètres qui induisent des variations très importantes

## Instrumentation proposée basée sur des mesures fluxmétriques in-situ



Cellule fluxmétrique



Insertion dans un boîtier en bois + isolant rigide

## Montage du dispositif

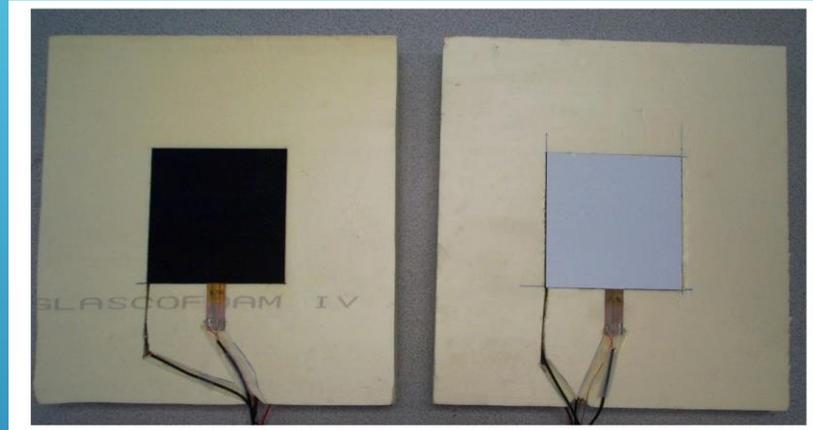
Ensemble flux noir

$$R1 = 20.1 \Omega$$

$$KN1 = 82.943 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$$

$$KN2 = 82.717 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$$

$$KCN = 8.202 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$$



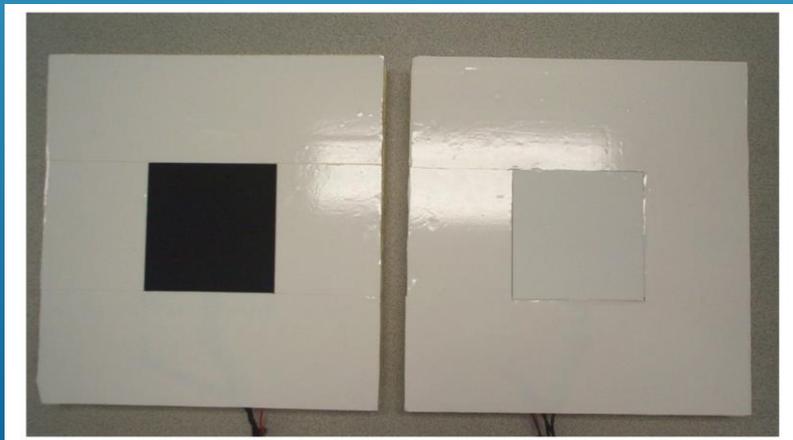
Ensemble flux blanc

$$R2 = 20.3 \Omega$$

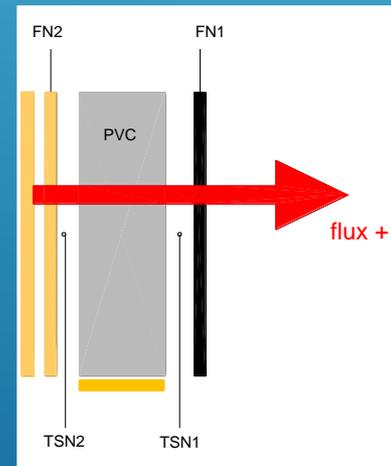
$$KB1 = 94.659 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$$

$$KB2 = 96.995 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$$

$$KCB = 6.864 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$$

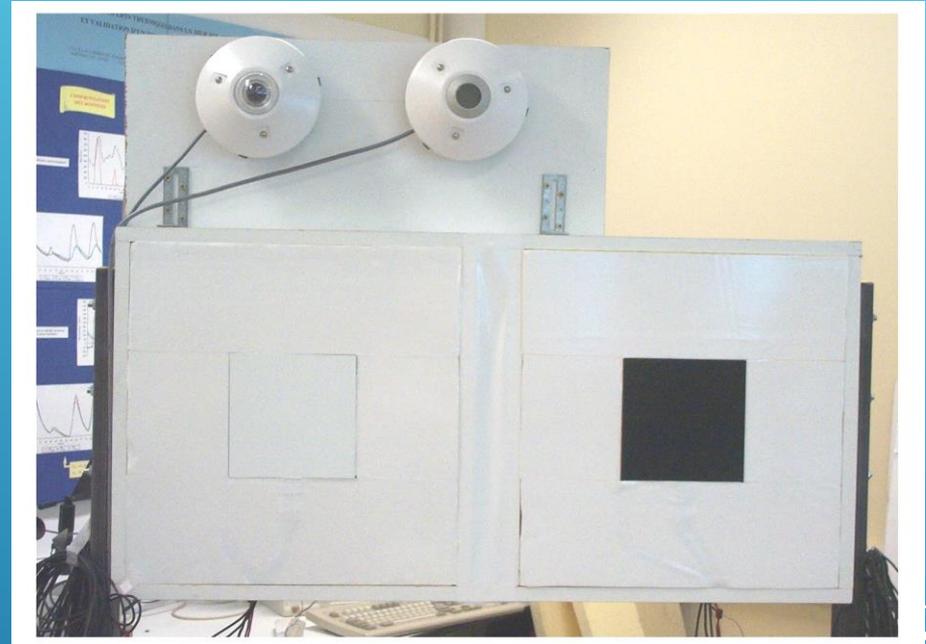


Ensembles finis, contours recouverts d'un film adhésif blanc



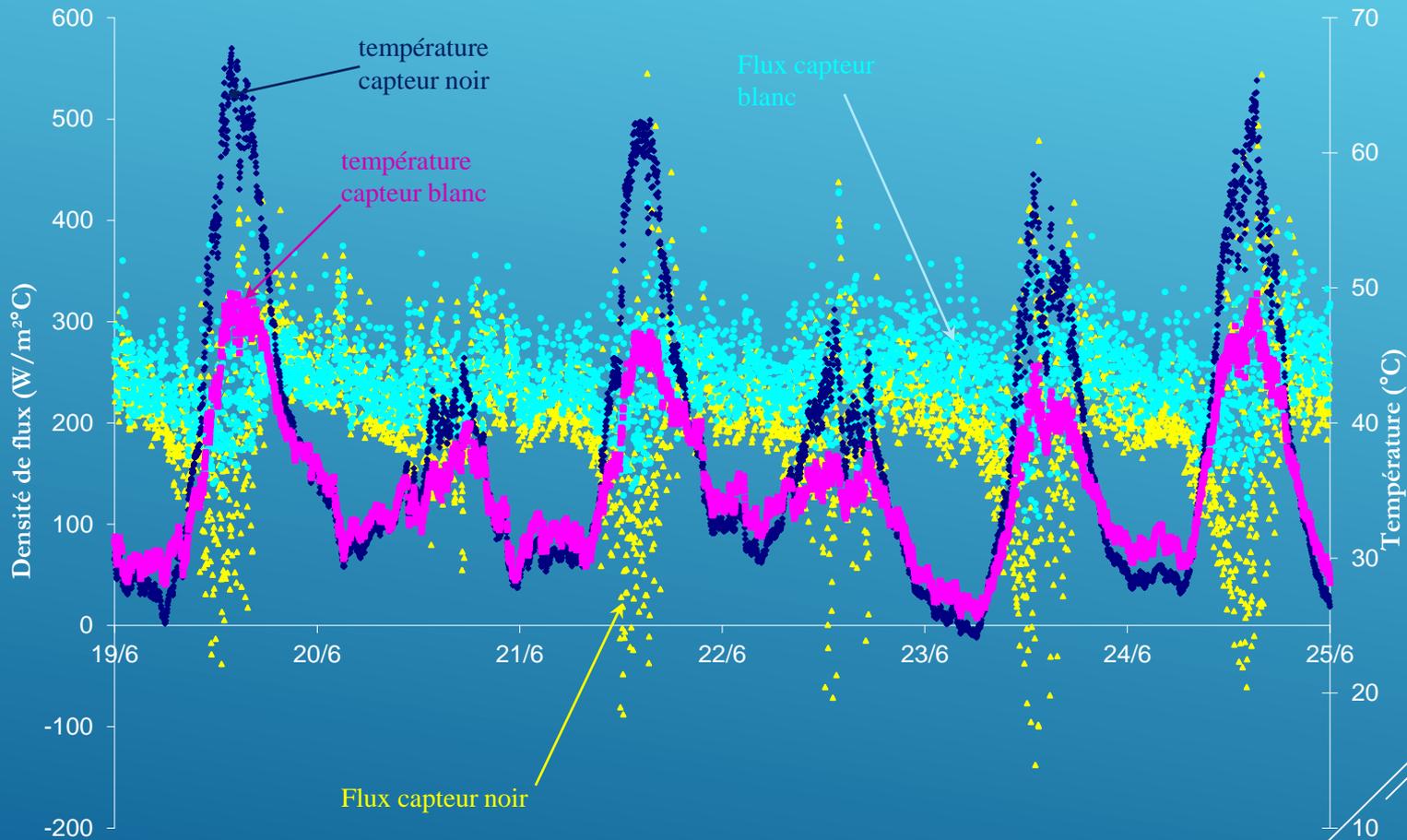
Vue en coupe du dispositif  
positionnement des résistances, capteurs  
de flux et de températures

