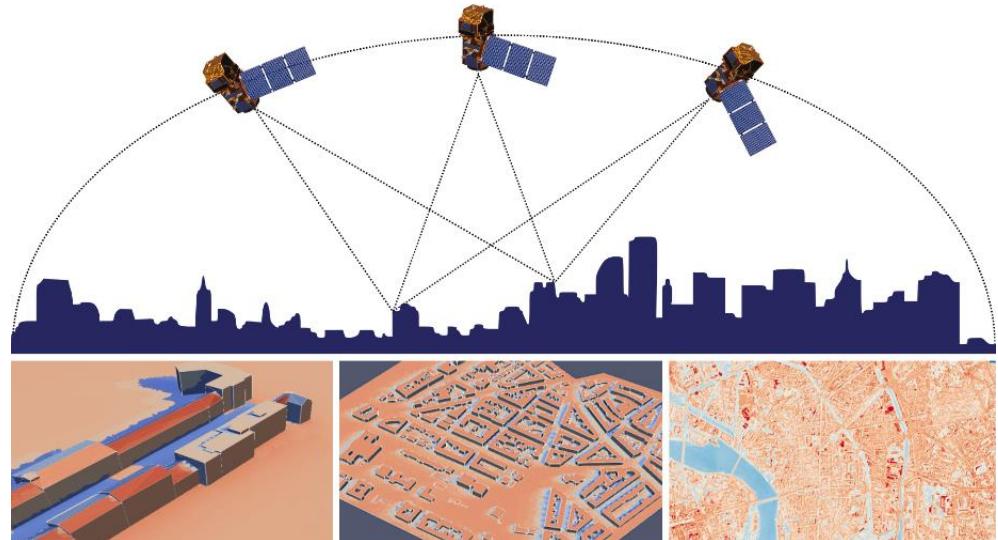


Télédétection IRT spatiale : application au milieu urbain

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 ≠ 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

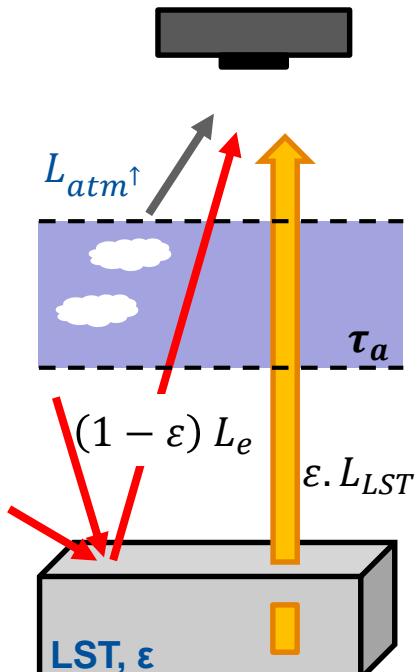
Mesure du rayonnement émis par un objet (flux radiatif en W/m²/μm/sr) afin de dériver sa température de surface (LST)

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

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

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



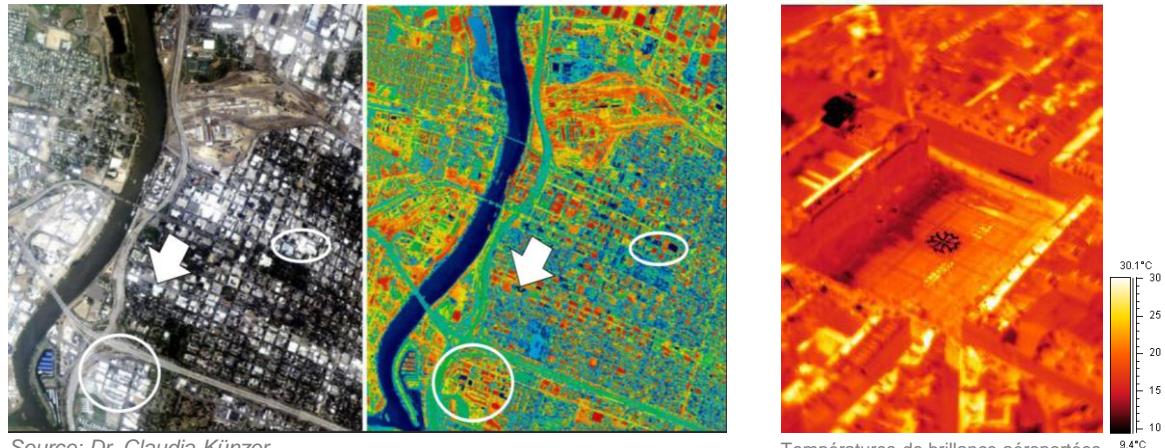
Principes de la mesure par télédétection

Importance de l'émissivité

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

Matériaux	Emissivité moyenne (8-14 µm)
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



