

# Utilisation des données de télédétection infrarouge thermique pour l'étude du microclimat urbain à différentes échelles : Potentiel, limites et applications

Roupioz Laure, ONERA  
SIMUREX - 2026

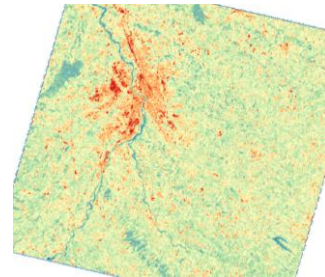
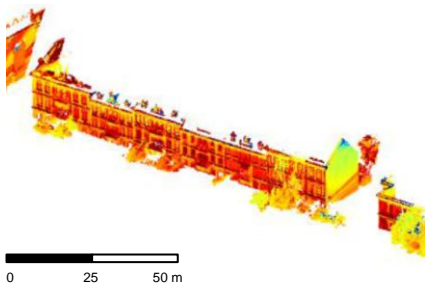


ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

# Données infrarouge thermique

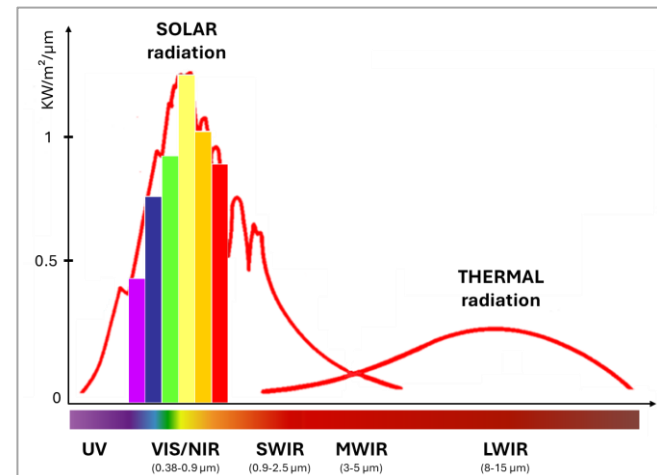
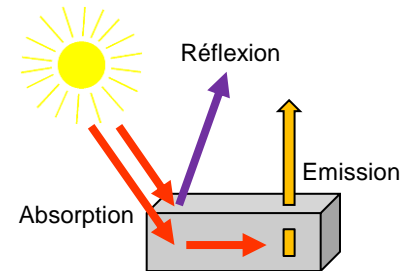
Etudier le climat urbain, notamment pour des diagnostics de confort et de risque



- ➔ Principe de la mesure IRT par télédétection
- ➔ Comment estimer la température de surface à partir de données de télédétection
- ➔ Mesures à différentes échelles : potentiel et limites des données
- ➔ Quelques applications

# Principes de la mesure par télédétection

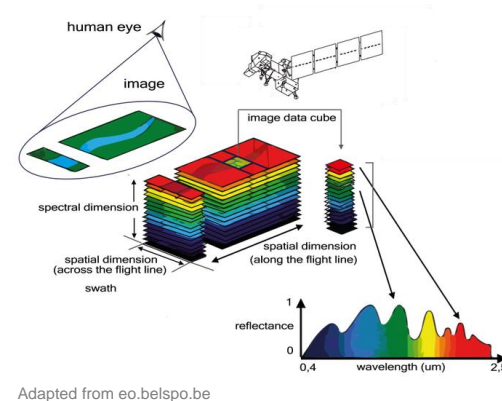
- La télédétection passive dépend du rayonnement des objets
- Deux phénomènes dans le domaine optique : réflexion et émission en fonction de longueur d'onde ( $\lambda$ )



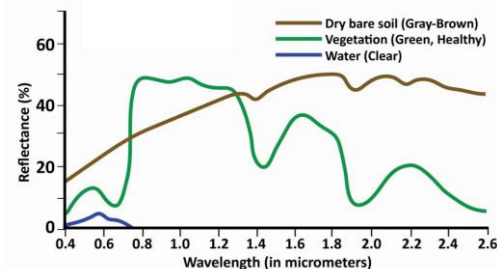
Adapted from J-L Casanova

# Principes de la mesure par télédétection

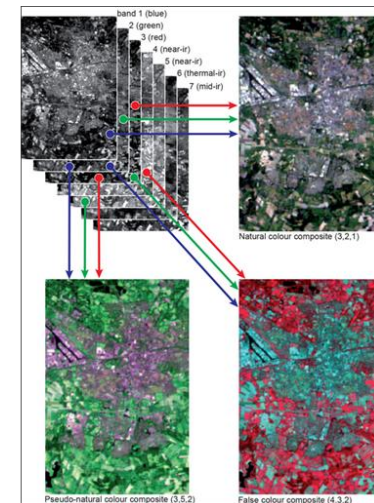
- La télédétection passive dépend du rayonnement des objets
- Deux phénomènes dans le domaine optique : réflexion et émission en fonction de longueur d'onde ( $\lambda$ )
- Chaque objet absorbe de façon sélective de l'énergie solaire (ondes courtes) et émet de l'énergie thermique (ondes longues)



Adapted from eo.belspo.be



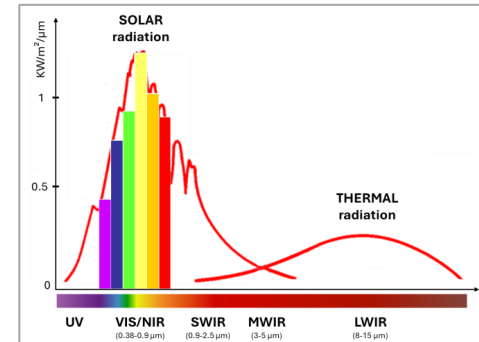
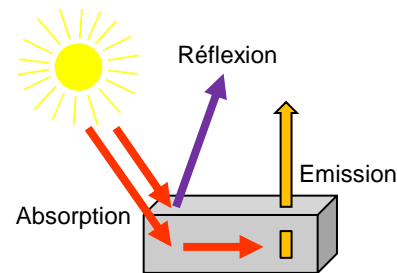
Source : mapsaping.com