## Dispositif final avant pose en façade de la faculté à Béthune



Capteurs Blanc et Noir peints par une entreprise spécialisée en composants pour l'aéronautique avec coefficients d'absorption et émissivité certifiés

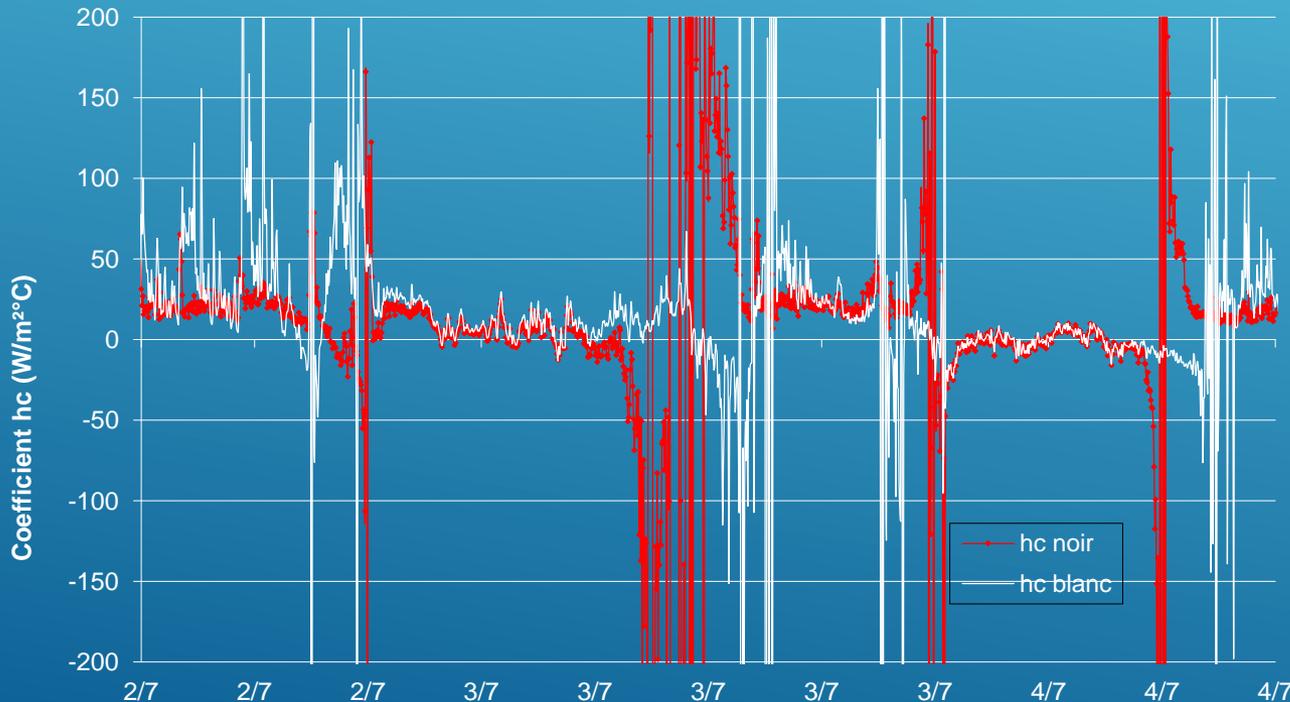
## Courbes de flux et températures – Signaux bruts « naturels »



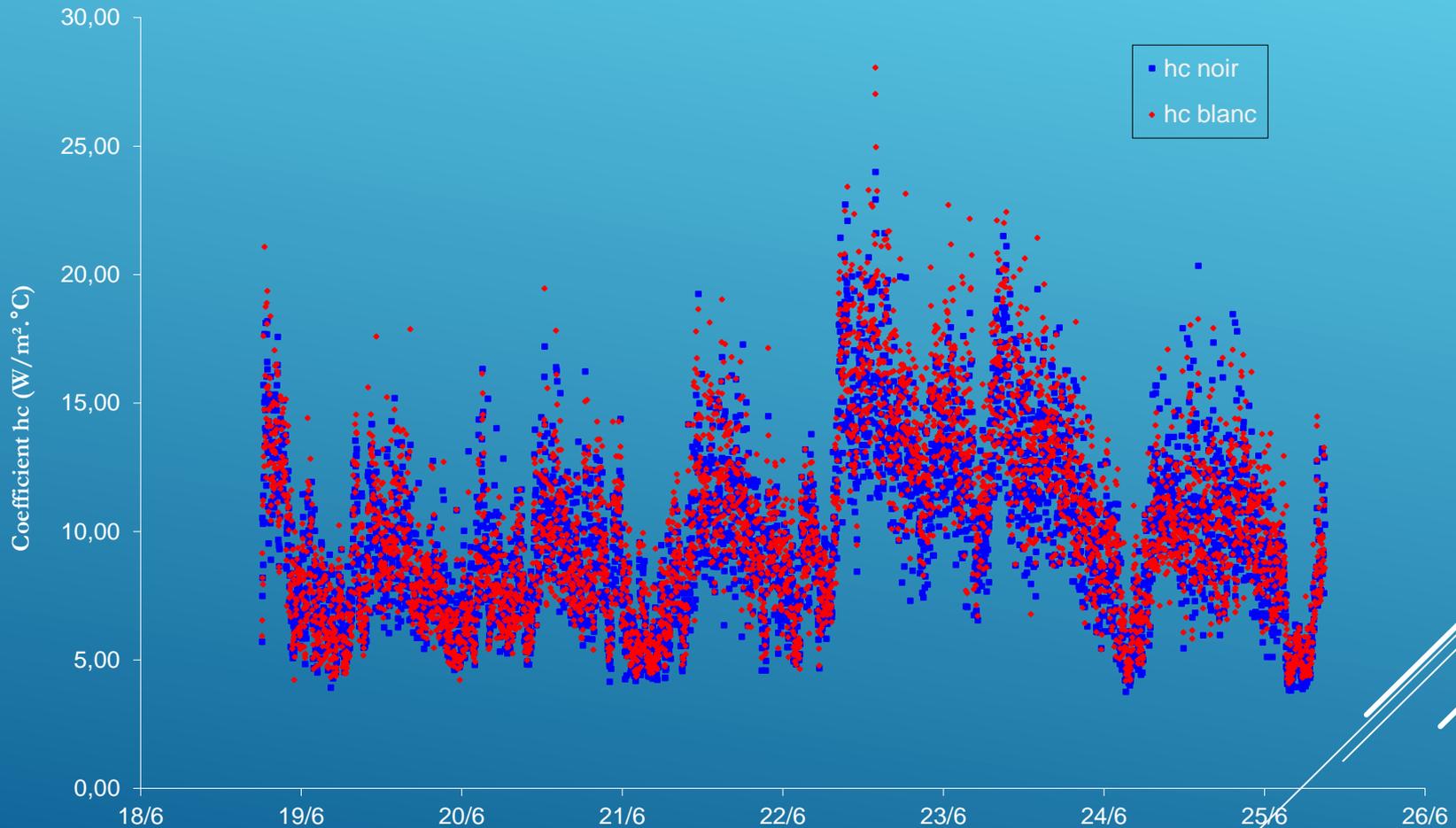
## Coefficient brut d'échange thermique par convection (sans chauffage)

