

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

Jean-Pierre MONCHAU
monchau@themacs.fr

Thermique Environnement Matériaux Contrôle de Structures



Laurent IBOS
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)

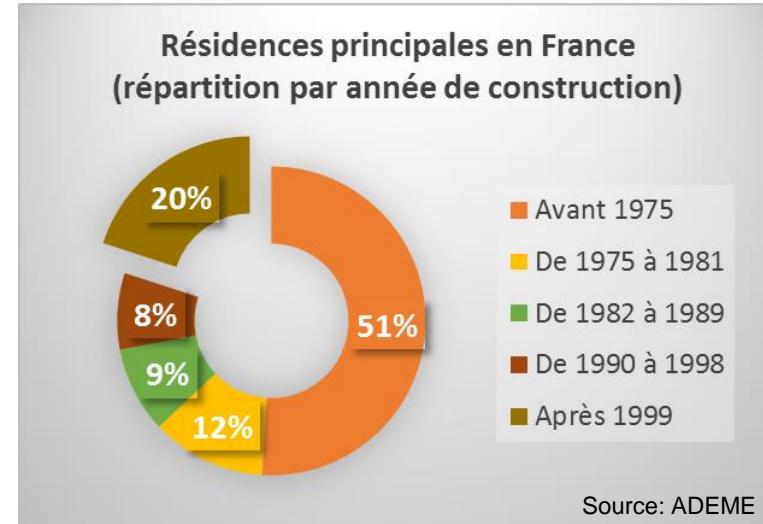
- Contrôle à réception des travaux
- Auto-contrôle sur chantier

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?



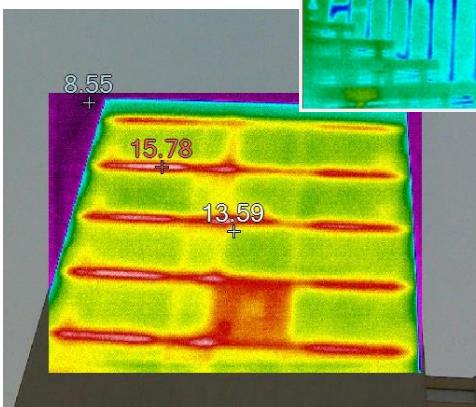
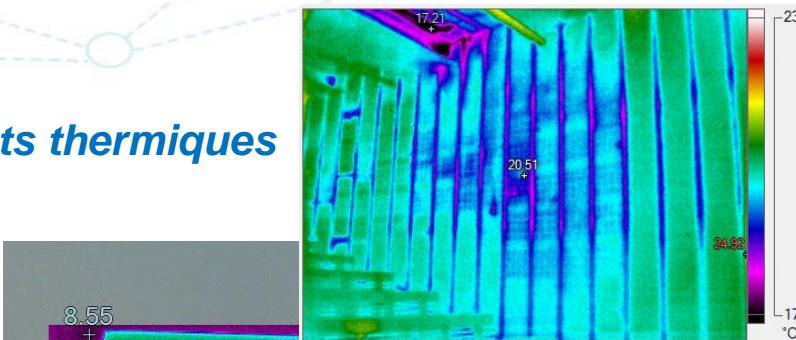
Correction de champs de température de surface



Evaluation des biais/incertitudes, limites d'utilisation

Défauts de calfeutrement

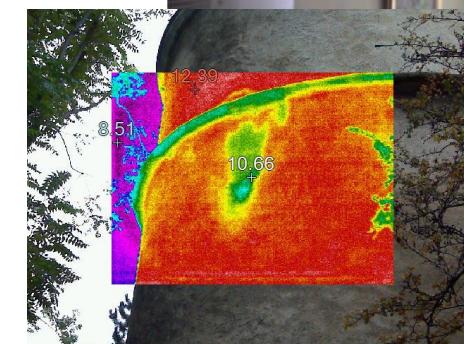
Ponts thermiques



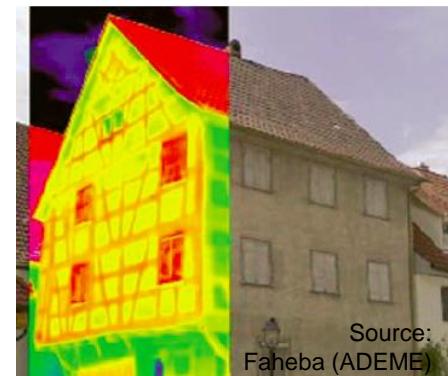
Infiltrations



Zones humides



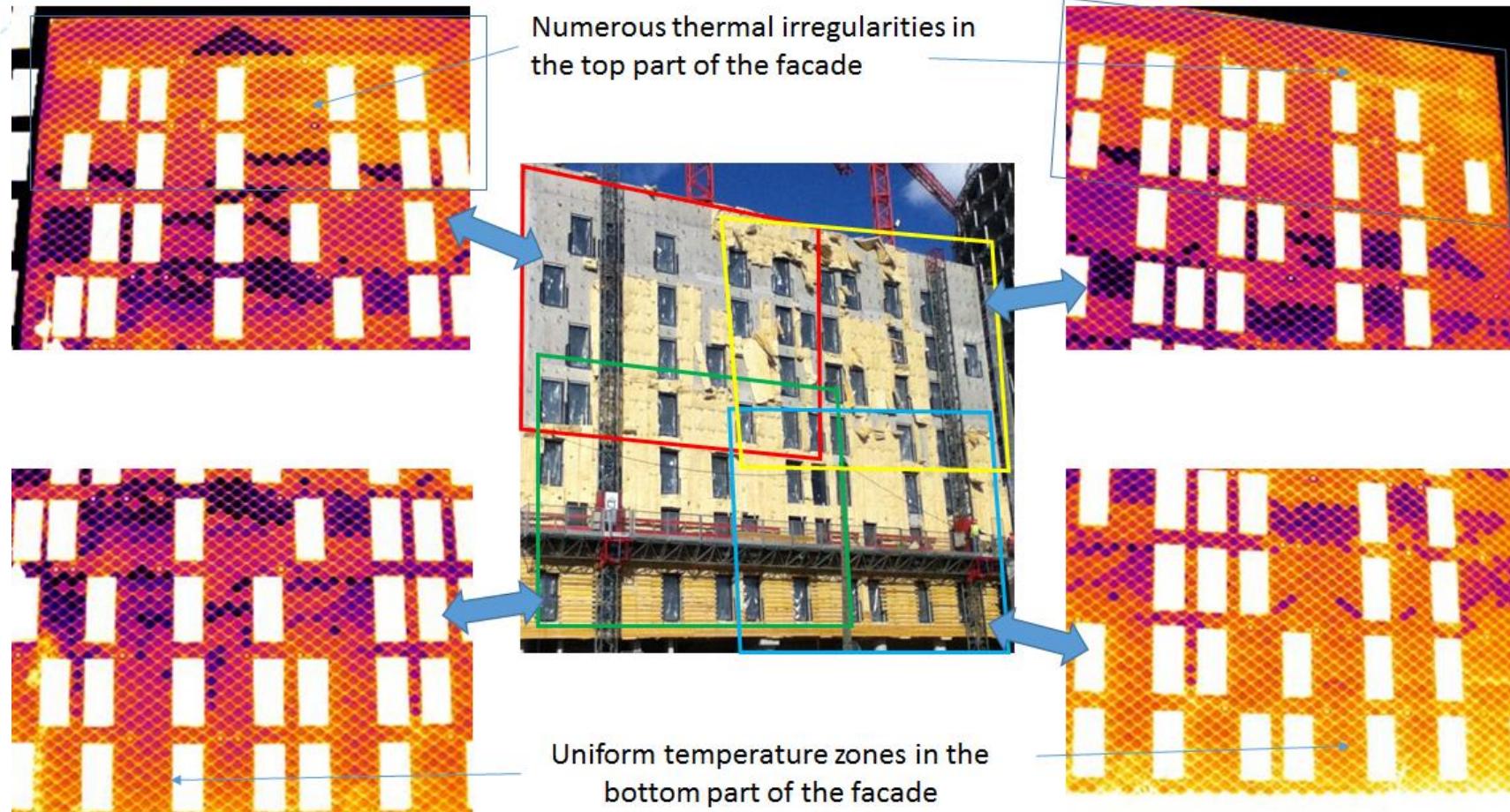
Patrimoine



Source:
Faheba (ADEME)

Besoins en diagnostic / Illustration

Observation de l'effet de « mauvaises pratiques de chantier »
Bâtiment récent (2015) Paris XIII^e



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

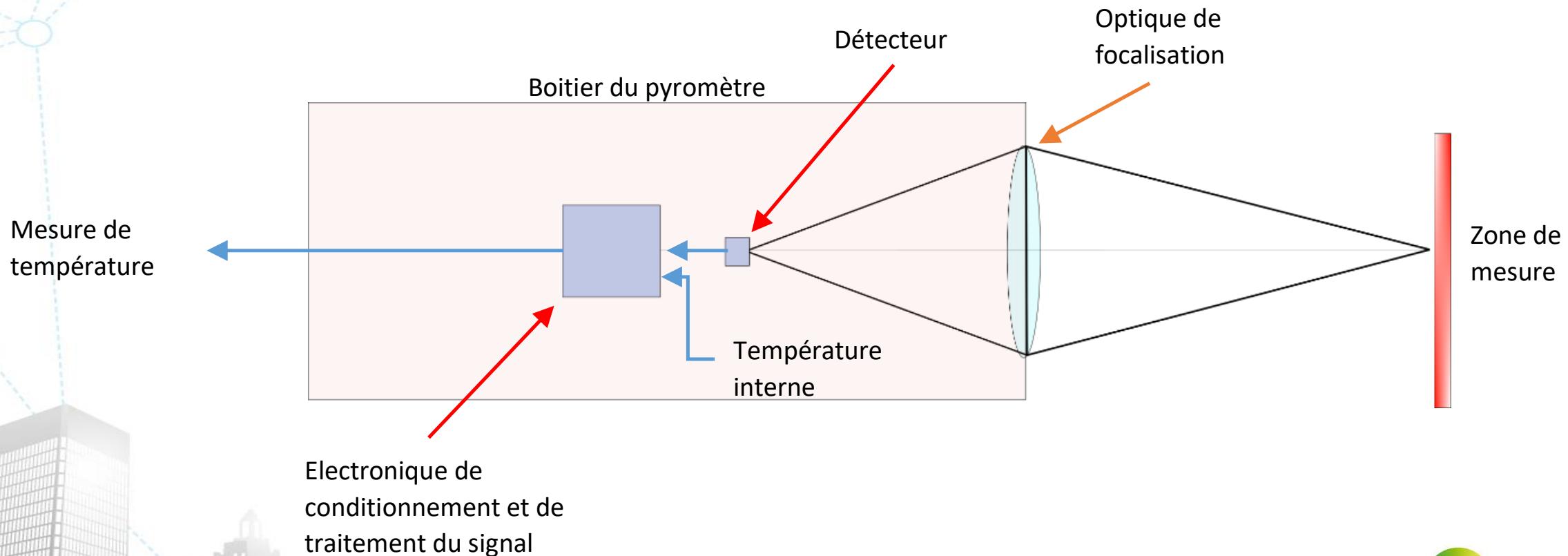
Prise en compte de l'émissivité des surfaces