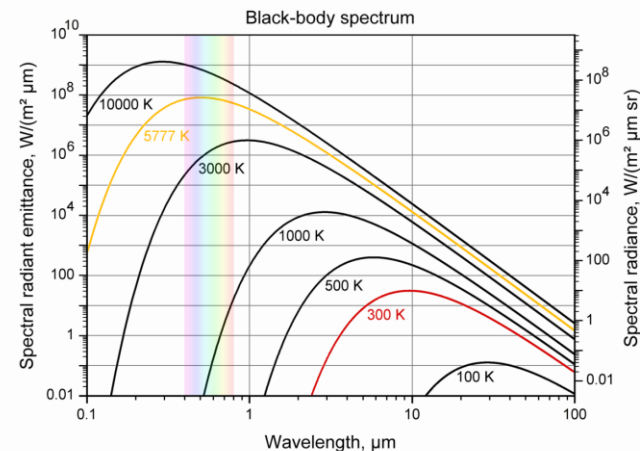
Source : U. Twente

# Principes de la mesure par télédétection

- La télédétection passive dépend du rayonnement des objets
  - Deux phénomènes dans le domaine optique : réflexion et émission en fonction de longueur d'onde ( $\lambda$ )
  - Chaque objet absorbe de façon sélective de l'énergie solaire (ondes courtes) et émet de l'énergie thermique (ondes longues)
  - LST estimée à partir du rayonnement émis
  - Loi de Wien : lien entre le rayonnement émis par un corps noir et longueur d'onde
- $\lambda_{max}$  inversement proportionnelle à la température



Adapted from J-L Casanova



Source : <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=853056>

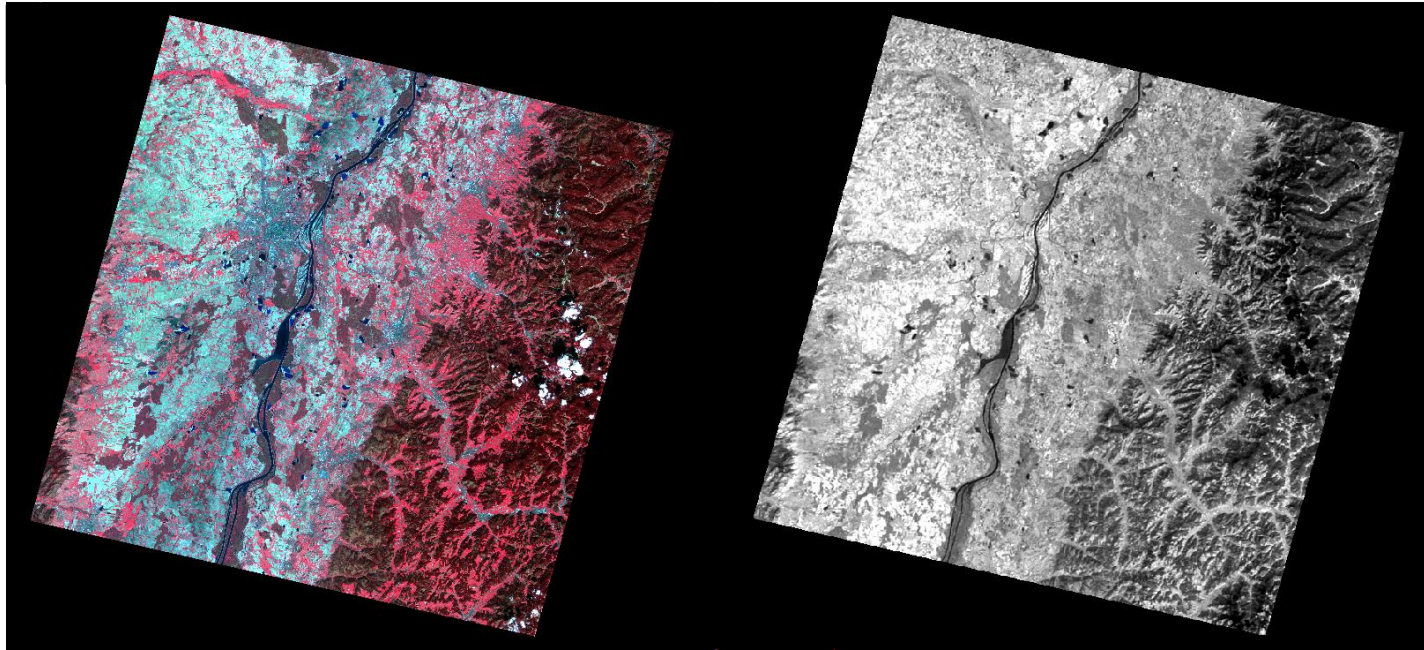


# Principes de la mesure par télédétection

Image ASTER du 28.03.2014

VNIR (bandes 3/2/1: 0.8/0.66/0.56  $\mu\text{m}$ )

Infrarouge Thermique (bande 12: 9.1  $\mu\text{m}$ )



*Source : The ASTER L1T data product, courtesy of the NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. [search.earthdata.nasa.gov](https://search.earthdata.nasa.gov)*

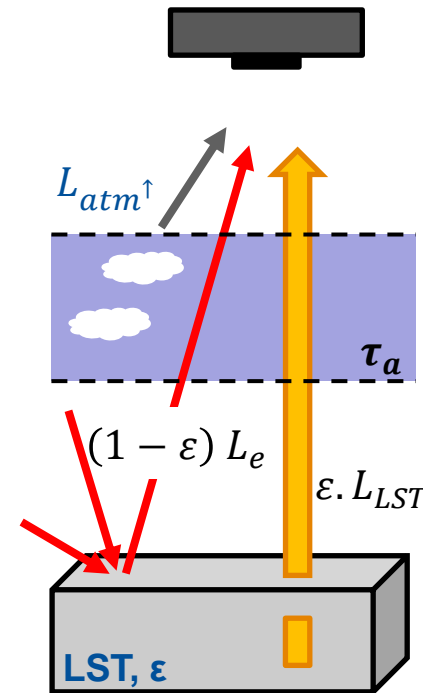
# Principes de la mesure par télédétection

## Télédétection IRT dans le système Terre - atmosphère

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

- ➔ Dépend de l'émissivité de l'objet (capacité à émettre de l'énergie radiative)
- ➔ Et de la contribution de l'environnement (atmosphère, nuages, objets environnants)

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



# Principes de la mesure par télédétection

## De la mesure ( $L_m$ ) à la température de surface (LST)

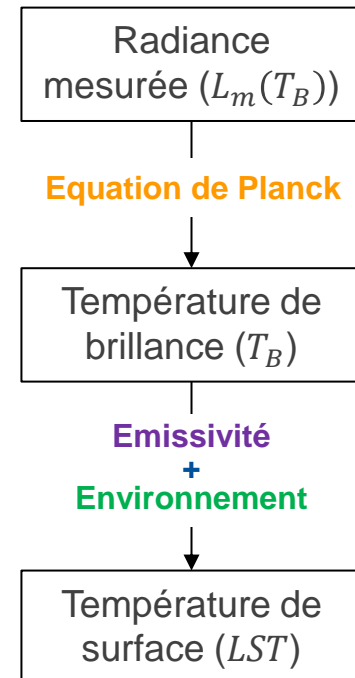
➔ On ne mesure pas directement une température mais un flux radiatif ( $\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}.\text{sr}^{-1}$ )