$$h_c = \frac{\phi - hr (T_s - T_{env}) + \alpha_s G}{(T_s - T_{air})}$$

Sur la base d'un bilan d'échanges superficiels linéarisés



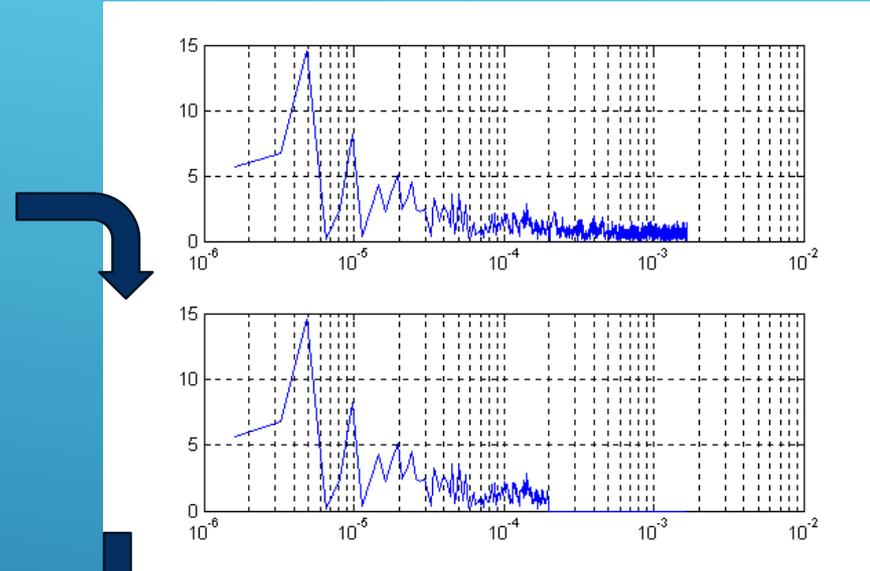
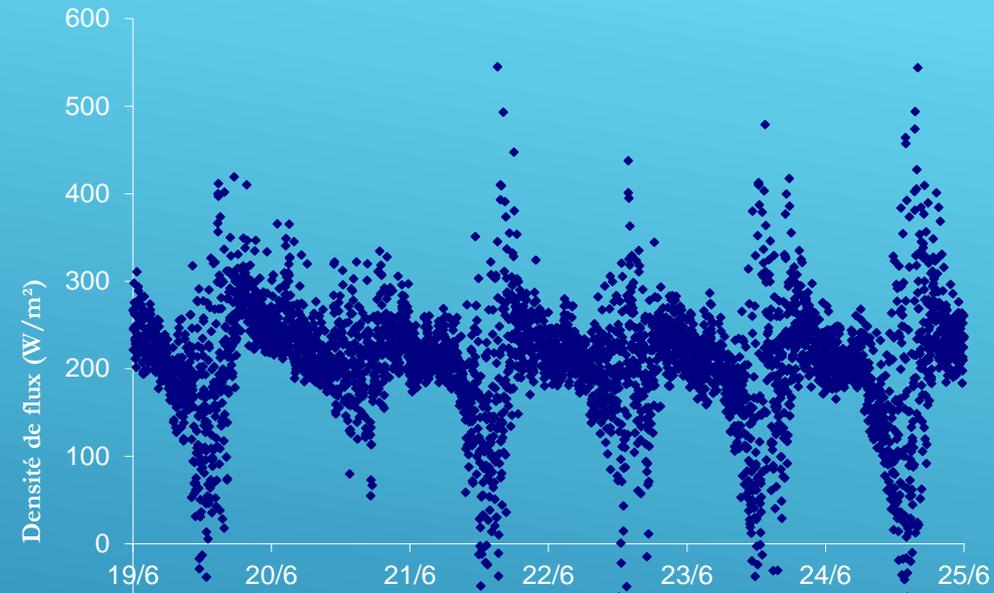
## Coefficient d'échange thermique par convection (avec chauffage)



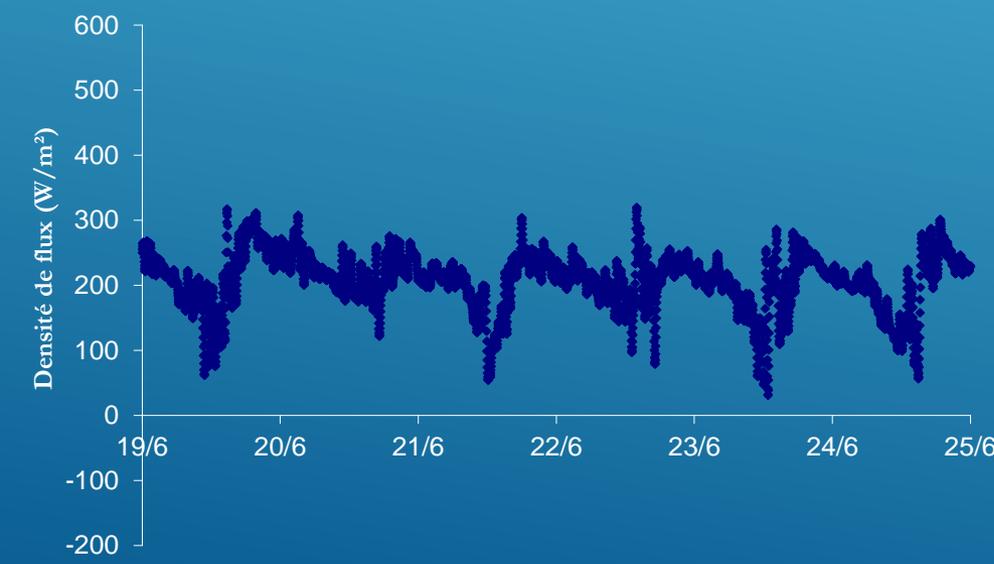
→ signaux encore très bruités mais exploitables

# Choix de lisser les flux par Transformée de Fourier inverse

Ici Flux noir lissé



Décomposition fréquentielle du flux  
Filtrage (coupe à  $\sim 10^{-4}$  Hz)



## Détermination de $h_c$

Pour déterminer  $h_c$ , le calcul est basé sur le coefficient d'échange global du dispositif avec l'environnement déterminé par l'expression suivante :

$$h = h_c + h_r$$

avec un  $h_r$  égal à  $5.15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  en moyenne. Un peu plus pour le noir qui s'échauffe davantage au soleil.

Dans notre cas, l'expérimentation nous donne en moyenne pour le :

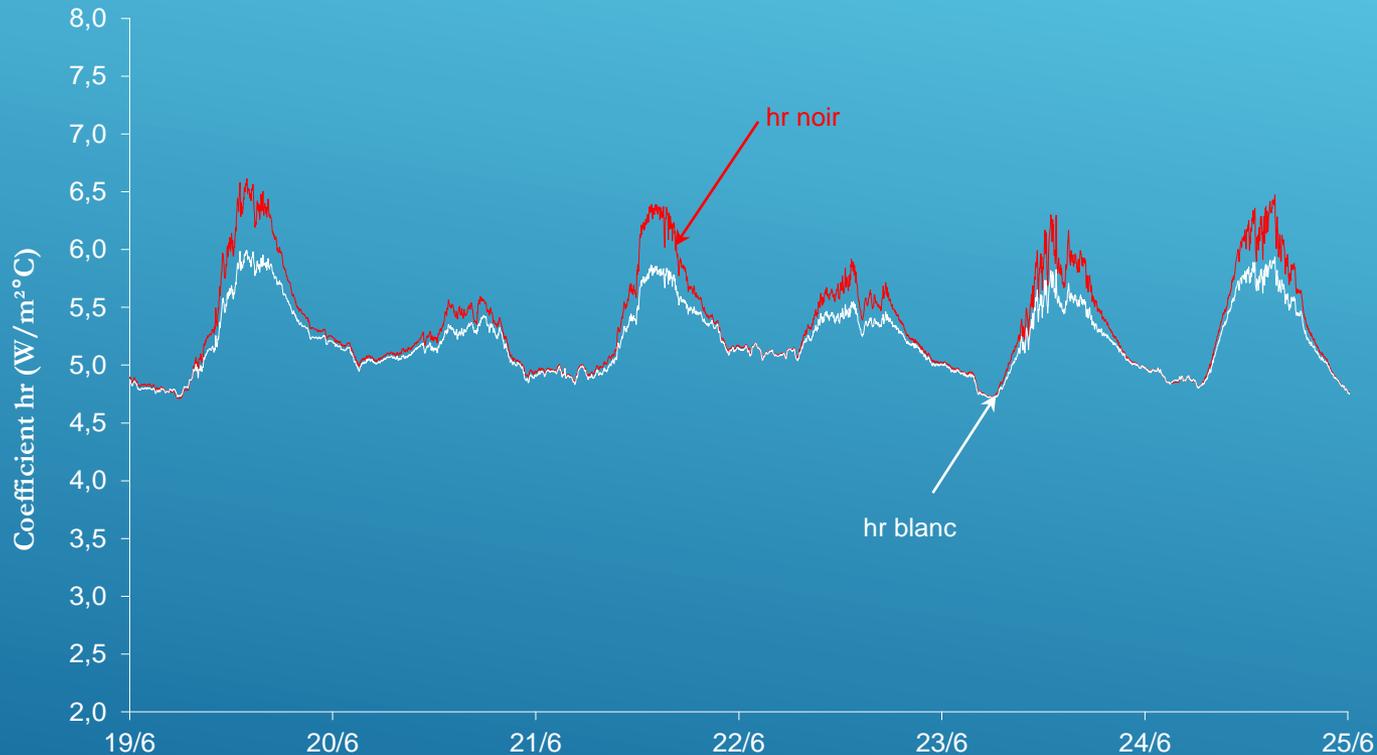
$$\text{Noir : } h_c = 15.07 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\text{Blanc : } h_c = 15.35 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Les règles de thermique en bâtiment indiquent une valeur moyenne de  $h_c$  de  $16 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  pour une vitesse d'air de  $4 \text{ m/s}$ .