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

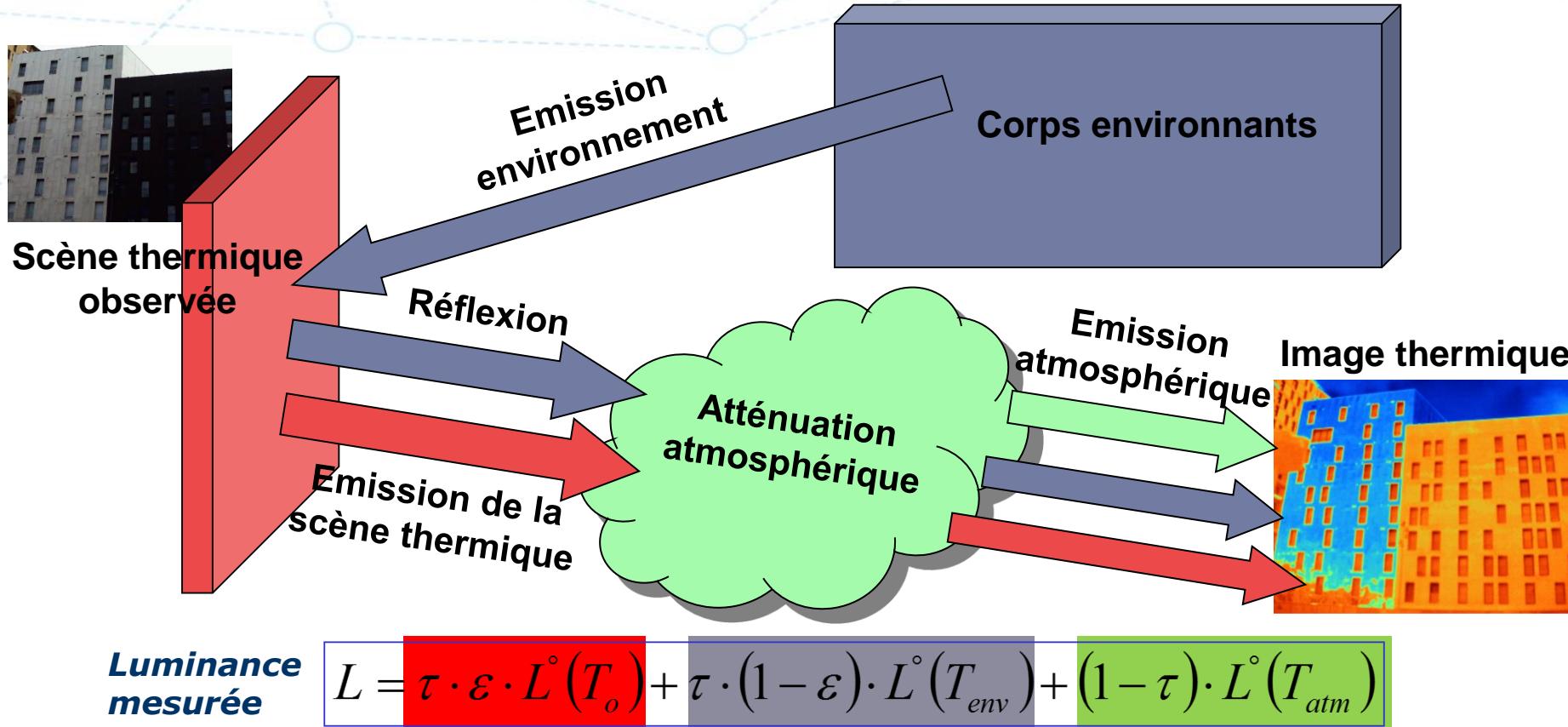
Principe de mesure

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



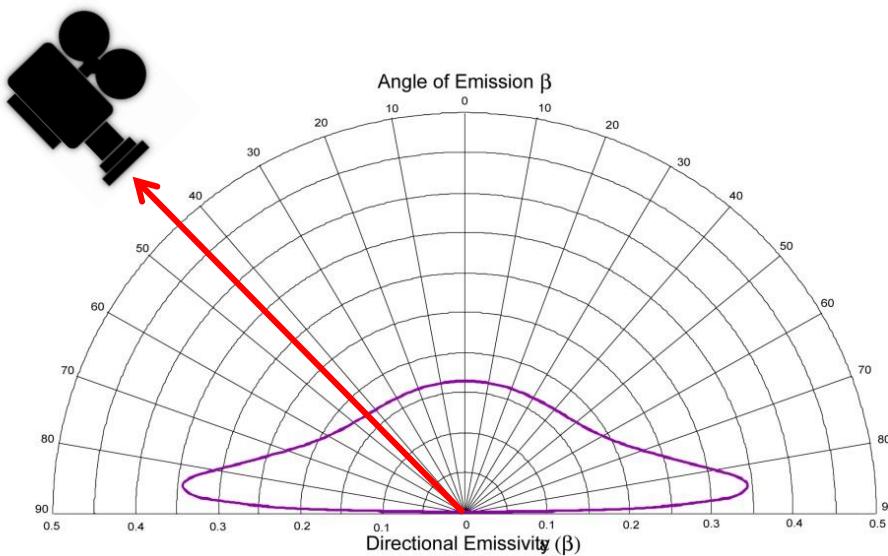
Pré-requis pour la détermination de la température de surface

- Mesure de la température d'air T_{atm} et connaissance du facteur de transmission atmosphérique τ
(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)

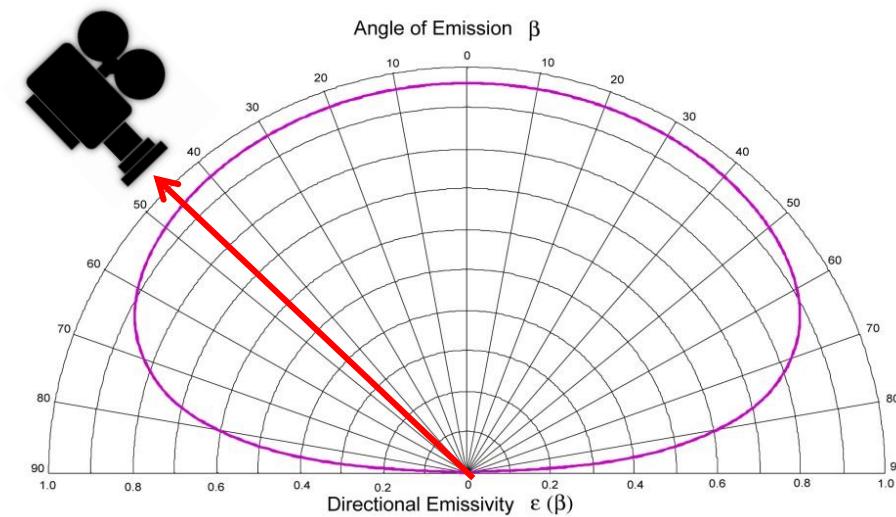
Paramètres d'influence: hypothèses

Differentes 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: $n = 5.7 + 9.7i$

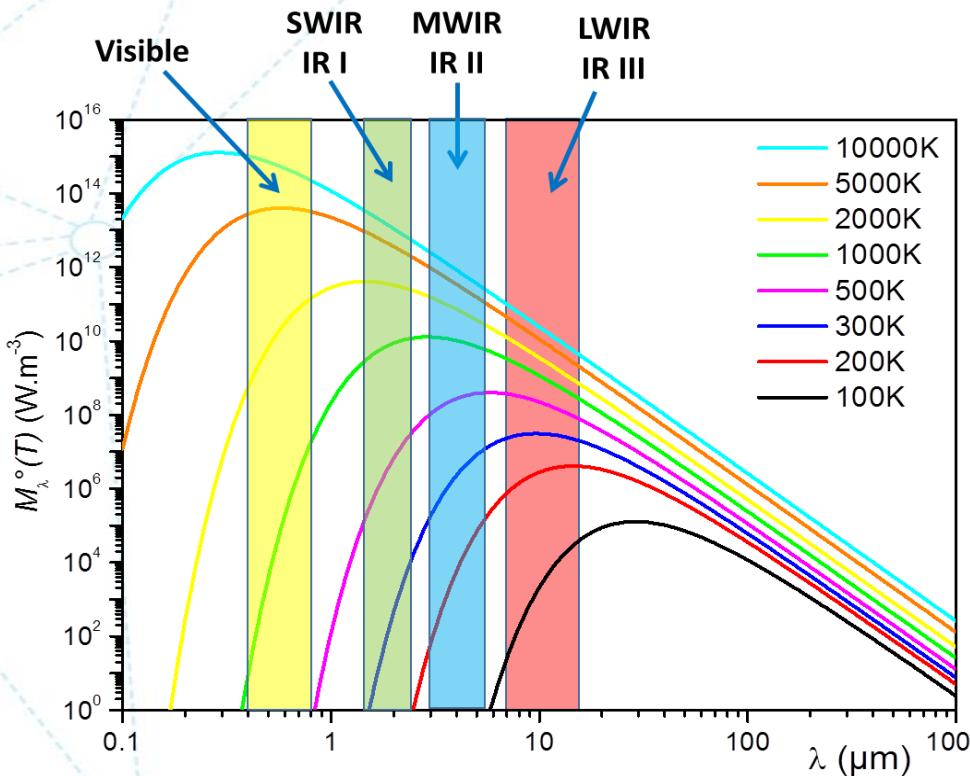


Diélectrique d'indice de réfraction: $n = 1.5$

D'après : L. Kauder, Spacecraft Thermal Control Coatings References, NASA-TP-2005-212792, NASA-Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, (2005)

Paramètres d'influence: hypothèses

Contribution atmosphérique:

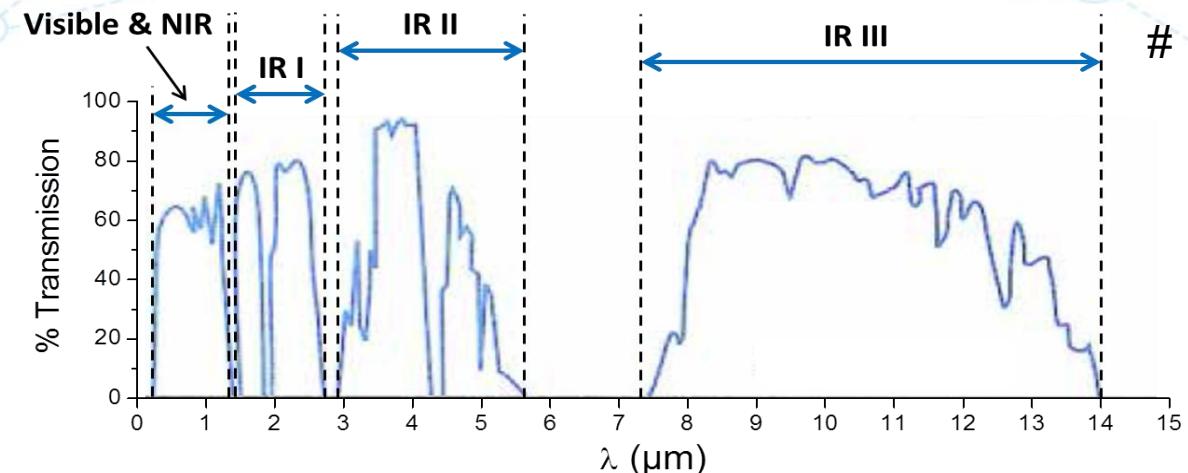


Emission d'un corps noir (*Loi de Planck*) et bandes spectrales:

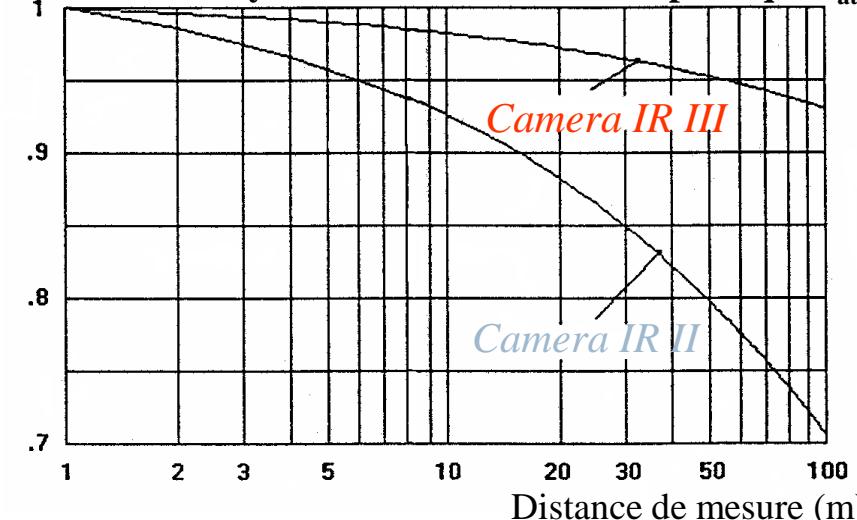
$$M_\lambda^0(T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\frac{c_2}{e^{\lambda T}} - 1}$$

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



Facteur moyen de transmission atmosphérique τ_{atm}



Evaluation des erreurs sur la température de surface

Evaluation pour un cas courant:

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

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

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

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

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

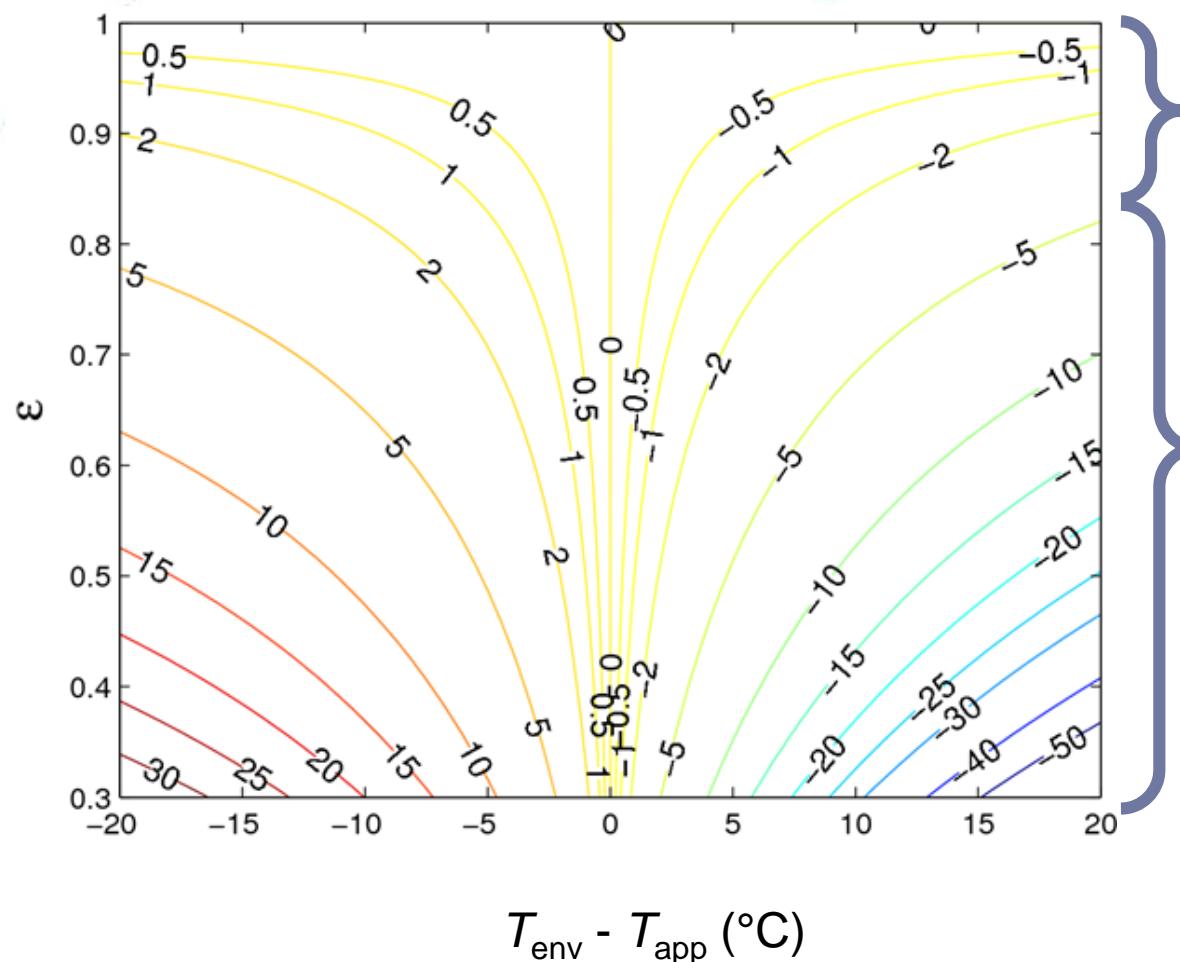
$$T=300K$$

$$\varepsilon=0.91$$

$$T=300K$$

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 μm	5.6 K

Evaluation des erreurs sur la température de surface



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.

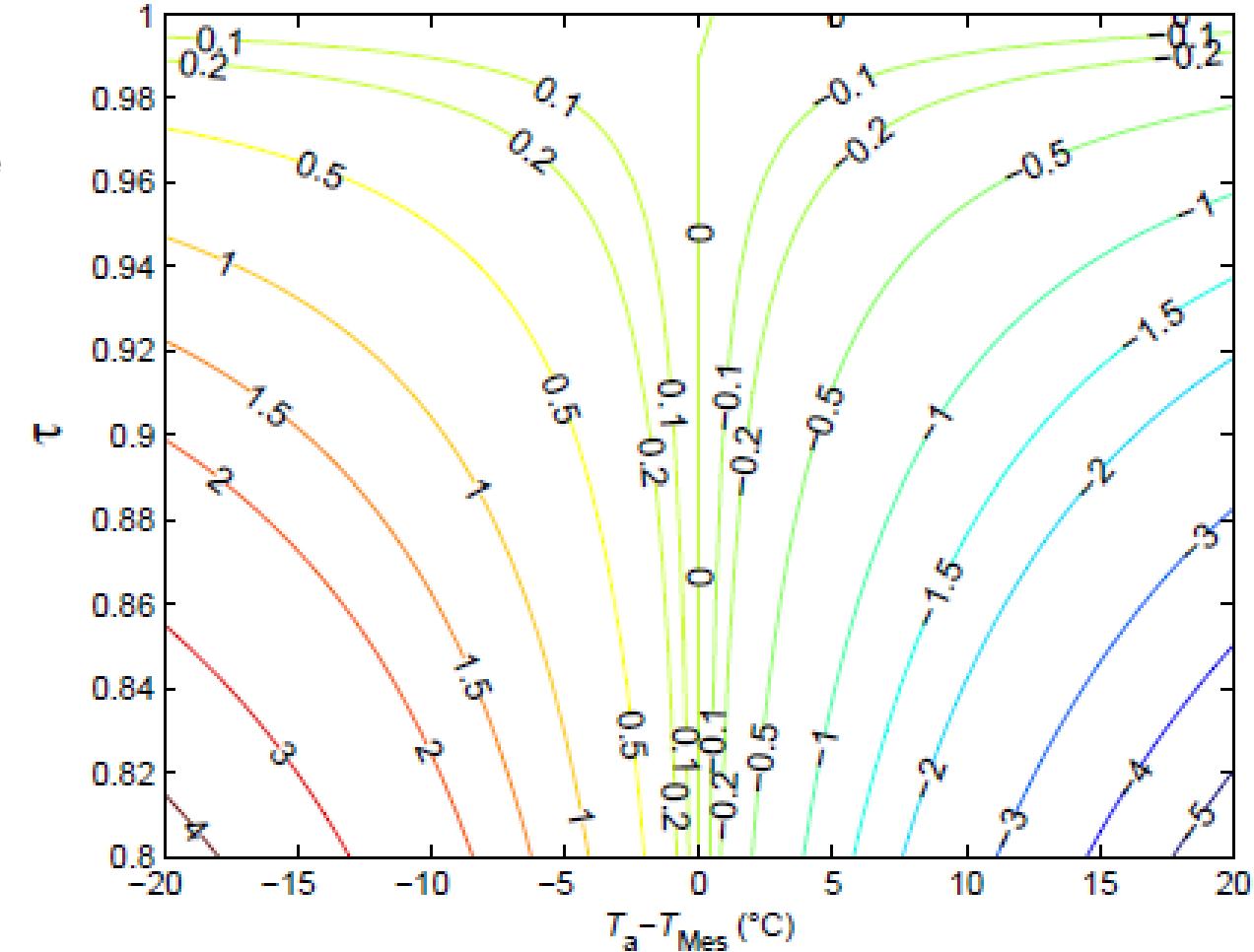
Evaluation des erreurs sur la température de surface

Influence de l'atmosphère:

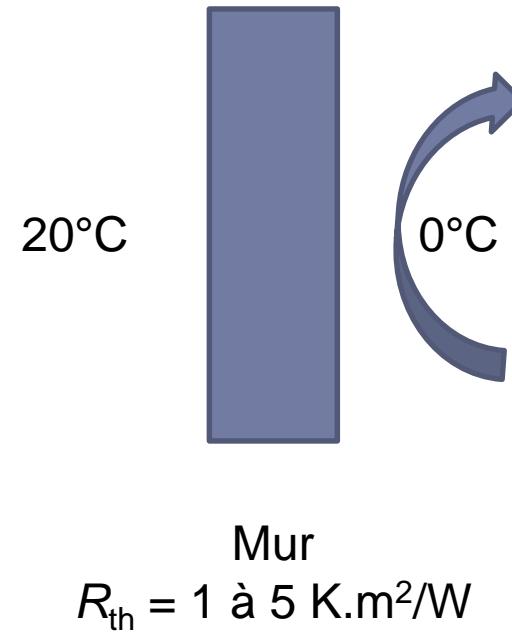
- Facteur de transmission atmosphérique
- Température d'air

*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: $h_c = 4 \cdot (1 + v + \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^3)$
(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

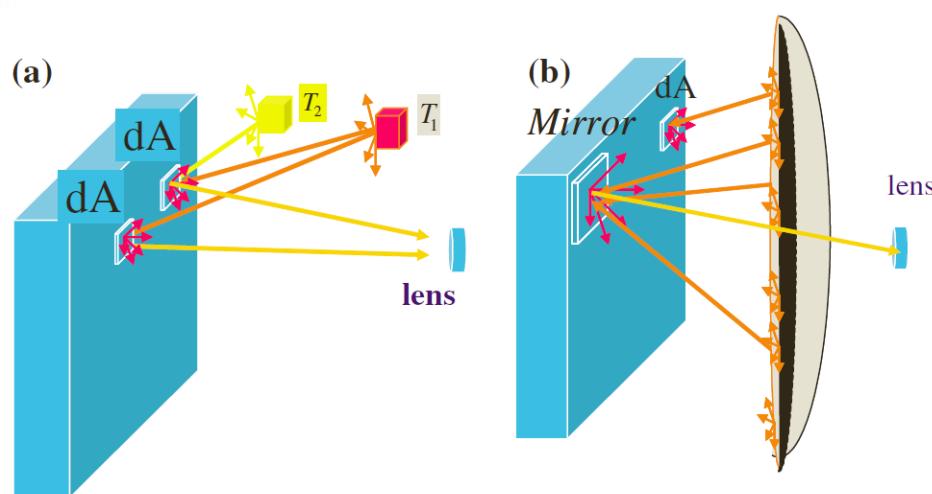
- Correction de mesures de température du sol
- Thermal mapping de chaussées (Thermocity)

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

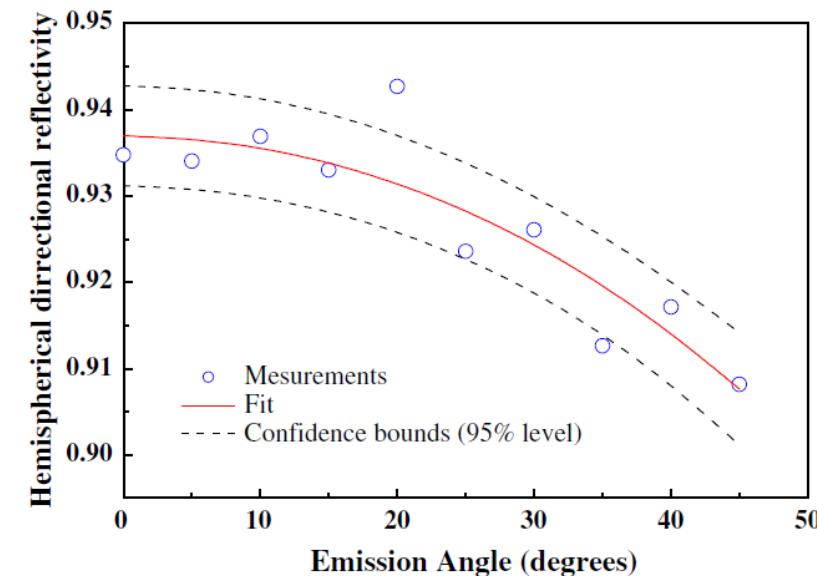
Environnement radiatif modélisé comme un corps noir homogène à une température T_{env} estimée à l'aide d'un miroir diffusant placé dans la scène thermique



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



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

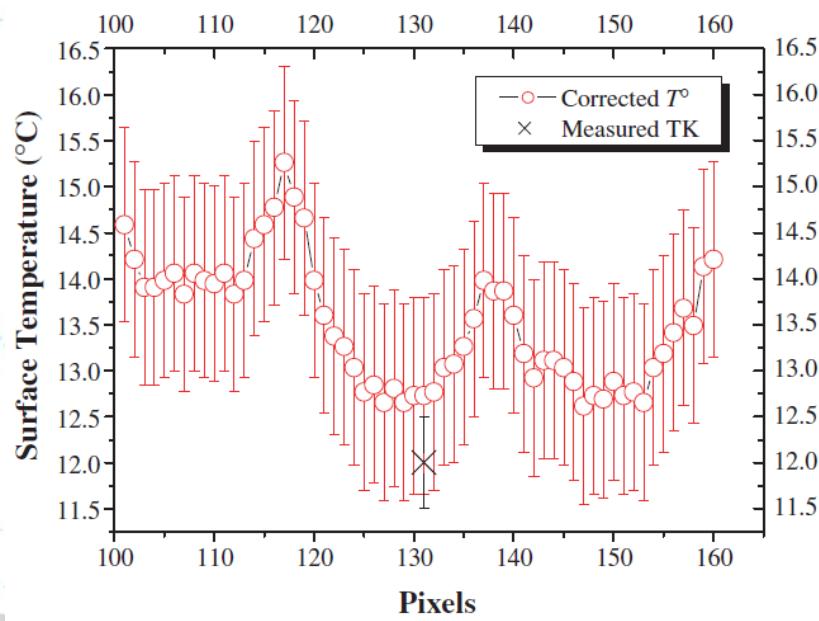


Exemple « simple » de correction

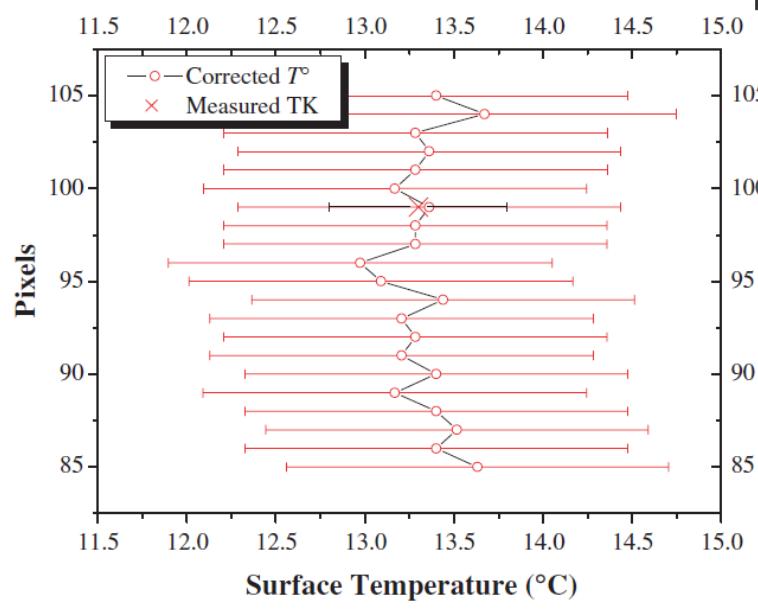
Correction de température et évaluation de l'incertitude de mesure

Validation par:

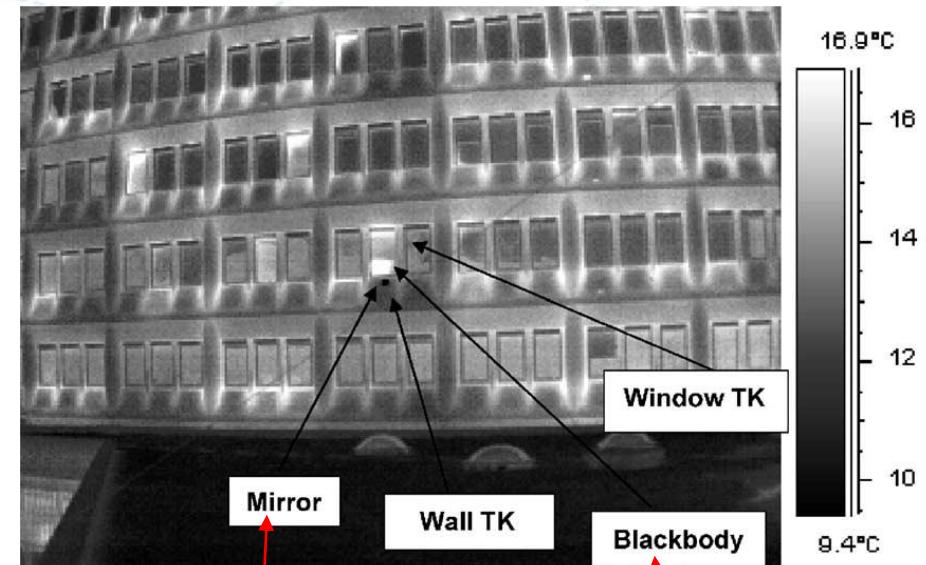
- Comparaison à des mesures par contact
- Mesure sur un corps noir plan placé dans la scène thermique



Paroi béton



Fenêtre



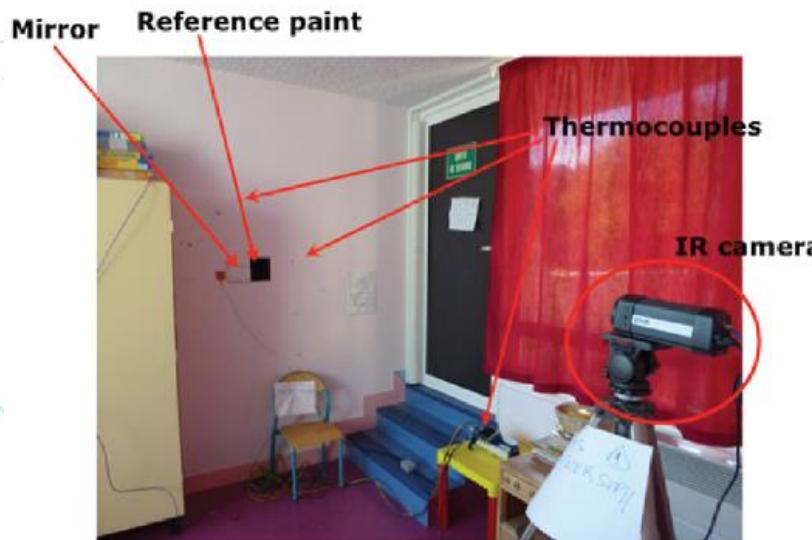
Estimation de la contribution de l'environnement radiatif