La loi de Planck exprime la radiance émise par un corps noir à la température  $T$  : radiance ( $L_m$ ) ➔ température de brillance ( $T_B$ )

$$L_m(T_B) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_B}\right) - 1 \right]}$$

$C_1 = 1,19106 \times 10^8 \text{ W.m}^{-2}.\mu\text{m}^4.\text{sr}^{-1}$   
 $C_2 = 1,43883 \times 10^4 \text{ }\mu\text{m.K}$

A partir de  $T_B$  et de l'émissivité  $\varepsilon$  (dépendants de  $\lambda$ ) on obtient la température de surface (LST) (+ contribution de l'environnement)

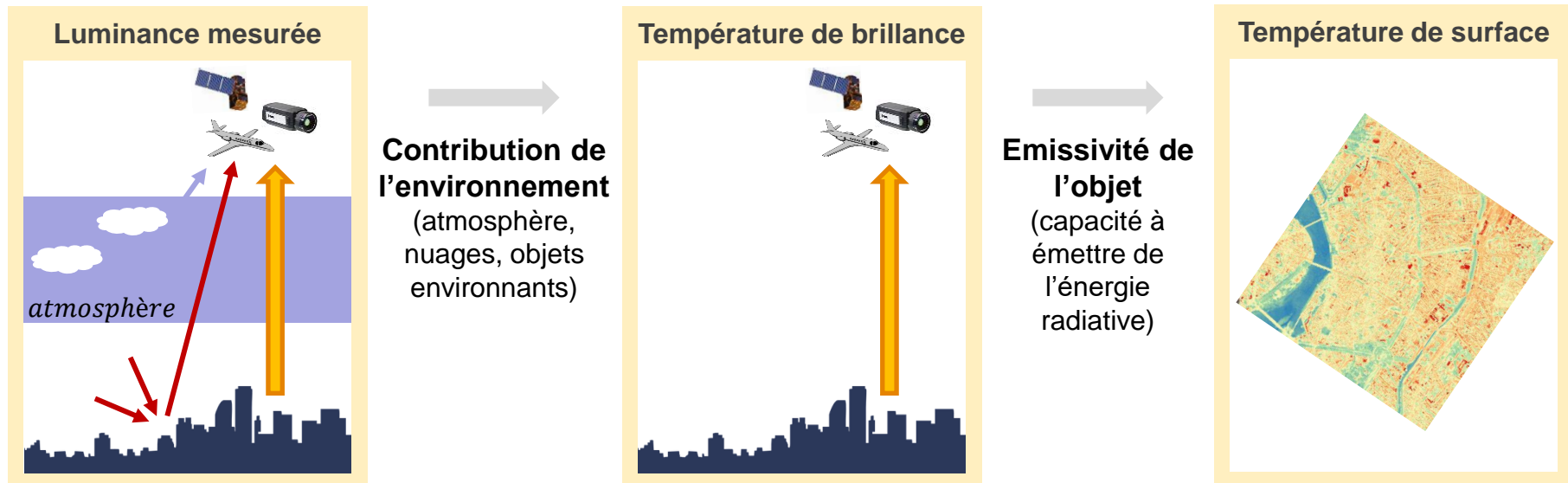




# De la mesure à la température de surface

**Mesure: rayonnement émis par l'objet** (flux radiatif - luminance -  $\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}.\text{sr}^{-1}$ )

La température de surface est estimée à partir de cette mesure, en prenant en compte :



# Emissivité

## Propriété optique de l'objet observé

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

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

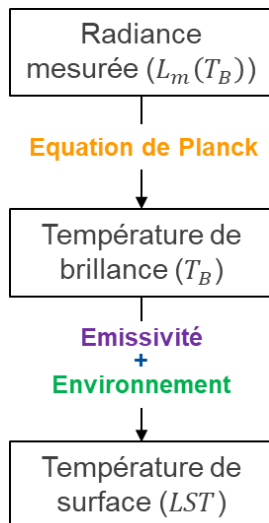


Source: Dr. Claudia Künzer

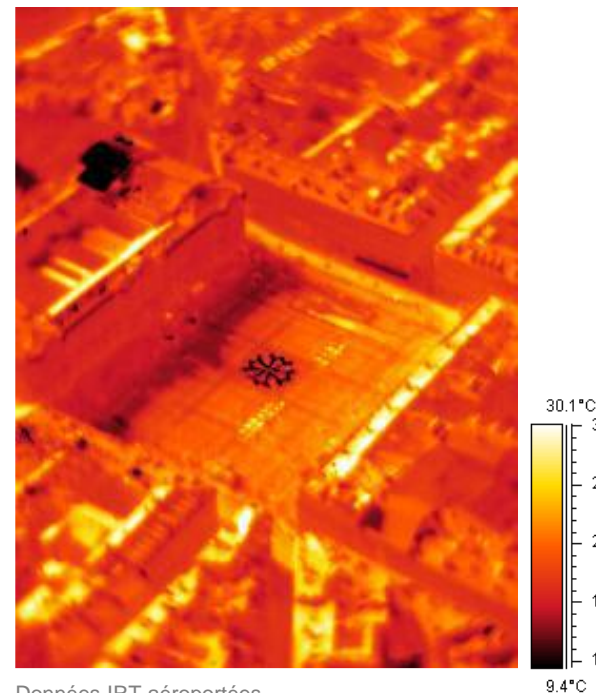
- ➔ Différentes températures de brillance ne signifient pas forcément que les objets ont une température de surface différente
- ➔ L'émissivité et la température de brillance dépendent de la longueur d'onde

# Emissivité

Pourquoi la croix Occitane de la place du Capitole (Toulouse) apparaît « froide » sur l'image IRT aéroportée?



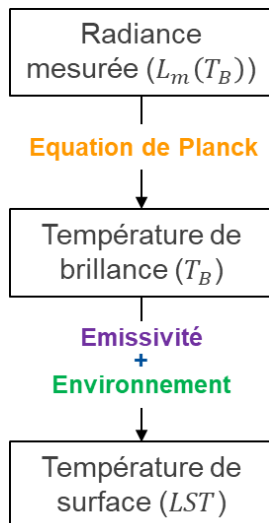
Emissivité moyenne (8-14 $\mu\text{m}$ )	
Eau claire	0.98-0.99
Bois	0.93-0.94
Métal poli	0.16-0.21
Pavé en grès	0.90-0.93