→ **Nos résultats se rapprochent de cette valeur.**

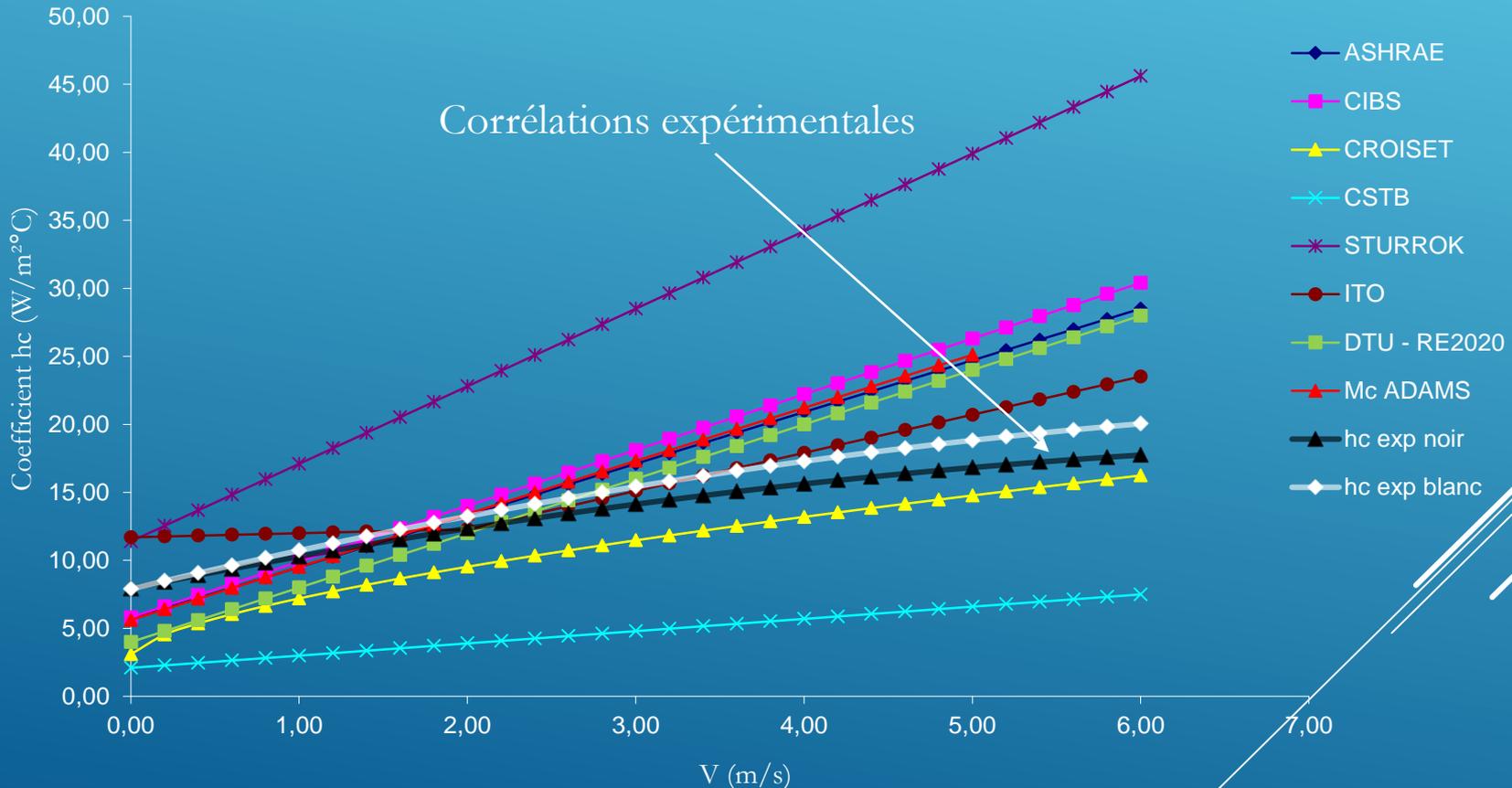
## Coefficients d'échange thermique par rayonnement (hr)



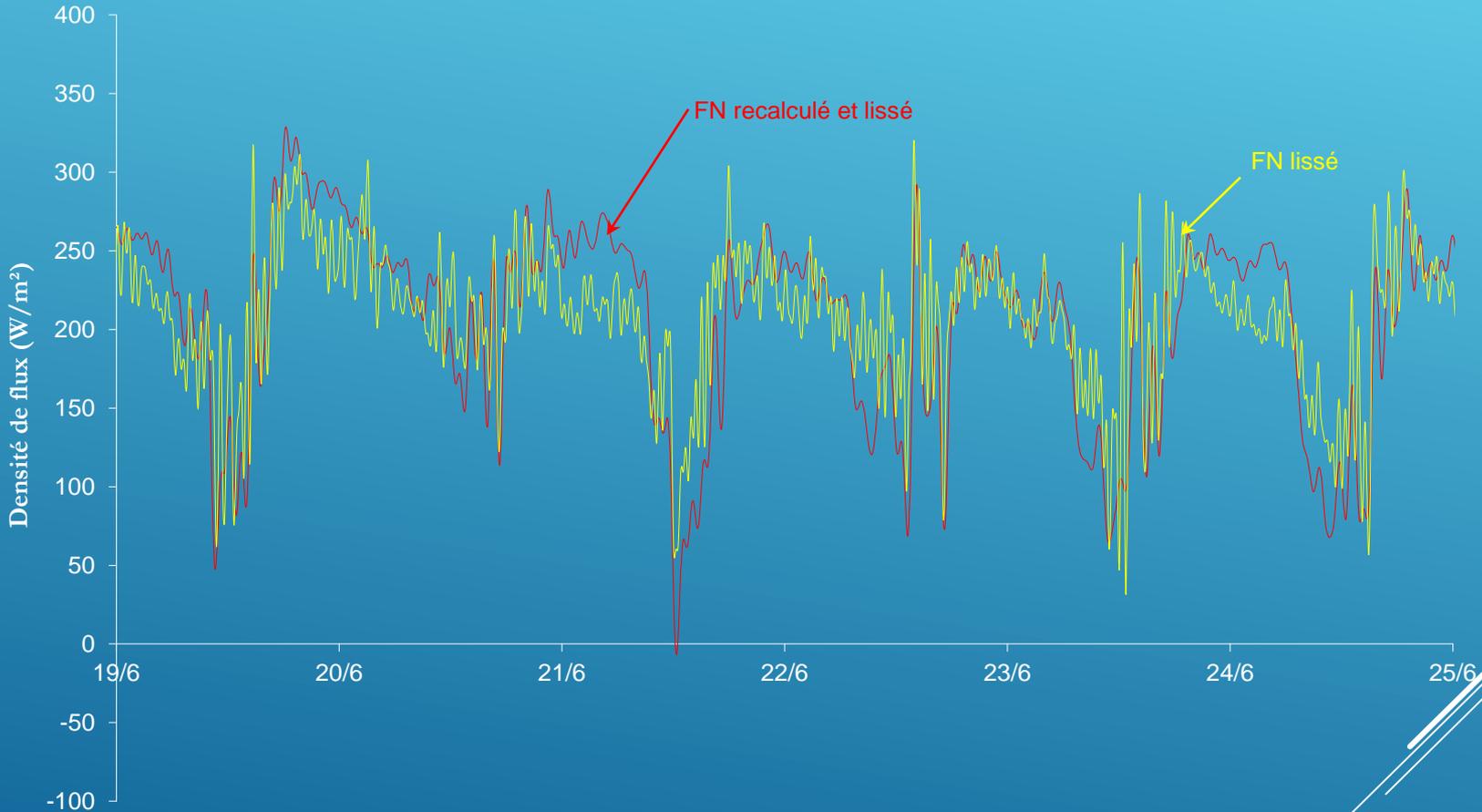
→ Valeurs des flux plus sensibles pour le fluxmètre noir

## Résultats expérimentaux et corrélations existantes

$$hc = \frac{\phi_{lissé} - hr (T_S - T_{env}) + \alpha_s G}{(T_S - T_{air})}$$



## Reconstitution du flux



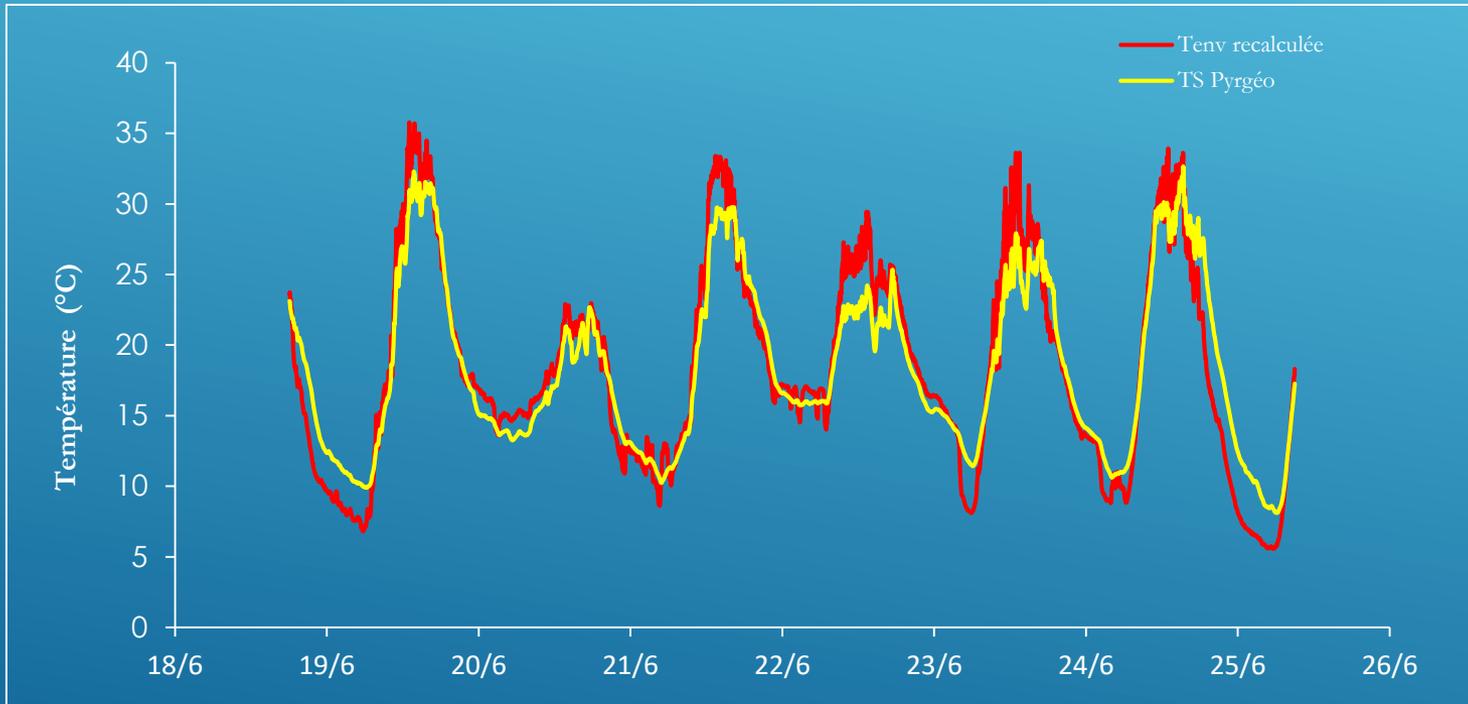
→ Comparaison entre le flux mesuré lissé et le flux recalculé à partir de la corrélation