Vérification sur corps noir

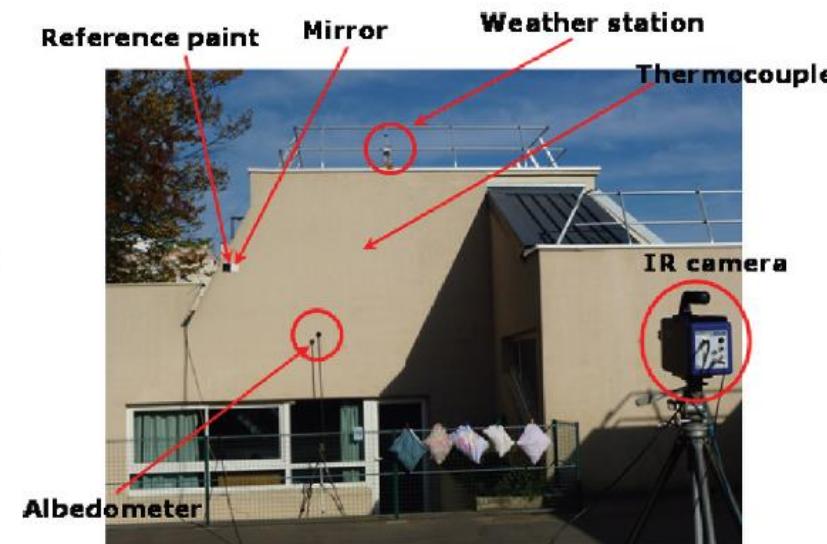
Utilisation de facteurs de forme pour la prise en compte de l'environnement radiatif

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

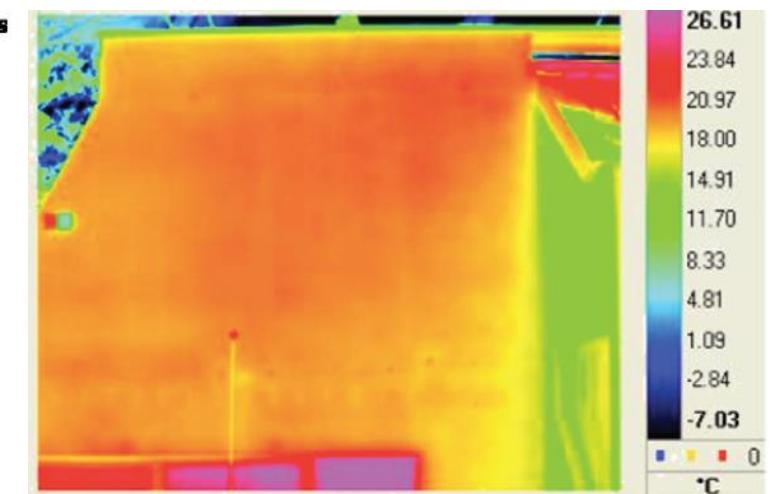
Projet DPE-IITI (financement ADEME)



Mesures en intérieur



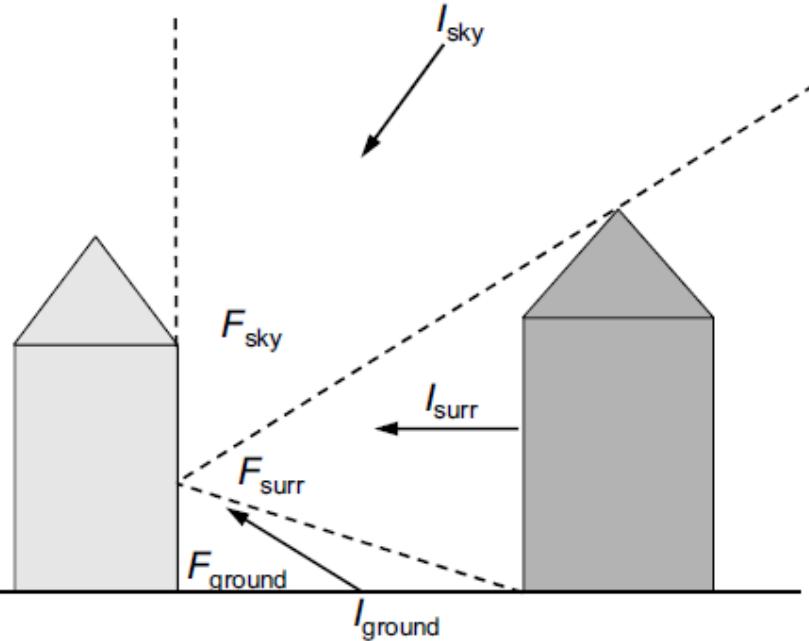
Mesures en extérieur



Exemple d'image thermique de la façade côté extérieur

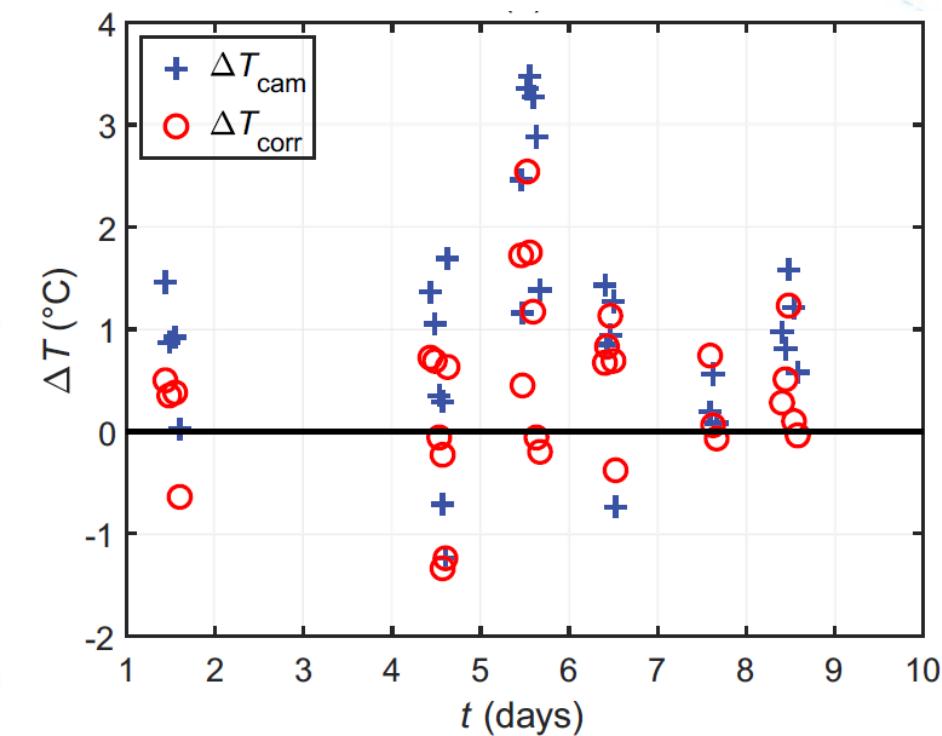
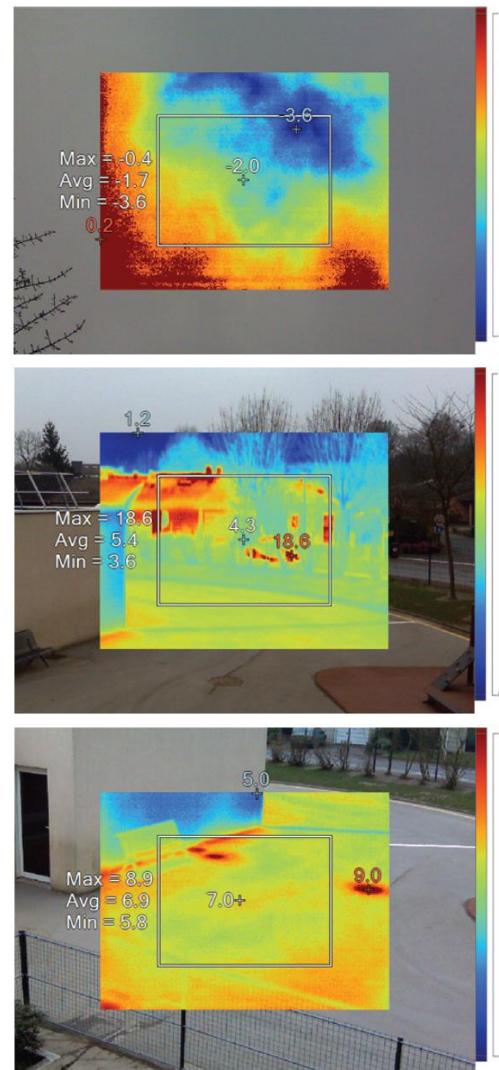
Utilisation de facteurs de forme pour la prise en compte de l'environnement radiatif

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



Prise en compte des hétérogénéités de l'environnement

M. Larbi Youcef et al., In situ quantitative diagnosis of insulated building walls using passive infrared thermography QIRT Journal, 2020



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 renovation;
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 température connue
placée sur la façade