Données IRT aéroportées  
11/07/2004, 10h (heure locale) – Campagne CAPITOUL

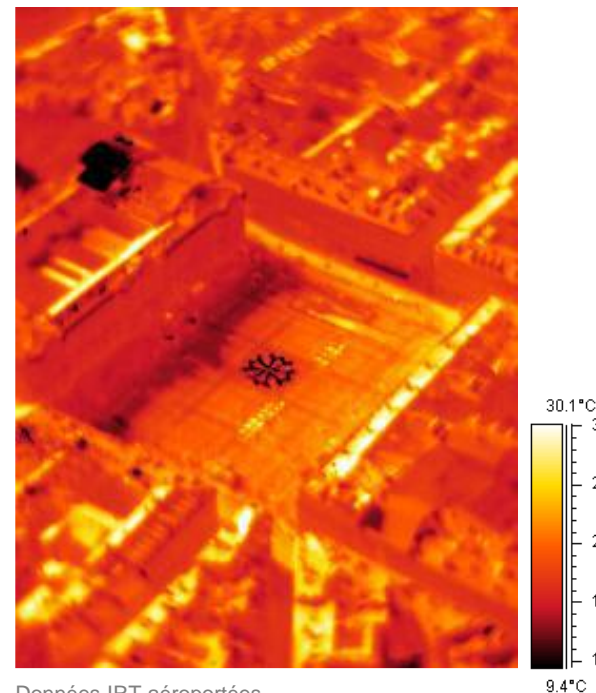
# Emissivité

Pourquoi la croix Occitane de la place du Capitole (Toulouse) apparaît « froide » sur l'image IRT aéroportée?



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

- ➔ Métal
- ➔ L'émissivité dépend du matériau mais aussi de son vieillissement



Données IRT aéroportées  
11/07/2004, 10h (heure locale) – Campagne CAPITOUL

# 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 d'émissivité disponibles

# Mesures dans l'infrarouge thermique

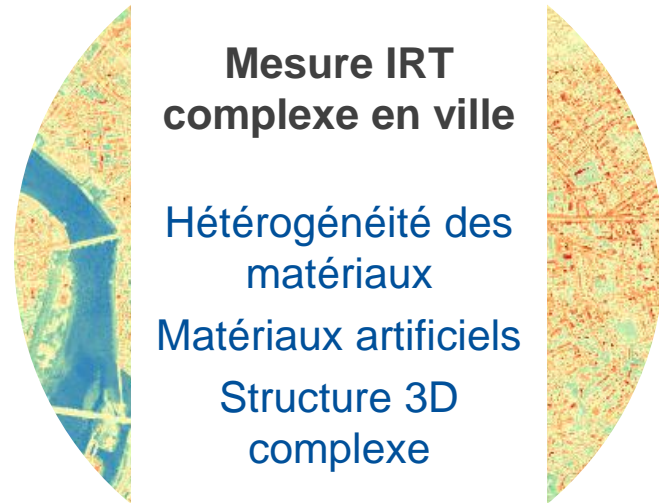
## Caractéristiques des données IRT

- De jour comme de nuit
- Flux IRT émis plus faible que flux réfléchi dans le visible
- Sensible atmosphère/nuages (correction atmosphérique)
- Impact de la structure 3D de la surface

## Température de surface

- Forte variabilité spatiale et temporelle
- Plusieurs sources d'incertitudes

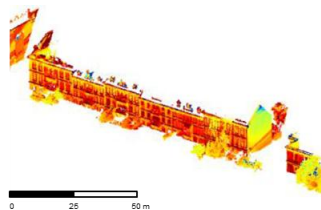
**Ilot de chaleur urbain de surface  $\neq$  îlot de chaleur urbain**





# Différentes échelles

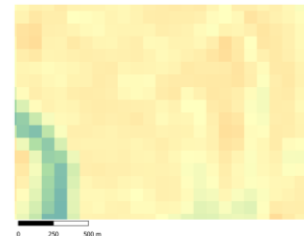
 Sol



 Aéroportées



 Satellitaires



<b>Rés. spatiale</b>	Centimétrique	Sub-métrique Métrique	Décamétrique Kilométrique
<b>Rés. temporelle</b>	Ponctuelle	Ponctuelle	Récurent (16j - journalier)
<b>Adapté pour</b>	Echelle bâtiment/rue Données sur les surfaces verticales	Echelle rue à ville Rés. spatiale fine Couverture	Echelle quartier à agglomération Produits LST (gratuit) Suivi temporel
<b>Limitations</b>	Mesures localisées Interprétation des données	Coûts élevés Répétitivité	Rés. spatiale/temporelle Nuages