## Reconstitution du flux

- ♦ Les corrélations des  $h_c$  expérimentaux se dispersent légèrement quand la vitesse du vent augmente. (Pb: propriété du capteur blanc?)
- ♦ Nous pouvons observer des écarts durant certaines périodes nocturnes, en effet les vitesses d'air relevées sont proches de zéro dans ce créneau. Nous nous trouvons donc dans la zone de plus grande incertitude au niveau de la détermination du coefficient d'échange.

## Calcul de la température d'environnement

$$T_{env} = \sqrt[4]{\frac{\sigma \cdot \epsilon \cdot T_{SN}^4 + hc \cdot (T_{SN} - T_{air}) - \alpha \cdot G - \varphi_N}{\sigma \cdot \epsilon}} - 273,15$$



→ Bonne corrélation entre les valeurs issues du pyrgéomètre et le calcul de la température d'environnement (formule ci-dessus)

## Conclusions :

- Le dispositif semble adapté au problème posé, possibilité d'une caractérisation locale de l'environnement d'une paroi.
- La sélectivité des capteurs vis-à-vis des rayonnements thermiques est un procédé intéressant (*déjà utilisé par ailleurs dans le cadre de la gestion d'ambiances de confort*)

## Perspectives :

- Suite à ces travaux un capteur à bandes alternées noires et blanches a été réalisé.
- Mesures souhaitables plus fines et des trois composantes de la vitesse pour l'évaluation du  $h$  convectif
- Etudes envisagées en ambiances urbaines à l'aide de capteurs noir et blanc en s'inspirant du principe du radiomètre à deux sphères pour séparer rayonnements CLO et GLO

Merci pour votre attention

# Résolution fine des transferts thermiques couplés par Monte-Carlo en géométrie urbaine incluant les flux solaires directs et diffus

Cyril Caliot<sup>1</sup>, Louis d'Alençon<sup>2</sup>, Stéphane Blanco<sup>3</sup>, Vincent Forest<sup>4</sup>, Richard Fournier<sup>3</sup>, Frédéric Hourdin<sup>2</sup>, Florent Retailleau<sup>1</sup>, Robert Schoetter<sup>5</sup>, Najda Villefranque<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CNRS, UPPA, E2S, LMAP, 1 Allée du Parc Montaury, 64600, Anglet, France.

<sup>2</sup>LMD/IPSL/SU, CNRS, Paris, France.

<sup>3</sup>Laplace, INP/Université de Toulouse/CNRS, Toulouse, France.

<sup>4</sup>Méso-Star, Longages, France.

<sup>5</sup>CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France.





# Content

- 1 Introduction
- 2 Probabilistic model
- 3 Numerical validation
- 4 Application to a heat wave scenario
- 5 Conclusion and future work

# Introduction

- Objective: To build a **reference thermal model** that can handle large and complex **urban geometry**
- Scientific questions:
  - ▶ including city geometry in **weather and climate services** (ANR MC2),
  - ▶ **influence of geometry**: detailed vs. simplified (e.g., 3D vs. 1D; homogenization; etc.),
  - ▶ numerical **validation** of the models or meshes in use,
  - ▶ better **understanding** of coupled mechanisms through sensitivity studies.
- Steps: To use **probabilistic** models with random walks for
  - ▶ thermal **conduction** (random walk-on-sphere, WOS),
  - ▶ **solar** and **infrared radiation** (multiple reflection ray-tracing).
  - ▶ Convection is accounted for with known  $h_F$  and  $T_F$ .

# Introduction

- Temperature-derived **observables**:
  - ▶ **probe** computation (0, 1, 2, 3D), (e.g., thermocouples)
  - ▶ radiance temperature **rendering** (e.g., thermography),
  - ▶ parametric **sensitivities** (linear or non-linear, Symbolic MC).
- **Geometry**: triangulated surface from each volume, with their connections (conformal mesh)
- **Free software**: addition of solar irradiations in **stardis** (MésO-Star) funded by ANR MC2 project.

More details in the article *Caliot et al., 2024, International Journal of Heat and Mass Transfer*

# Probabilistic model: conduction in solids (opaque)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial}{\partial t} T_s(\vec{x}, t) = \alpha \Delta T_s(\vec{x}, t), & \vec{x} \in \mathcal{D}_S, t > \tau_I, \quad (1a) \\ T_s(\vec{x}, t) = T_I, & \vec{x} \in \mathcal{D}_S \cup \partial \mathcal{D}_S, t \leq \tau_I, \quad (1b) \\ T_s(\vec{y}, t) = T_D(\vec{y}, t), & \vec{y} \in \partial \mathcal{D}_{S,D}, t > \tau_I, \quad (1c) \\ k_{s,1} \nabla T_s(\vec{y}, t) \cdot \vec{n}_1 = k_{s,2} \nabla T_s(\vec{y}, t) \cdot \vec{n}_2, & \vec{y} \in \partial \mathcal{D}_{S,S}, t > \tau_I, \quad (1d) \\ k_s \nabla T_s(\vec{y}, t) \cdot \vec{n} = \dot{q}_F(\vec{y}, t) + \dot{q}_R(\vec{y}, t) + \dot{q}_o(\vec{y}, t), & \vec{y} \in \partial \mathcal{D}_{S,F}, t > \tau_I, \quad (1e) \end{array} \right.$$

$$\dot{q}_F(\vec{y}, t) = h_F(\vec{y}, t) [T_F(\vec{y}, t) - T_s(\vec{y}, t)], \quad (2)$$

$$\dot{q}_R(\vec{y}, t) = h_R(\vec{y}) [\theta_R(\vec{y}, t) - T_s(\vec{y}, t)], \quad (3)$$

$$\dot{q}_o(\vec{y}, t) = \int_0^{+\infty} d\lambda \int_{2\pi} d\Omega(\vec{\omega}) |\vec{\omega} \cdot \vec{n}| \varepsilon(\vec{y}, \lambda) I_o(\vec{y}, t, -\vec{\omega}, \lambda). \quad (4)$$

$$T_s(\vec{y}, t) = P_C T_s(\vec{y} - \delta_b \vec{n}, t) + P_F T_F(\vec{y}, t) + P_R \theta_R(\vec{y}, t) + \frac{\dot{q}_o(\vec{y}, t)}{h_T}, \quad (5)$$

$$P_C(\vec{y}_i, t) = \frac{k_s(\vec{y}_i, t)}{\delta_b h_T(\vec{y}_i, t)}, \quad P_F(\vec{y}_i, t) = \frac{h_F(\vec{y}_i, t)}{h_T(\vec{y}_i, t)}, \quad P_R(\vec{y}_i, t) = \frac{h_R(\vec{y}_i, t)}{h_T(\vec{y}_i, t)},$$

$$h_T(\vec{y}, t) = \frac{k_s(\vec{y}, t)}{\delta_b} + h_F(\vec{y}, t) + h_R(\vec{y}, t).$$