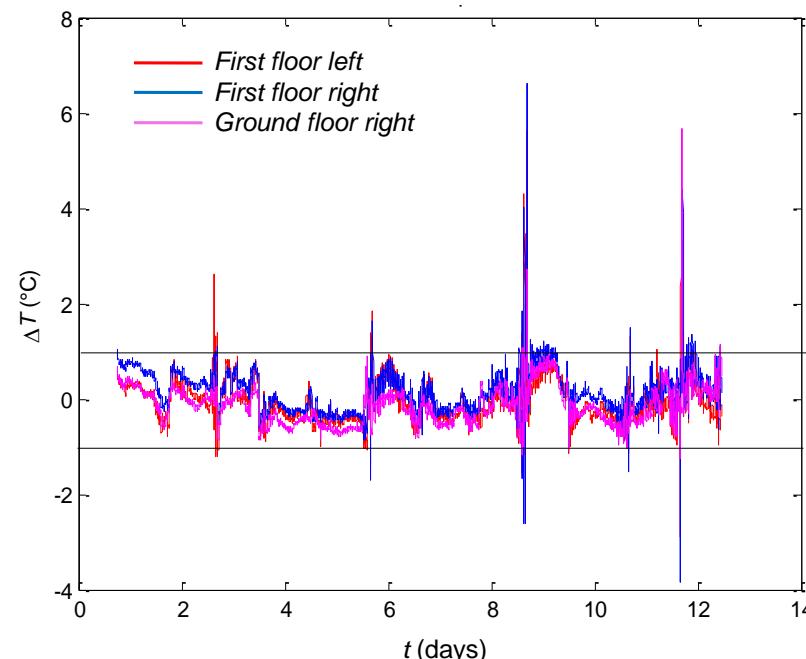
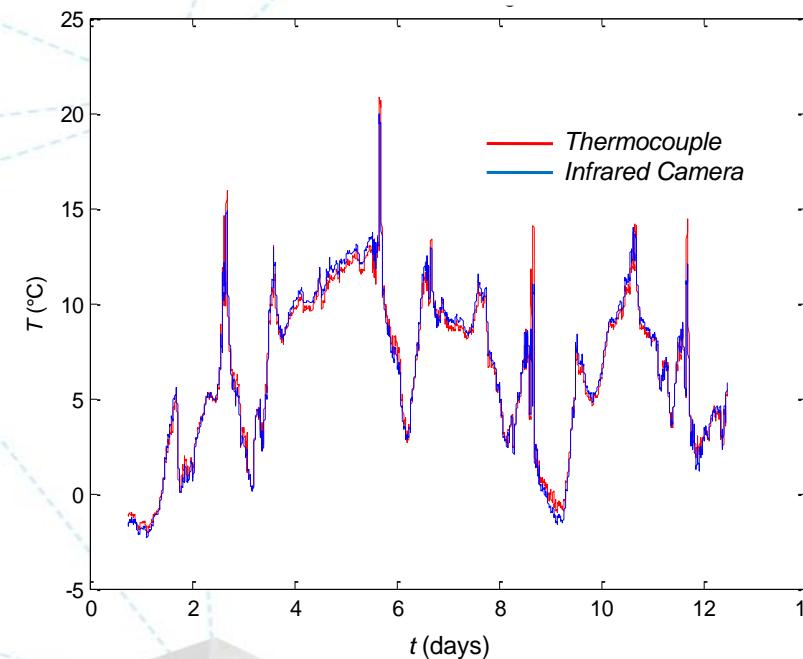
Exemple d'image thermique



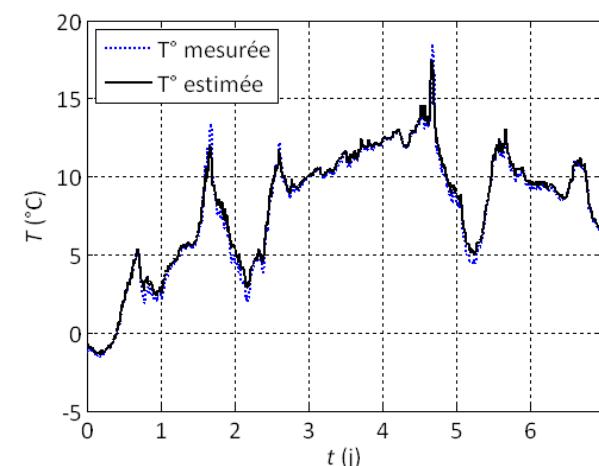
Instrumentation

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

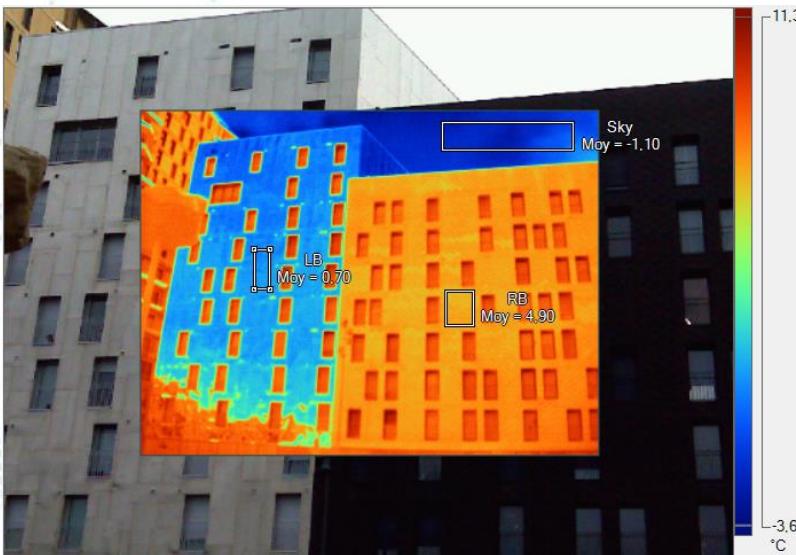


$$R_{M,\text{estimée}} = 4.5 \pm 0.7 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W} (3.8)$$

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 ε 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 ($\varepsilon=0.9$)	ε	T_0	ε	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

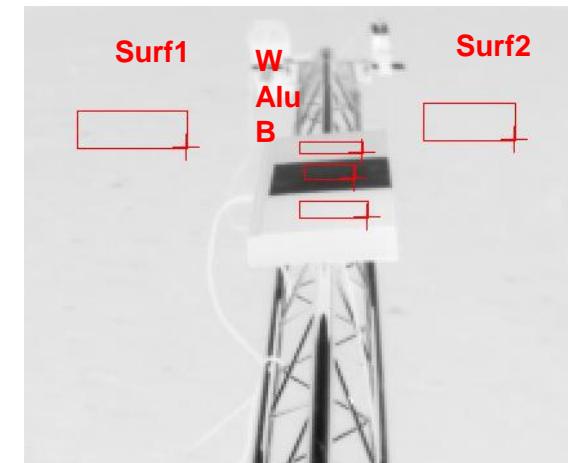
- Correction de mesures de température du sol
- Thermal mapping de chaussées (Thermocity)

Mesures de température de surface terrestre

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



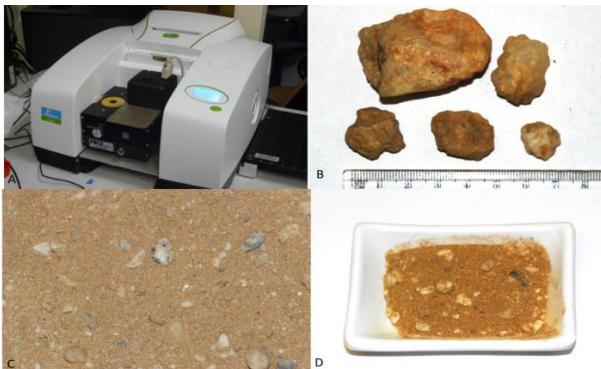
fiducial reference
temperature
measurements



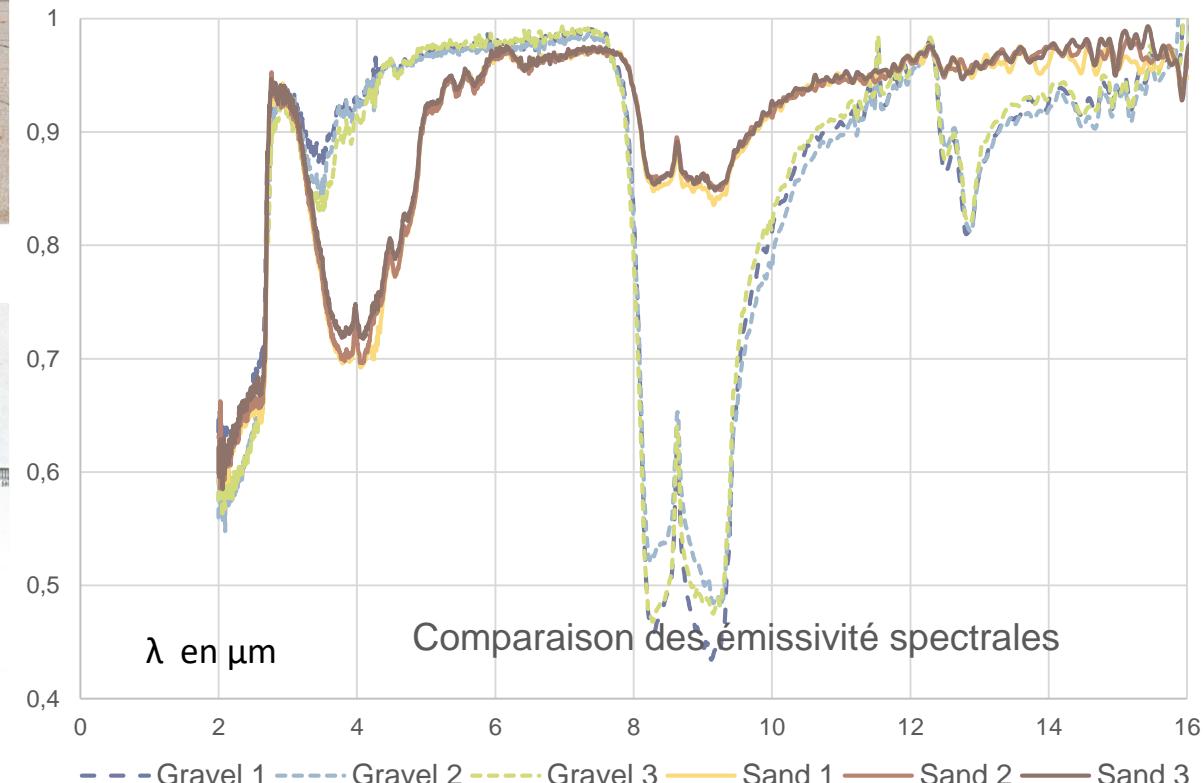
Mesures de température de surface terrestre