# Resolution spatiale

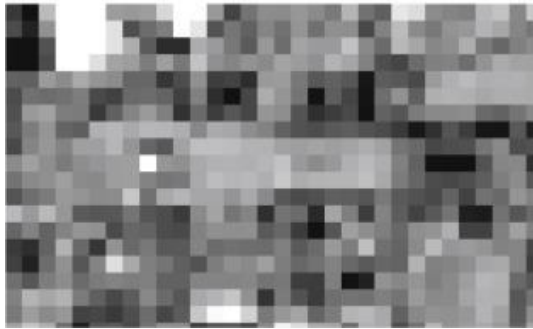
(A) 1 m



(B) 10 m



(C) 30 m

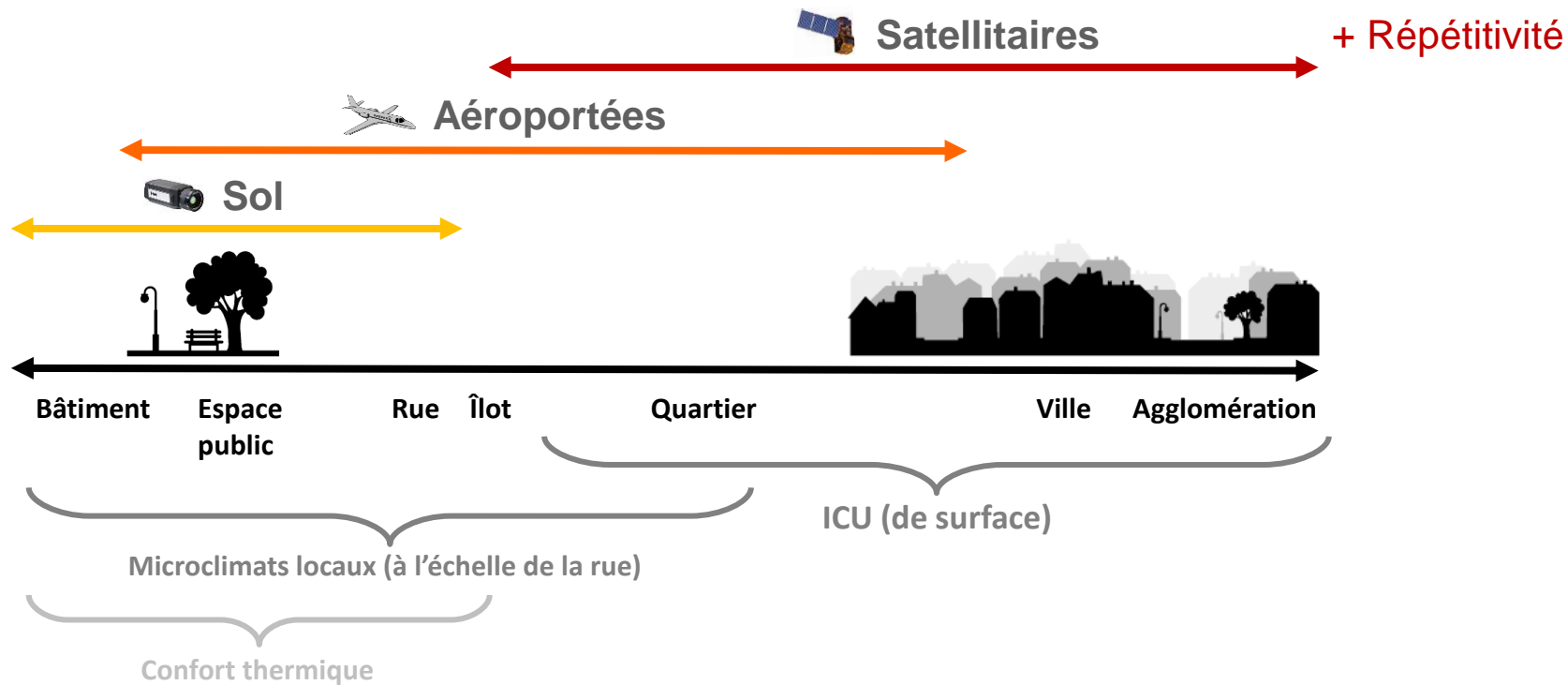


(D) 250 m

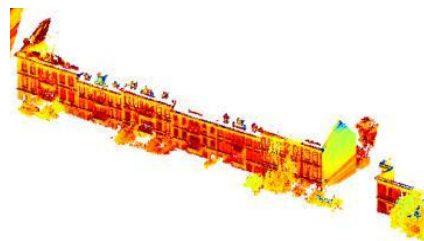
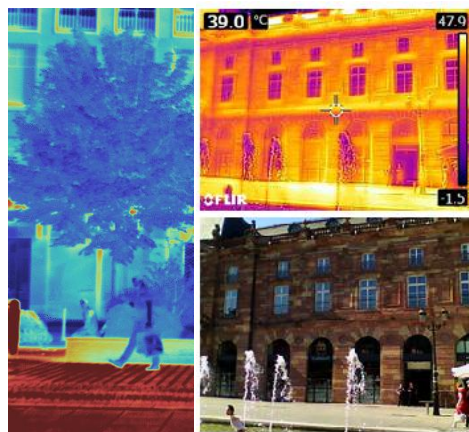


Source : Chapter 1 - A systematic view of remote sensing,  
Editor(s): Shunlin Liang, Jindi Wang,  
Advanced Remote Sensing (Second Edition),  
Academic Press, 2020,  
Pages 1-57,  
ISBN 9780128158265,  
[doi.org/10.1016/B978-0-12-815826-5.00001-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815826-5.00001-5)

# Différentes échelles



# Mesures sol



<b>Rés. spatiale</b>	Centimétrique
<b>Rés. temporelle</b>	Ponctuelle
<b>Adapté pour</b>	Echelle bâtiment/rue Données sur les surfaces verticales
<b>Limitations</b>	Mesures localisées Interprétation des données

## Vérifier le paramétrage de la caméra IRT

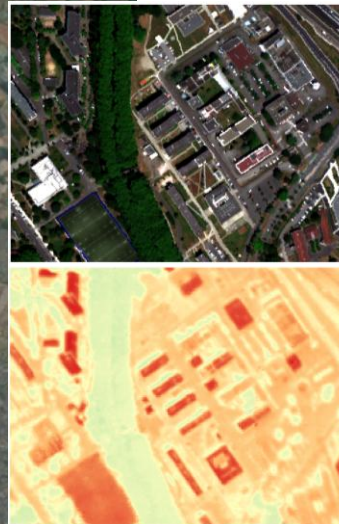
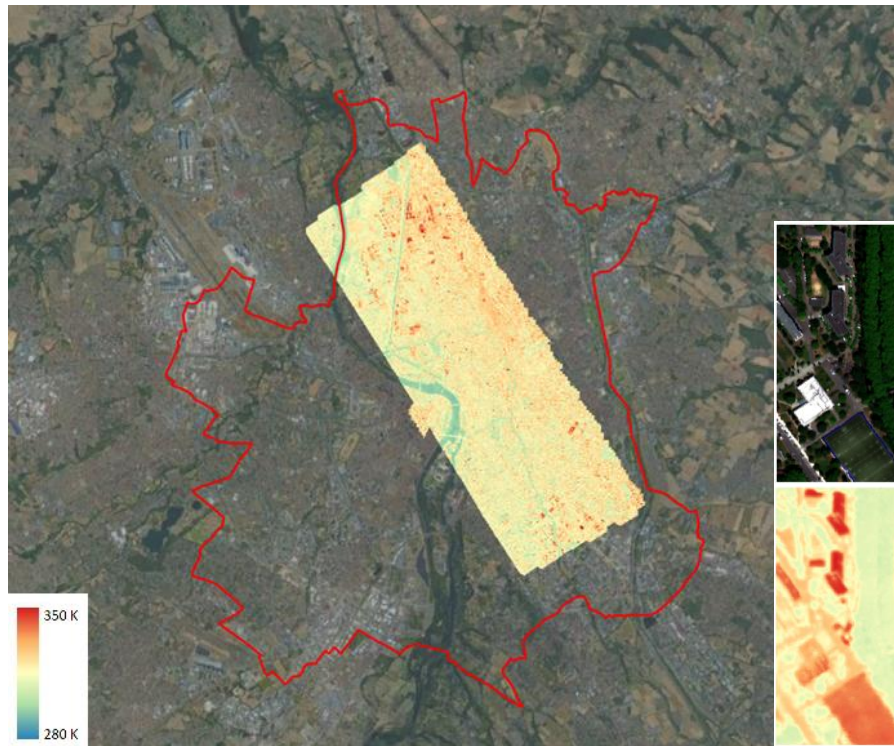
- Emissivité à 1 (température de brillance)
- Distance à 0 m (contribution de l'environnement)

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

## Mesure perpendiculaire à la surface

Effet canyon / Contribution de l'environnement

# Mesures aéroportées



**Rés. spatiale**

Sub-métrique, Métrique

**Rés. temporelle**

Ponctuelle

**Adapté pour**

Echelle rue à ville  
Résolution spatiale fine  
Couverture

**Limitations**

Coûts élevés  
Répétitivité

**Se renseigner sur le traitement des données**

- Calibration du capteur
- Correction atmosphérique
- Méthode d'estimation de la LST