# Probabilistic model: coupling sub-paths at interfaces

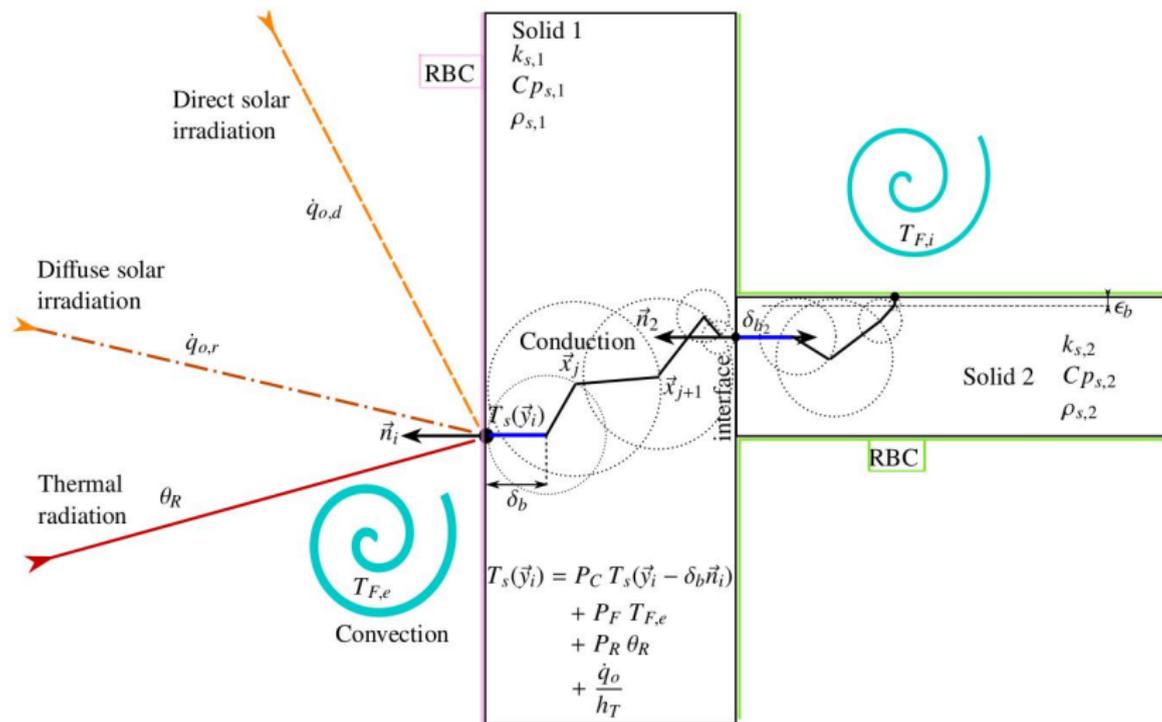
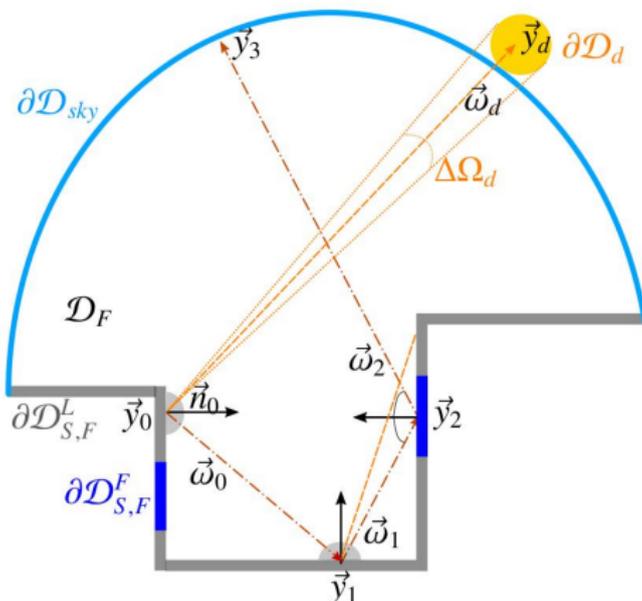


Figure: Representation of random paths starting at an outdoor wall with RBC to compute  $T_s(\vec{y}_i)$

# Probabilistic model: radiation (diffuse or specular surfaces)

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\omega}_i \cdot \nabla I(\vec{x}, \vec{\omega}_i, \lambda) = 0, \quad \vec{x} \in \mathcal{D}_F, \quad (6a) \\ I(\vec{y}_i, -\vec{\omega}_i, \lambda) = \varepsilon(\vec{y}_{i+1}, -\vec{\omega}_i, \lambda) I_b(\vec{y}_{i+1}, \lambda) + \\ \int_{2\pi} d\Omega(\vec{\omega}_{i+1}) \rho''(\vec{y}_{i+1}, -\vec{\omega}_i | -\vec{\omega}_{i+1}, \lambda) \times \\ |\vec{\omega}_{i+1} \cdot \vec{n}_{i+1}| I(\vec{y}_{i+1}, -\vec{\omega}_{i+1}, \lambda), \quad \vec{y} \in \partial\mathcal{D}_{S,F}. \quad (6b) \end{array} \right.$$



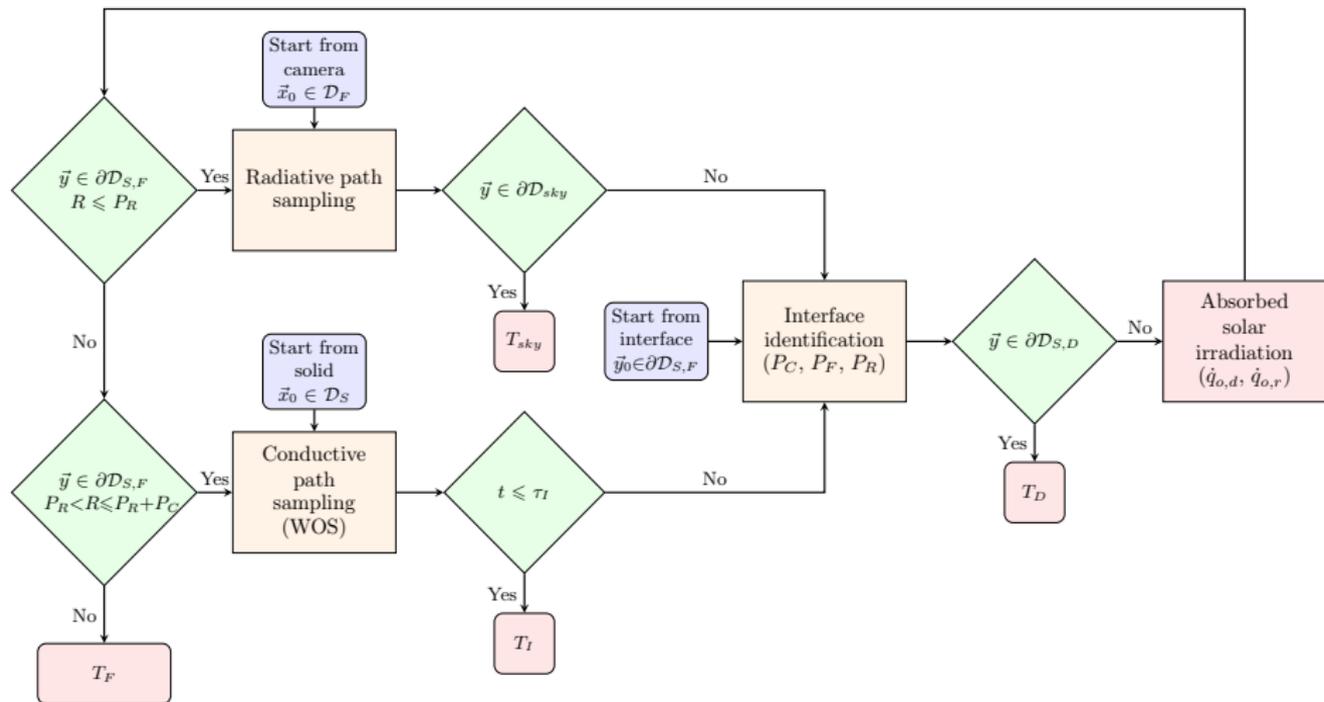
# Probabilistic model: Monte Carlo

$$T_s(\vec{y}_0, t_0) \approx \tilde{T}_s(\vec{y}_0, t_0) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N W_k,$$
$$\tilde{\sigma}_{\tilde{T}_s} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N W_k^2 - \tilde{T}_s^2(\vec{y}_0, t_0)}.$$

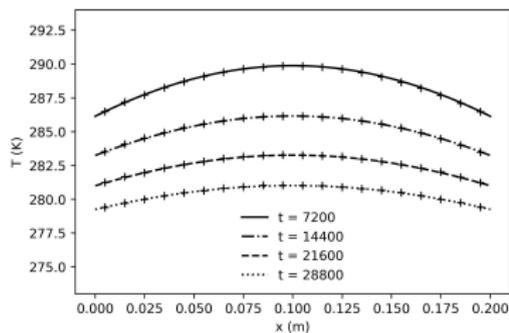
$$W_k(\vec{y}_0, t_0) = H(t_n \leq \tau_I) T_I + H(t_n > \tau_I) \left\{ H(\vec{y}_n \in \partial\mathcal{D}_{S,D}) T_D(\vec{y}_n, t_n) + \right. \\ \left. H(\vec{y}_n \in \partial\mathcal{D}_{S,F}) T_F(\vec{y}_n, t_n) + H(\vec{y}_n \in \partial\mathcal{D}_{sky}) T_{sky}(\vec{y}_n, \vec{\omega}_n, t_n) \right\} + W_{o,k}, \quad (7)$$

$$W_{o,k} = \frac{1}{h_T} \sum_{j=1}^{n_o} \left\{ W_{o,d}(\vec{y}_j) + \left( \sum_{m=1}^{n_{r,j}} H(\vec{y}_m \in \partial\mathcal{D}_{S,F}^L) W_{o,r,d}^L(\vec{y}_m) \right) + \right. \\ \left. W_{o,sky}(\vec{y}_{n_{r,j}+1}) + W_{o,r,d}^F(\vec{y}_{n_{r,j}+1}) \right\}. \quad (8)$$