mesure sur site en Namibie

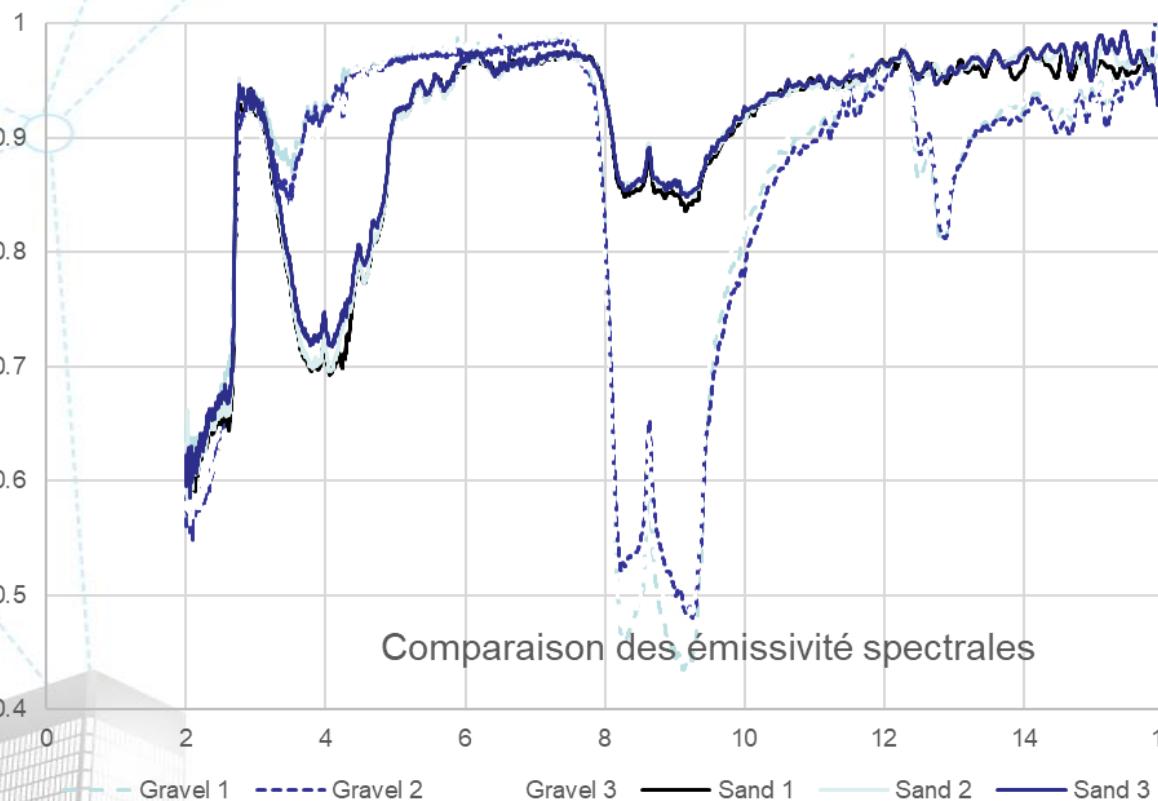


Echantillon de gravier et de sable,
spectromètre pour la mesure de
réflectance



Emissivité spectrales de divers échantillons de graviers prélevés en Namibie

Mesures de température de surface terrestre



Material	Emissivity for spectral band			
	2-17μm	8-14μm	8-12μm	9.6-11.5μm
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.

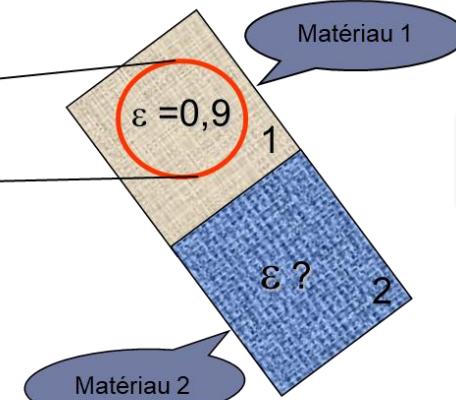
Etape 1

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



Régler Emissivité

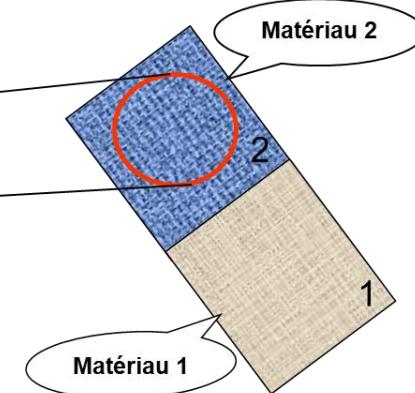
$$\varepsilon = 0,9$$



Etape 2



Ajuster Emissivité



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

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

Emissomètre EM4



Emissomètre EM5



Mesure en large bande et 8-14µm, large surface de mesure adaptée aux matériaux de construction

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

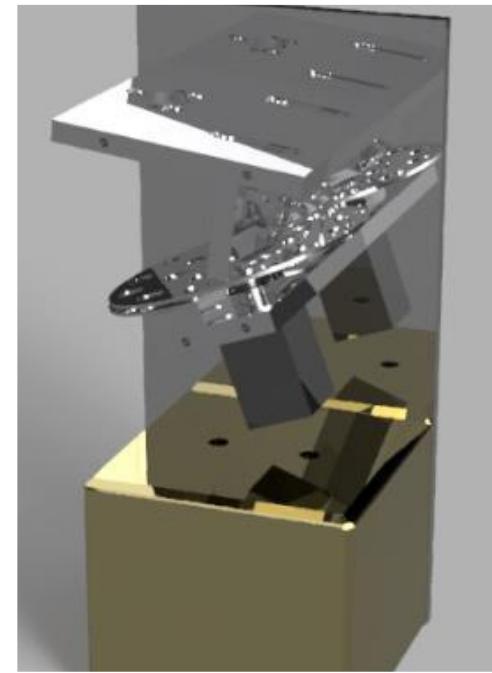
Mesures thermiques environnementales

Albédo : facteur de réflexion solaire

Emissivité thermique: rayonnement thermique des surfaces

SRI : Solar Reflectance Index selon la norme ASTM E1980

Albédomètre AL-01



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



Thermal Mapping de chaussées

Correction of IR images:

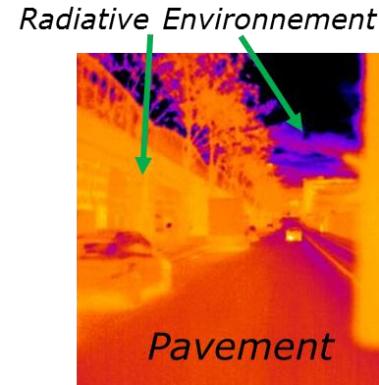
- Environment is variable (spatially and temporally) and heterogeneous (sky, trees, buildings, other infrastructures...)
- Automatic correction of measurements with a blackbody in the camera FOV



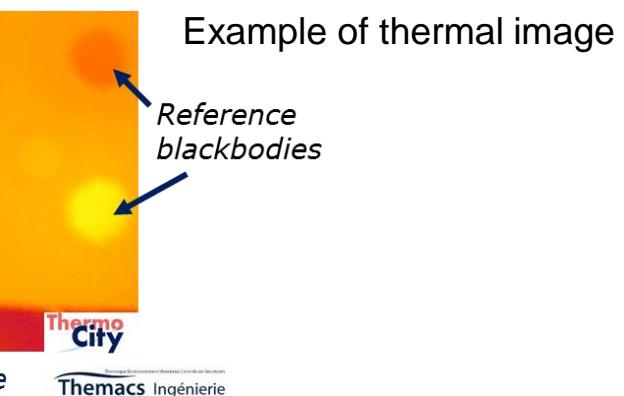
Measurement in progress during the winter 2016-2017



The experimental dispositif on the roof of a car



Sample of IR image
(ThermoCity Device)