**Effets canyon et directionnels**

# Mesures satellitaires

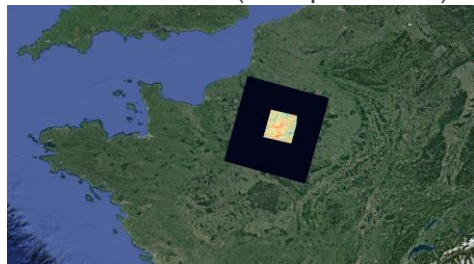
<b>Rés. spatiale</b>	Décamétrique, Kilométrique
<b>Rés. temporelle</b>	Récurent (16j - journalier)
<b>Adapté pour</b>	Echelle quartier à agglomération Produits LST (gratuit) Suivi temporel
<b>Limitations</b>	Rés. spatiale/temporelle Nuages



# Capteurs IRT satellitaires actuels et futurs (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 (30 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 $\mu$ m)	5	2	8	2	7	4	5	5
Lancement	1999	2021	1999	2016	2022	2026	2027	2028

ASTER LST (+ empreinte L9)



MODIS LST (MOD11\_L2)



+ ECOSTRESS (ISS)

➔ A venir: meilleures résolutions spatiale et temporelle  
+ complémentarité entre missions

## Estimation et suivi de la LST en ville, facteurs limitants:

- Pas de capteurs offrant une résolution spatiale et temporelle adaptée (pour le moment...)
- Hétérogénéité des matériaux : forte variabilité de l'émissivité (matériaux artificiels), objets urbains de 10 mètres en moyenne (pixels mixtes)
- Géométrie complexe : effets de cavité (réflexions multiples, diffusion de la canopée urbaine), effets directionnels (erreur > 5K)

➔ Complexe d'estimer la LST en milieu urbain

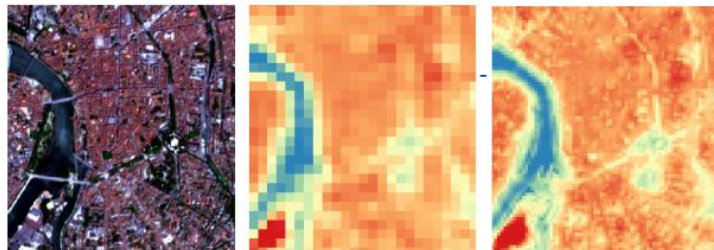
# LST satellitaires

## Produits LST (niveau L2)

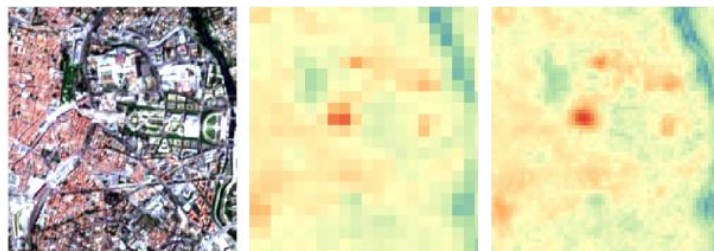
- Par défaut, utiliser les produits fournis par les agences spatiales ou sur les sites dédiés (ex: catalogue THEIA)
- Incertitude en milieu urbain: +/- 1°C (voire plus)
- Produits désagrégés: meilleure résolution spatiale mais effet de lissage
- A combiner avec d'autres données d'observation de la terre (géoréférencement !)
- Compromis résolution spatiale et temporelle

### ➔ Futures missions

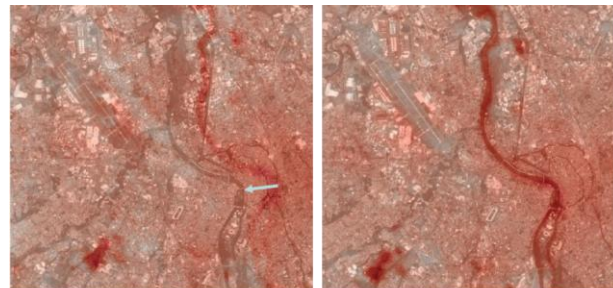
Carte de LST à 90 m et 30 m générées à partir de données ASTER (projet THERMOCITY)



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



Montpellier, 29/08/2015, ≈ 13h [20-45 ° C]



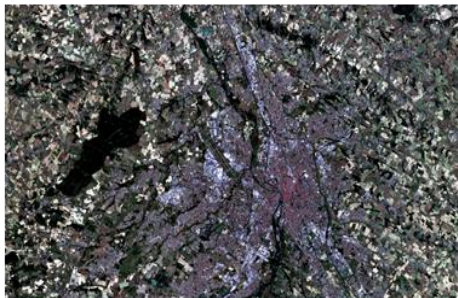
Correction géométrique sur ECOSTRESS, Toulouse  
Crédits: Leturgie et al., note technique



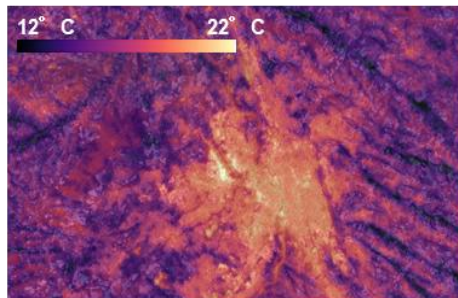
# LST satellitaires

## Exemple d'utilisation de produits LST

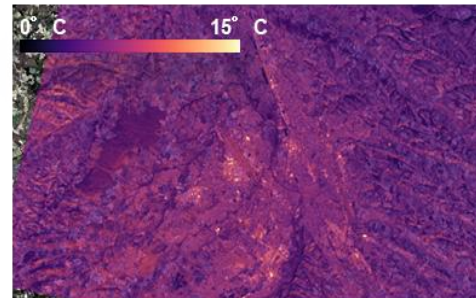
(Source: SCO THERMOCITY, [www.spaceclimateobservatory.org/fr/thermocity](http://www.spaceclimateobservatory.org/fr/thermocity))



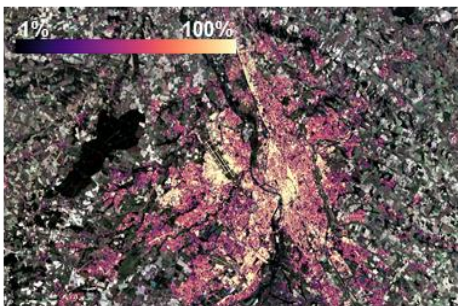
Toulouse, Sentinel-2  
06/2020



Température de surface : été nuit  
ECOSTRESS, 15/07/2019, 21h55



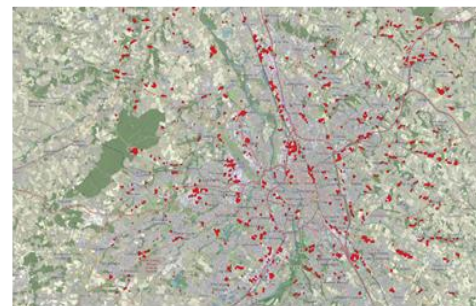
Température de surface : hiver jour  
ASTER, 14/01/2003, 10h54