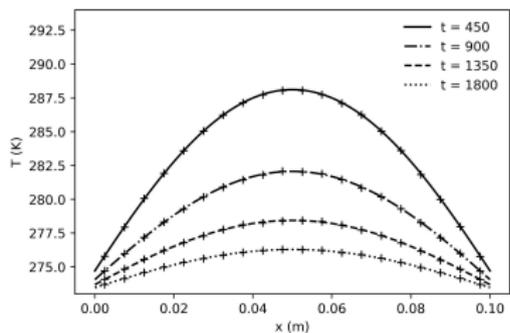
# Probabilistic model: flowchart



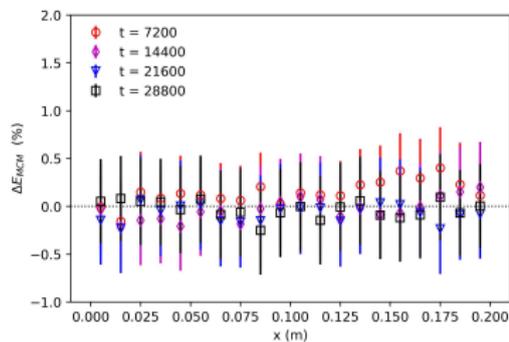
# Numerical validation: 1D slab ( $T_I = 293$ K, $T_F = 273$ K)



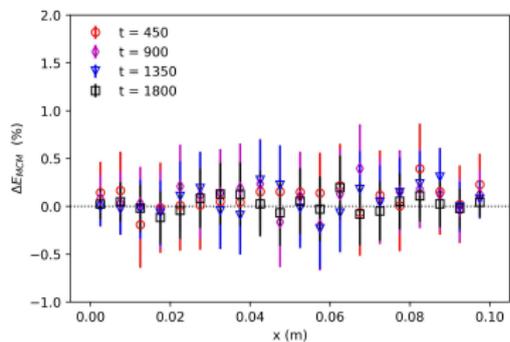
(a) Temperature profiles in concrete slab (Case 1)



(b) Temperature profiles in EPS slab (Case 1)

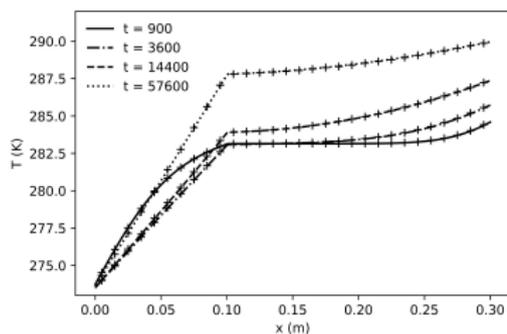


(c) Scaled differences with MCM

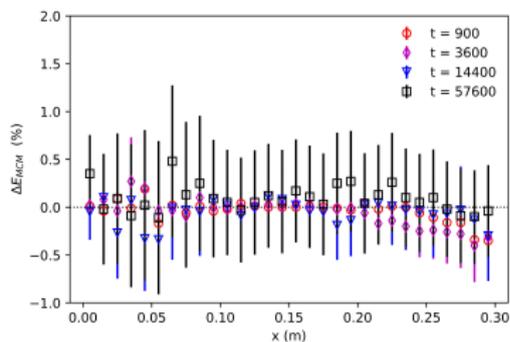


(d) Scaled differences with MCM

# 1D 2-layer slab ( $T_I = 283$ K, $T_{F,i} = 273$ K, $T_{F,e} = 293$ K)

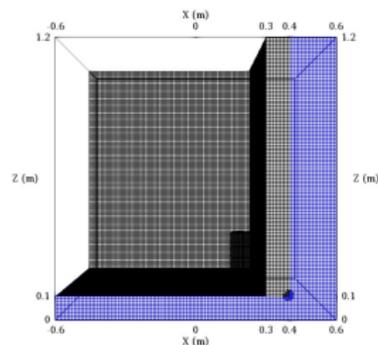


(a) Temperature profiles for Case 2

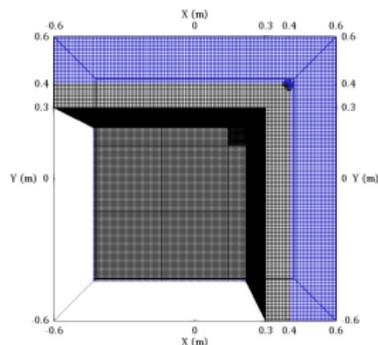


(b) Scaled differences with MCM confidence intervals for Case 2

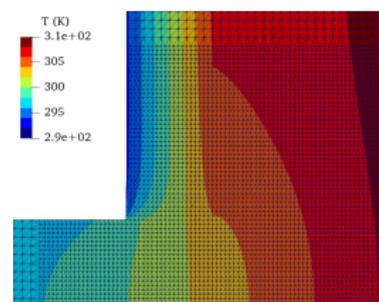
# Numerical validation: 3D thermal bridge ( $T_I = 293$ K, $T_{F,i} = 293$ K, $T_{F,e} = 313$ K)



(a) View in  $+Y$  axis direction



(b) View in  $-Z$  axis direction

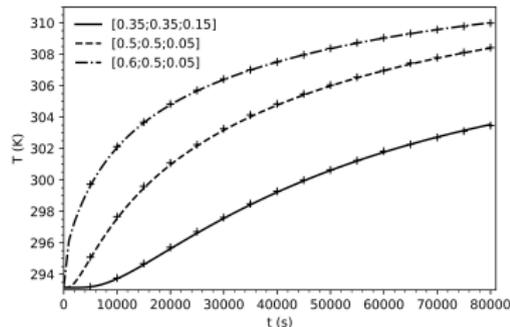


(c) Temperature field computed with OpenFoam ( $-X$  axis view)

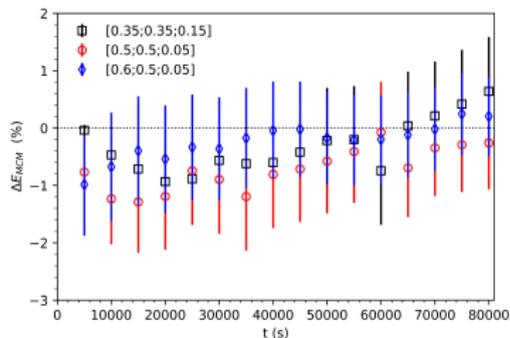
A comparison of  $T_s$  time evolution is drawn for three points:

- $[0.35; 0.35; 0.15]$  inside EPS,
- $[0.5; 0.5; 0.05]$  inside concrete, and
- $[0.6; 0.5; 0.05]$  outside concrete wall.

# Numerical validation: 3D thermal bridge ( $T_I = 293$ K, $T_{F,i} = 293$ K, $T_{F,e} = 313$ K)



(a) Transient temperatures for three locations in Case 3

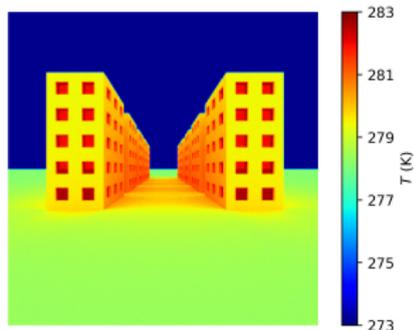


(b) Scaled differences with MCM confidence intervals for three locations in Case 3

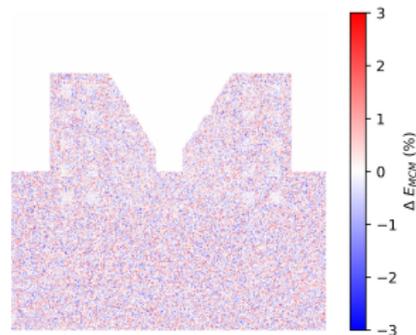
# Numerical validation: radiation in urban geometry ( $T_s = 283$ K, $T_{sky} = 273$ K)



(a) HTRDR-Urban rendering (Case 4)



(b) Reference radiance temperature computed with HTRDR-Urban (Case 4)

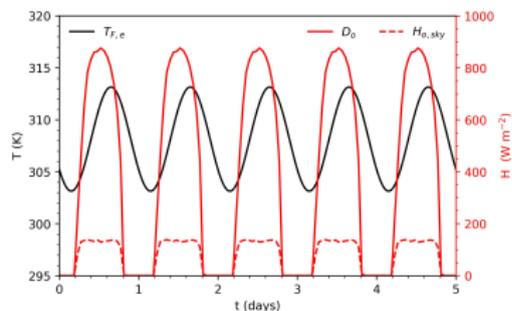


(c) Scaled differences between our code and HTRDR-Urban (Case 4)

# Application to a heat wave scenario: conditions



(a) Building lines with trees and centred body surface ( $S_b$ )