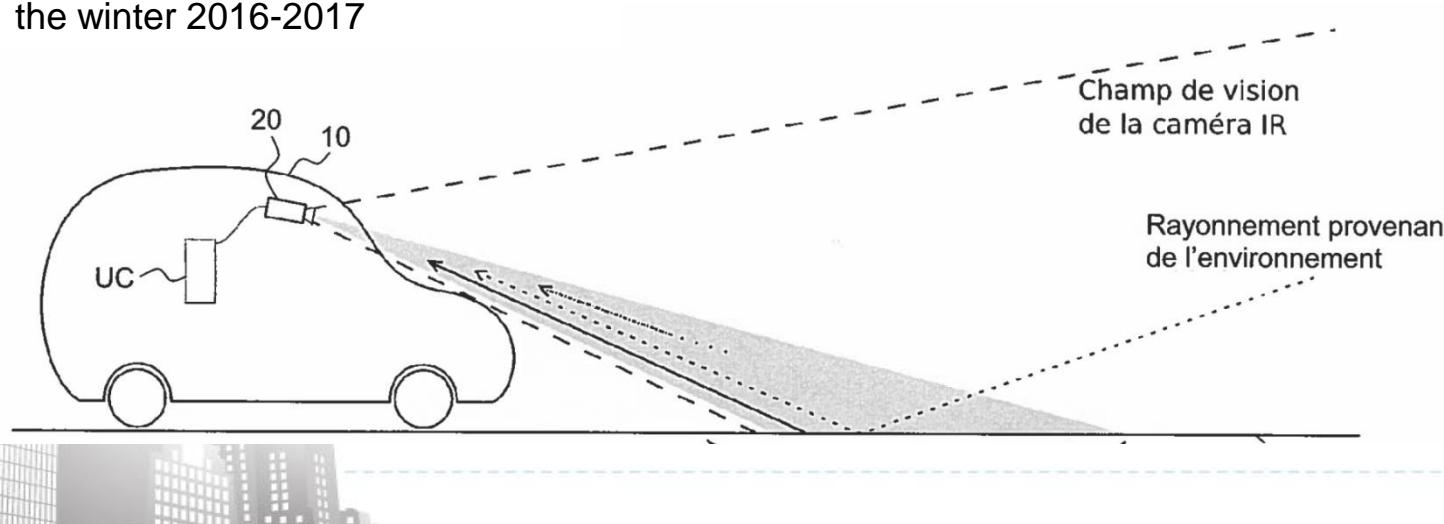


Thermo City



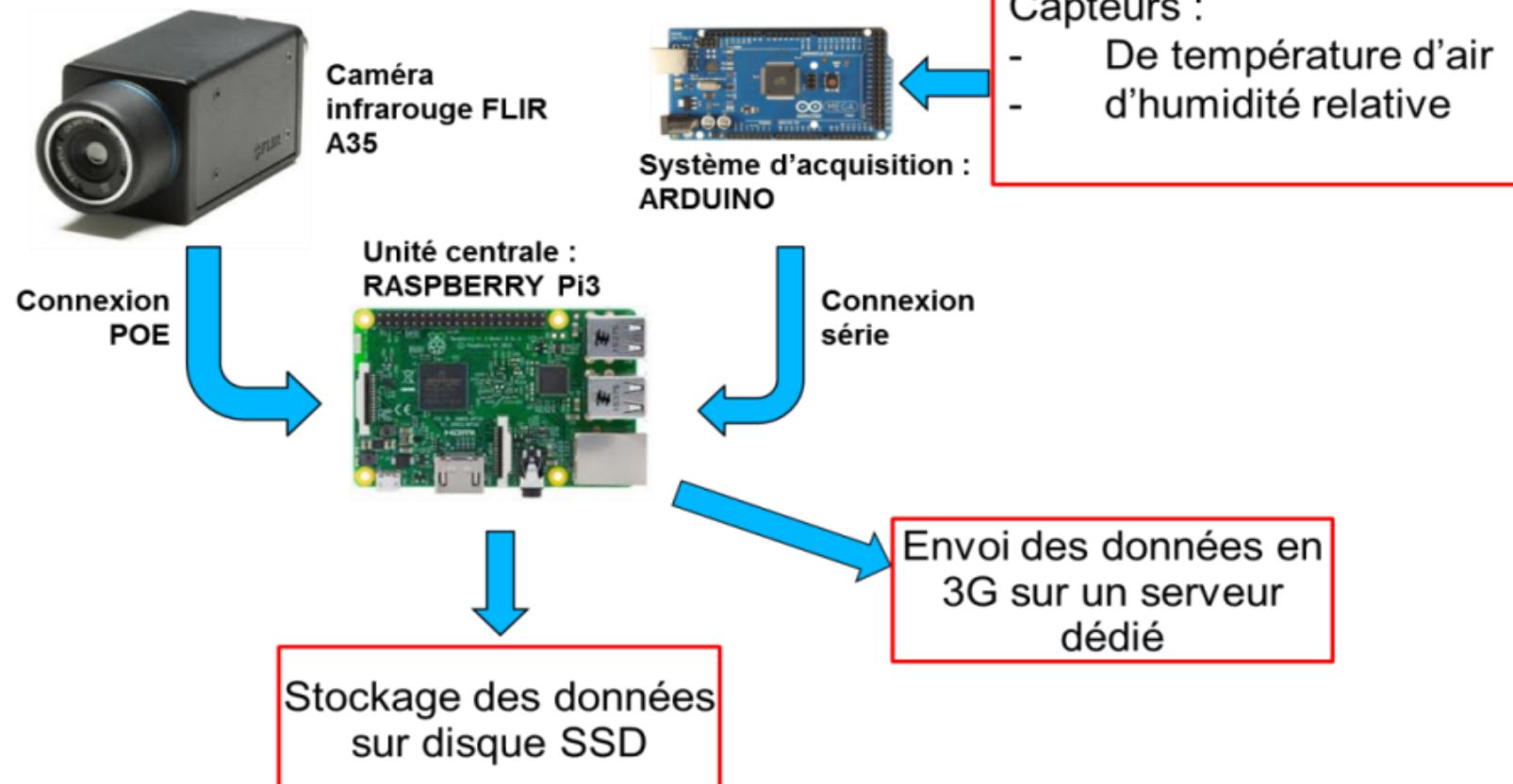
Inemacs Ingénierie
Thermique Environnement Matériaux Contrôle de Structures

CERTES
THERMIQUE • ENVIRONNEMENT
SYSTÈMES ENÉRGÉTIQUES

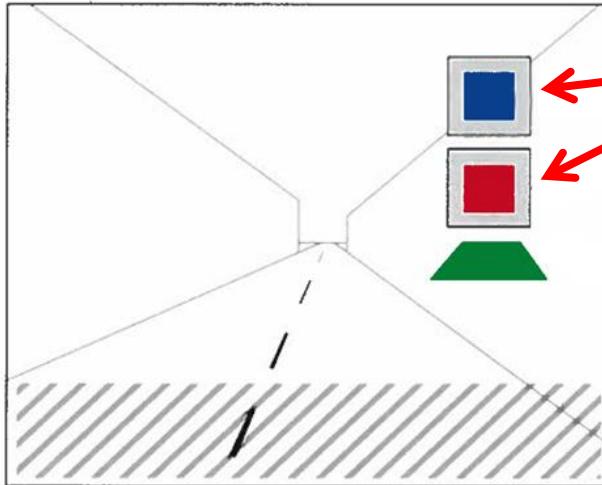


Thermal Mapping de chaussées

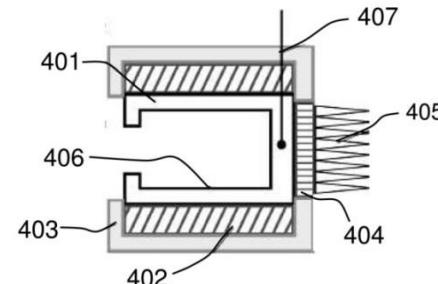
Architecture du dispositif:



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:

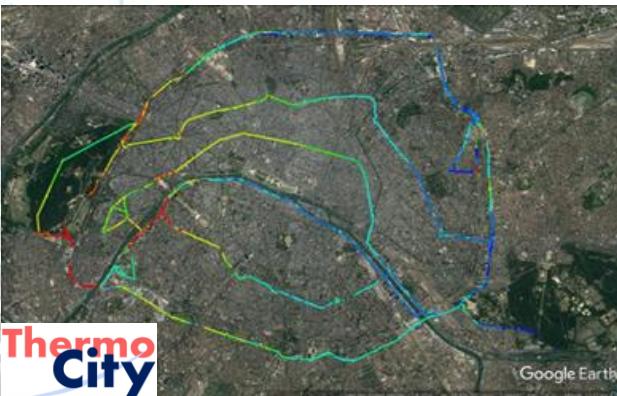
Du 19 au 20 janvier 2017

Du 13 au 14 février 2017

Mesure avec 2 véhicules : Thermoroute® et Thermocity®

Couplage avec de la thermographie aérienne effectué par le LNE

Aggrégation de l'ensemble des mesures



Cerema



LNE

Thermique Environnement Matériaux Contrôle de Structures
Themacs Ingénierie

CERTES
 THERMIQUE • ENVIRONNEMENT
 SYSTÈMES ENERGÉTIQUES

Thermal Mapping de chaussées

Deux corps noirs de référence

Moins de mapping / plus de précision !

Pyromètre optique visant à travers la plaque

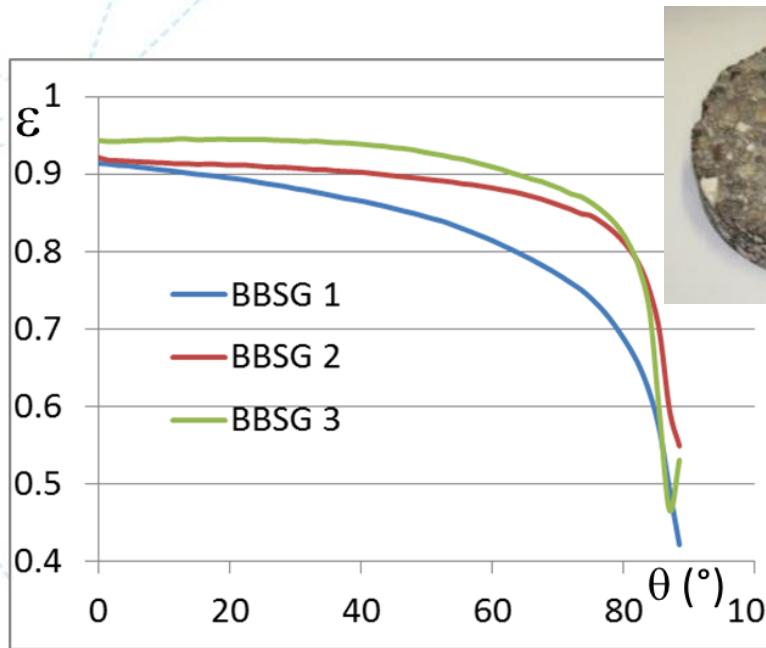
Plaque aluminium réfléchissante ($\epsilon < 0,1$)



Thermal Mapping de chaussées

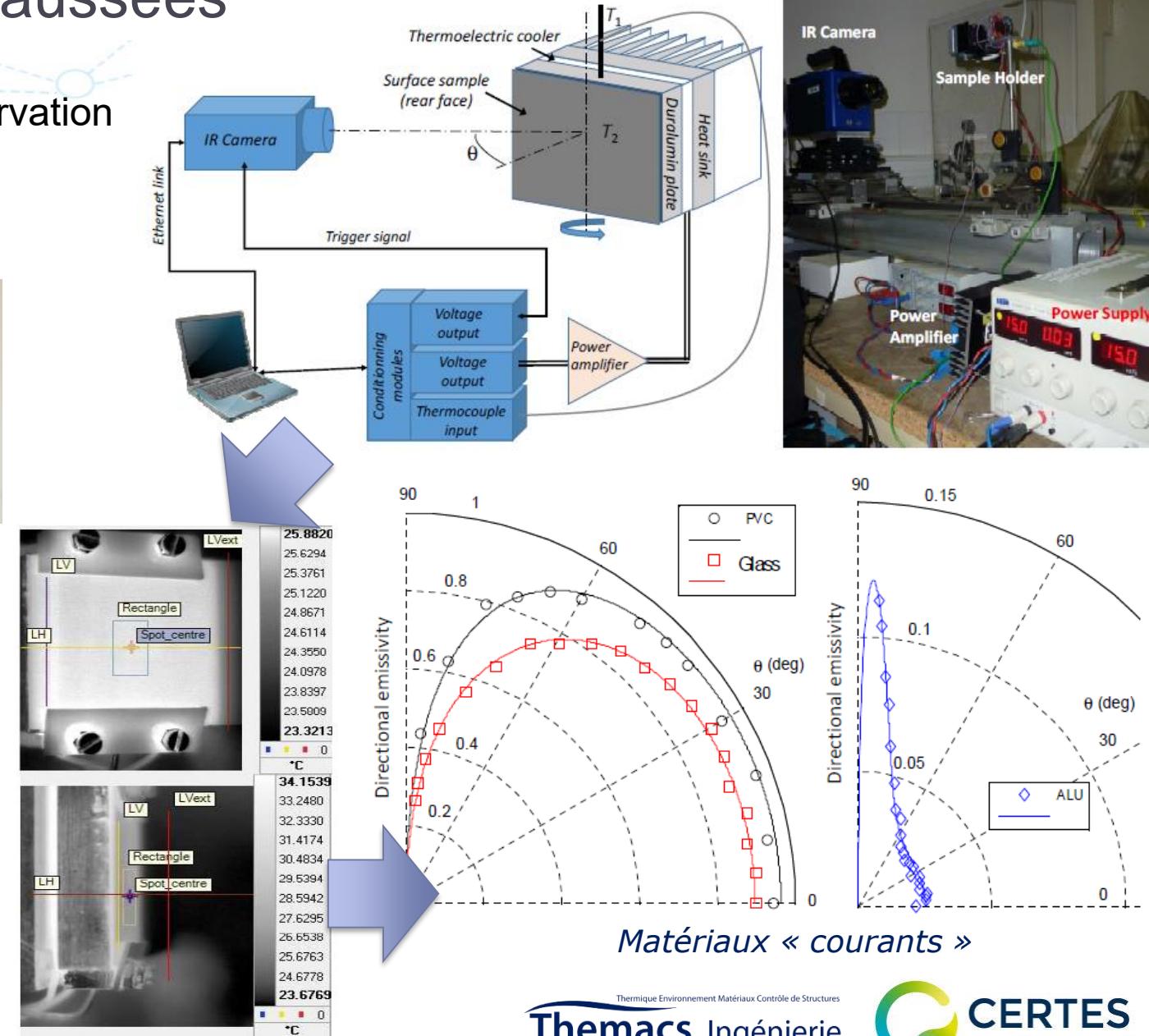
Variations d'émissivité avec l'angle d'observation

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



Questions?