Taux d'imperméabilisation



Température de surface moyenne  
par quartier, 15/07/2019, 21h55

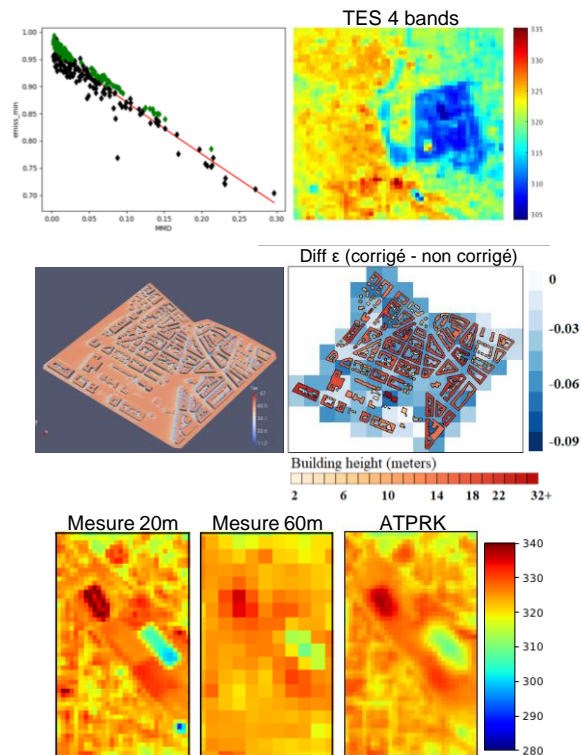


Anomalies thermiques hautes  
ASTER, 14/01/2003, 10h54

# Estimation de la LST en milieu urbain

## Travaux récents

- Evaluation des méthodes d'estimation en milieu urbain dans le cadre des futures missions (Aurelie Michel, ONERA)
  - ➔ RMSE : 2K (jour) et <1K (nuit) + 1% pour l'émissivité
- Etude de l'impact de la structure 3D de la surface sur l'estimation de la LST (Roupioz, ICube/ONERA)
  - ➔ Sans correction, surestimation de la LST jusqu'à 4K
- Démélange en LST : évaluation de plusieurs méthodes pour la future mission TRISHNA (Granero-Belinchon, ONERA)
  - ➔ RMSE : 2K pour une désagrégation de 60m à 20m



# Application : Propriétés thermiques des matériaux urbains

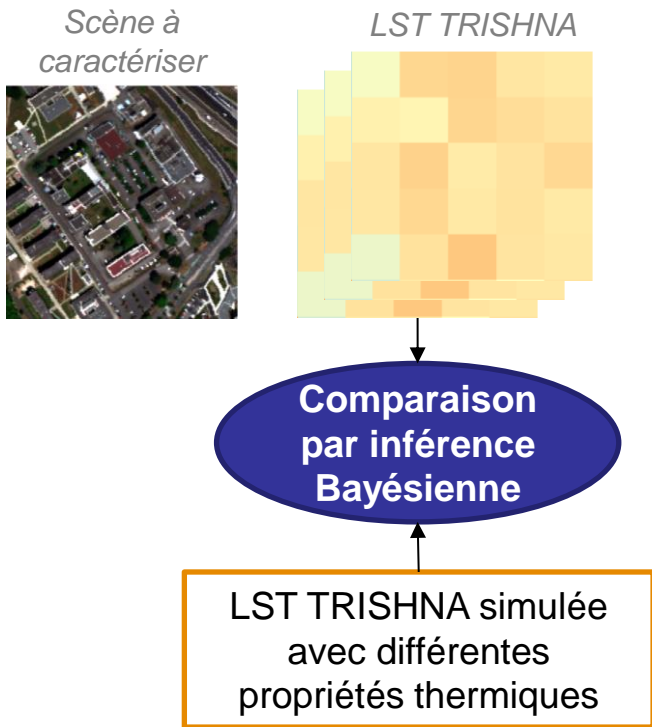
Projet ANR DIAMS, ANR-21-CE22-0010

Approximation des propriétés thermiques des surfaces urbaines dans les modèles microclimatiques

➔ Erreurs non négligeables sur les estimations de températures d'air et le confort

**Déterminer les propriétés thermiques urbaines en combinant modélisation du microclimat urbain et données IRT TRISHNA à 60 m**

➔ Modélisation thermo-radiative 3D (SOLENE-DART) pour générer un ensemble de données satellites IRT avec différentes propriétés thermiques de surface et évaluer plusieurs scénarios

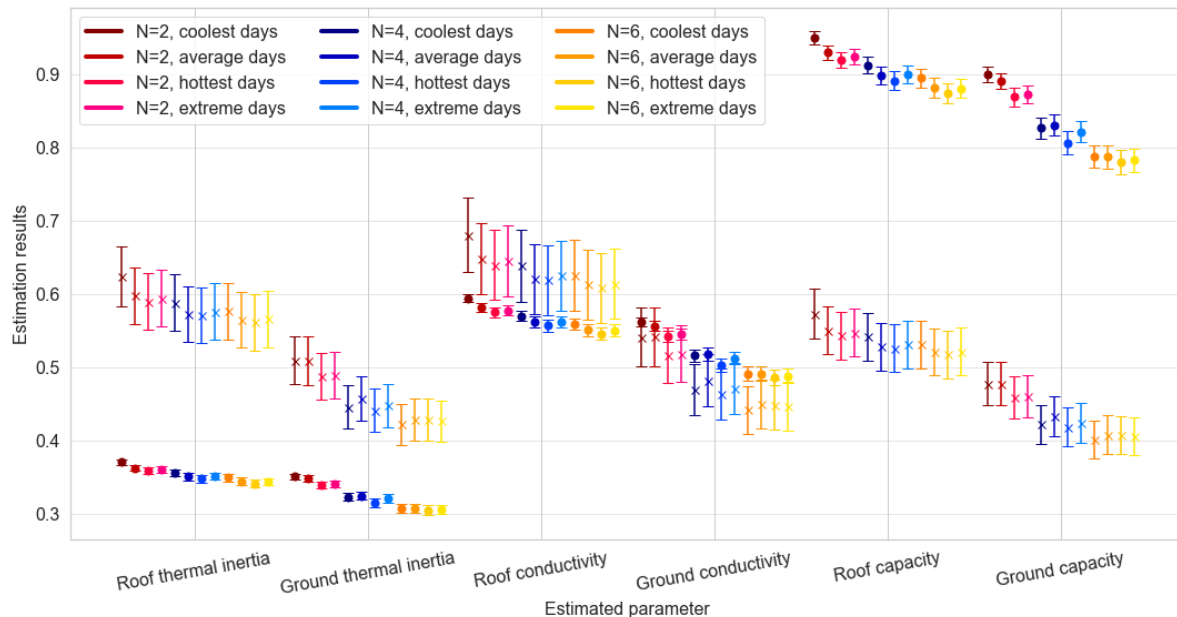




# Application : Propriétés thermiques des matériaux urbains

Projet ANR DIAMS, ANR-21-CE22-0010

Relative error (crosses) and relative standard deviation (dots) for several number of data N, for roof and ground thermal properties, for different selections of days