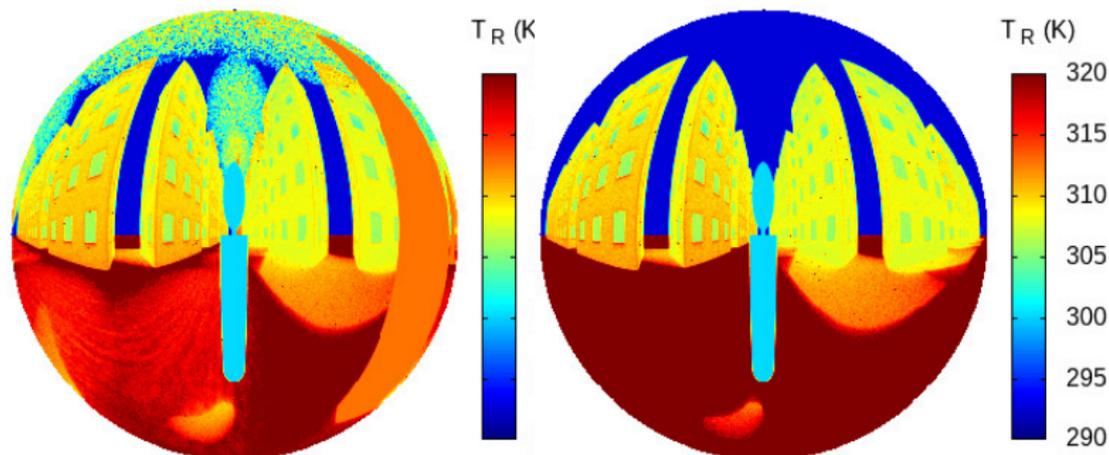


(b) Temporal evolution of air temperature and solar irradiances

$$T_{F,e}(t) = 308.15 + 5 \sin(2\pi [t - 0.4]), \quad (9)$$

	$T_I$	$T_{F,i}$	$T_g$	$T_b$	$T_{F,e}$	$T_{sky}$	
heat	305.211	298.15	283.15	300.15	Eq. 9	$T_{F,e} - 20$	
wave scenario	$S_i$ ( $m^2$ )	$S_b$ ( $m^2$ )	$h_F$ ( $W m^{-2} K^{-1}$ )	$\theta_d$ (rd)	$N$ (-)	$\delta_b$ (mm)	$\epsilon_b$ (mm)
	33168	1.77	10	$4.65 \times 10^{-3}$	$10^5$	2	0.5

# Application to a heat wave scenario: observables



(a) Thermal environment accounting for trees

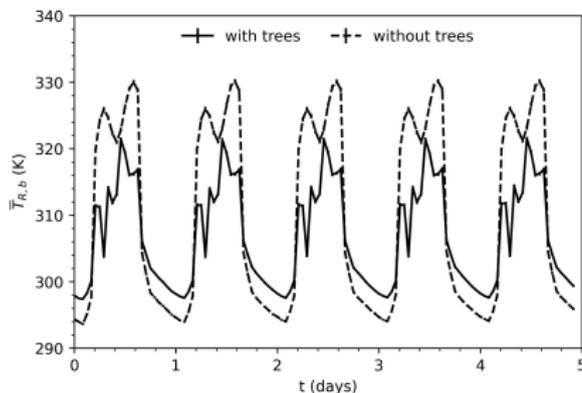
(b) Thermal environment without trees

$$\bar{T}_{R,b}(t) = \left[ \frac{1}{\sigma_{SB} S_b} \int_{S_b} dA(\vec{y}_0) H_b(\vec{y}_0, t) \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (10)$$

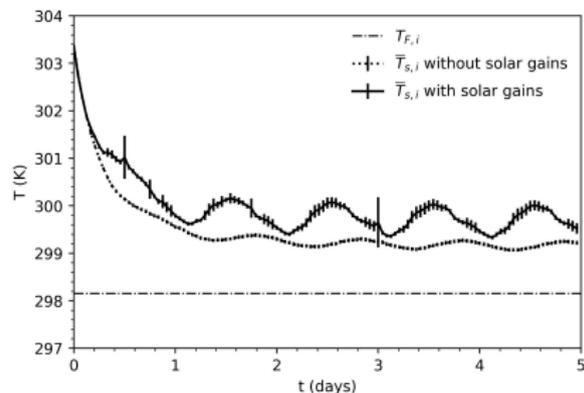
$$H_b(\vec{y}_0, t) = \int_0^{+\infty} d\lambda \int_{2\pi} d\Omega(\vec{\omega}_0) |\vec{\omega}_0 \cdot \vec{n}_0| I(\vec{y}_0, t, -\vec{\omega}_0, \lambda).$$

$$\bar{T}_{s,i}(t) = \frac{1}{S_i} \int_{S_i} dA(\vec{y}_0) T_s(\vec{y}_0, t), \quad (11)$$

# Application to a heat wave scenario: $\bar{T}_{R,b}(t)$ , $\bar{T}_{s,i}(t)$



(a) Temporal MRT on the body surface during the heat wave scenario

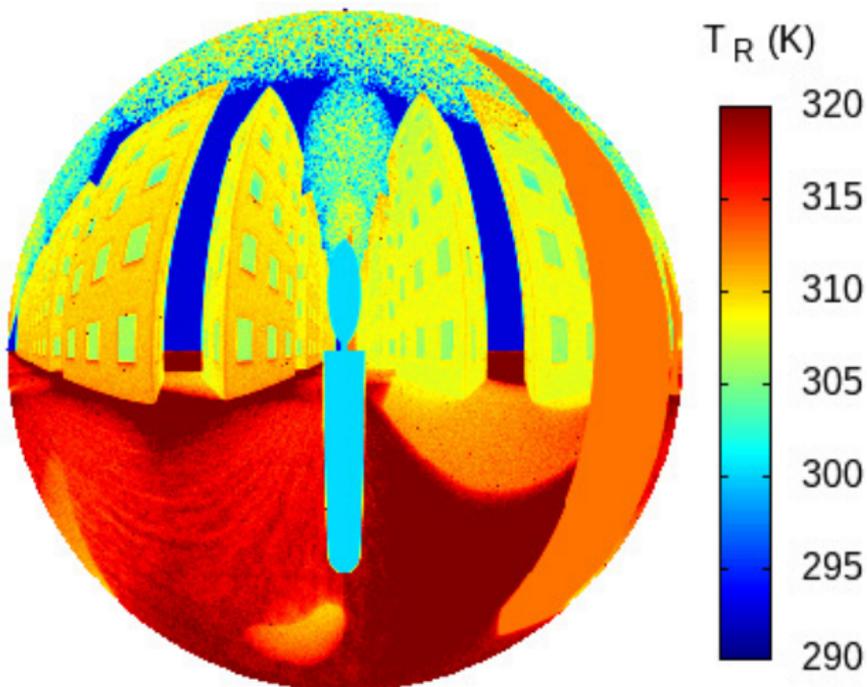


(b) Temporal average internal wall temperature during the heat wave scenario

# Conclusion and future work

- Conclusion:
  - ▶ **Validation** of a probabilistic heat transfer model in urban geometry with solar irradiation
  - ▶ The approach manage complex **urban geometry** with trees
  - ▶ Specular surfaces introduce **variance** in MC estimates (increase  $N$ )
- Future work:
  - ▶ **Enrich** the model (Eq. for  $T_F$ , non-linear physics → ANR MCMET)
  - ▶ **Compare** with other approaches (codes) for validation and tests of assumptions (new contacts)
  - ▶ **Weather** services: two-way coupling with **CFD** (→ ANR MC2)
  - ▶ **Climate** services: one-way coupling with **climate data** (→ ANR MC2)
  - ▶ Apply to **inverse problems** in urban geometry (thermography, thermocouples, etc.)

Merci pour votre attention



# Appendix

	$T_I$ (K)	$T_{F,i}$ (K)	$T_{F,e}$ (K)	$h_F$ (W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )	$\Delta x$ (mm)	$\Delta t$ (s)	$N$ (-)	$\delta_b$ (mm)	$\epsilon_b$ (mm)
Case 1	293.15	273.15	273.15	10	1	0.72	10 <sup>5</sup>	$\Delta x$	$\delta_b/4$
Case 2	283.15	273.15	293.15	10	1	0.72	10 <sup>5</sup>	$\Delta x$	$\delta_b/4$
Case 3	293.15	293.15	313.15	10	10	2	10 <sup>5</sup>	$\Delta x/7$	$\delta_b/4$

	$T$ (K)	$P_\rho$	$(n, k)$
Case 4	ground	283.15	0.5
	walls	283.15	0.5
	windows	283.15	—
	sky	273.15	0

# Appendix

Material	$\lambda_s$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\rho_s$ (kg m <sup>-3</sup> )	$C_{p,s}$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$d$ (m)	$P_{\rho_o}$ or $(n, k)$	$P_{\rho_R}$ or $(n, k)$
concrete	1.8	2400	1000	0.4	0.8	0.2
EPS	0.035	20	1300	—	—	—
ground	1	1300	1900	10	0.5	0.2
glass	1	2500	900	0.005	(1.52, 0)	(1.7, 0.636)
body	—	—	—	—	0	0
tree	—	—	—	—	0.2	0