Validation sur un canyon urbain simple

## Meilleures estimations :

- Avec un grand nombre d'images satellites IRT
- Avec des images diurnes acquises lors des journées les plus chaudes
- Pour les surfaces couvrant une grande partie du pixel

# Application : Propriétés thermiques des matériaux urbains

Projet ANR DIAMS, ANR-21-CE22-0010

➔ Les données satellites IRT à 60 m permettent l'estimation précise des propriétés thermiques des surfaces urbaines horizontales à fine échelle pour une configuration urbaine simple

- Surfaces horizontales : précision jusqu'à trois fois supérieure à celle d'une estimation aléatoire
- Surfaces verticales : précision équivalente à celle d'une estimation aléatoire

Poursuite des travaux nécessaires pour étendre l'approche à une plus grande variété de bâtiments et de configurations urbaines

*T. Keravec-Balbot, A. Rodler, L. Roupioz, M. Musy, T. Gresse, X. Briottet (2025). Identification of urban thermal properties by combining urban microclimate modeling and thermal infrared satellite data, Sustainable Cities and Society (118), 105995*

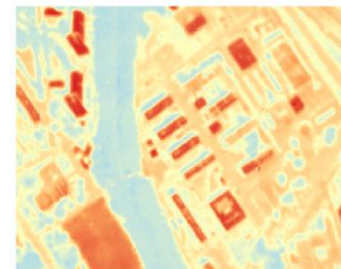
# Données IRT pour l'étude du milieu urbain

## En résumé

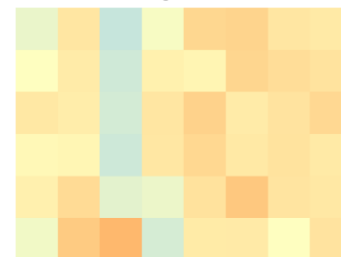
- Importance de l'émissivité
  - ➔ Se renseigner sur la donnée et avoir un regard critique
- Incertitude de la mesure
  - ➔ Quelle donnée et que représente-t-elle ?
- Echelle du phénomène étudié
  - ➔ Quelle donnée et que représente-t-elle ?
- Température de surface  $\neq$  Température de l'air



RGB 1m



LST 2m

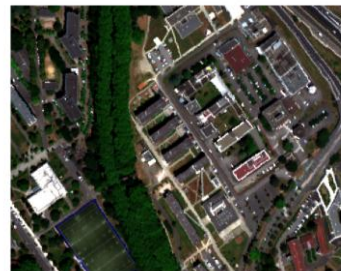


LST 60m

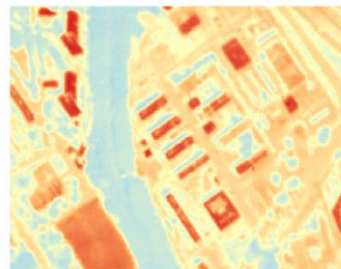
# Données IRT pour l'étude du milieu urbain

## Données IRT satellitaires pour le diagnostic de la surchauffe urbaine

- Estimation de variables difficilement accessibles sur le terrain
  - ➔ Emissivité (si multi-bandes), propriétés thermiques
- Vulnérabilité du territoire, identification des «parcours fraîcheurs»
  - ➔ Variations spatiales de la température de surface
  - ➔ Calcul de l'ICU de surface et d'indice de confort/vulnérabilité
- Planification, stratégie et conception de futurs projets urbains
  - ➔ Suivi de l'évolution temporelle de la température de surface
  - ➔ Etude de l'impact d'un aménagement urbain



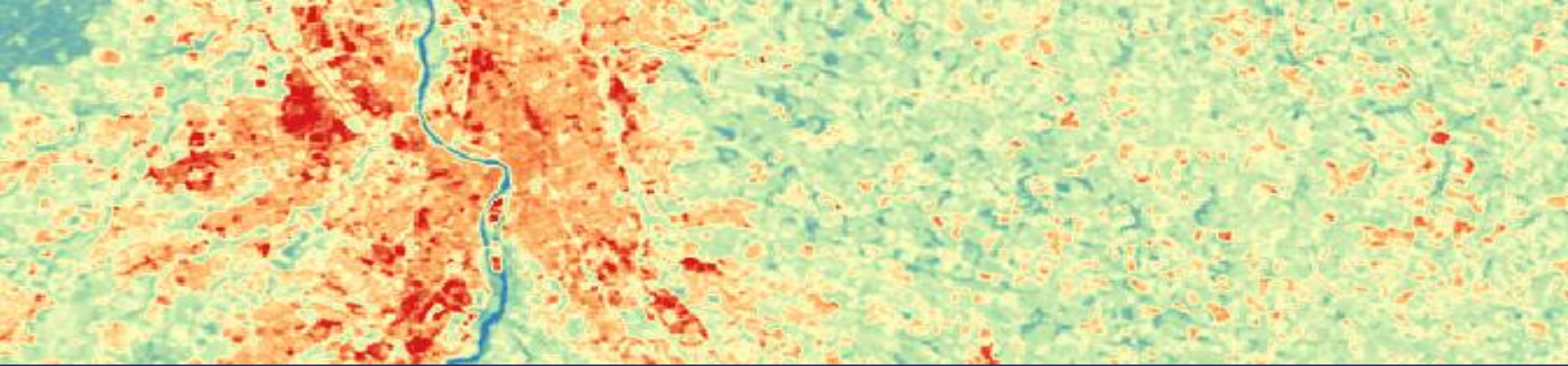
RGB 1m



LST 2m



LST 60m



# Utilisation des données de télédétection infrarouge thermique pour l'étude du microclimat urbain à différentes échelles : Potentiel, limites et applications

Roupioz Laure, ONERA  
SIMUREX - 2026