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

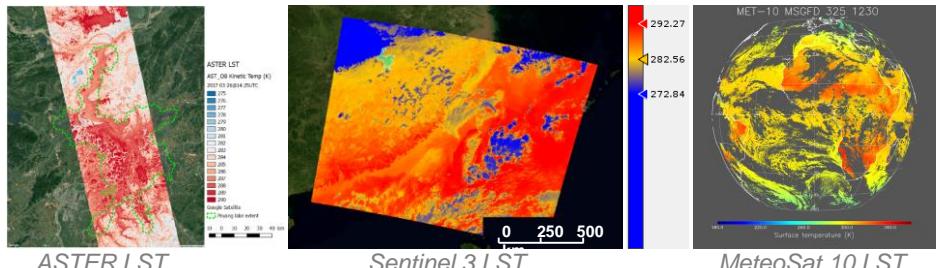
- ➔ Différents produits de LST et LSE disponibles
- ➔ Précision ~1K sur les surfaces naturelles

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 µm)	5	2	8	2	7	4	5	5
Date de lancement	1999	2021	1999	2016	2022	2025	2027	2028

+ ECOSTRESS (ISS)

+ Constellations (new space)

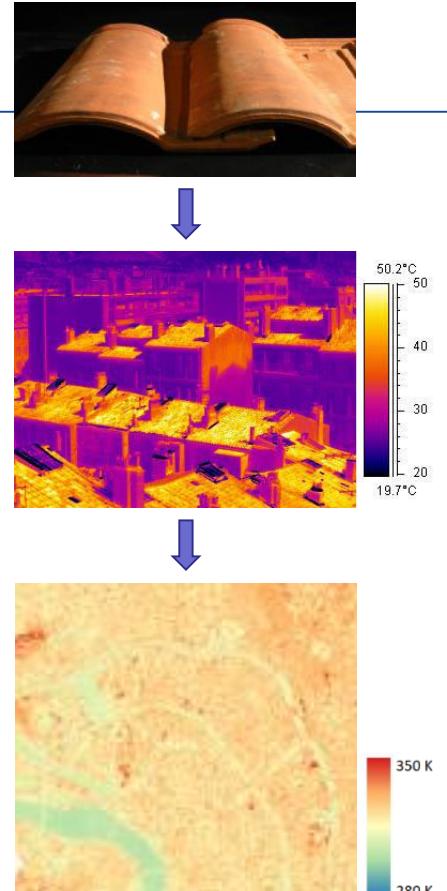


- ➔ Actuel : Compromis spatio-temporel
- ➔ A venir : meilleures résolutions spatiale et temporelle + complémentarité entre missions

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 (α , ϵ , ...) selon l'échelle : matériau élémentaire ➔ bâtiment ➔ quartier

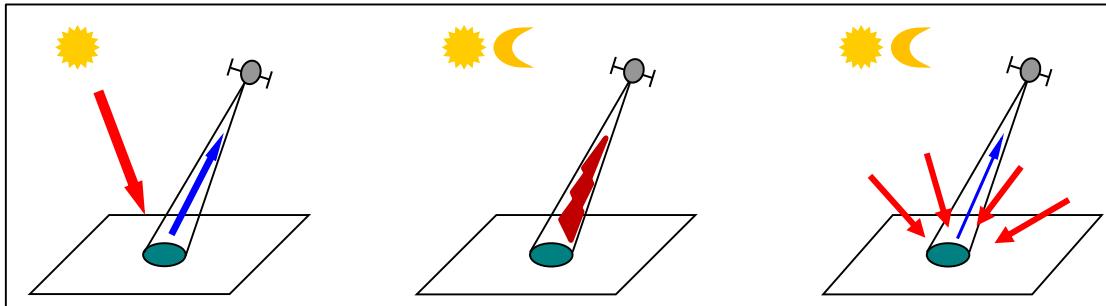
Exemple de l'émissivité : $\epsilon_{\text{matériau}} \neq \epsilon_{\text{canopée urbaine}}$ (effet cavité)

Transfert radiatif [8-14 µm]

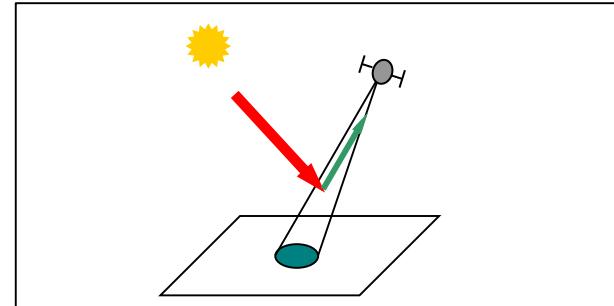
Modélisation du transfert radiatif 3D dans une scène urbaine

- 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

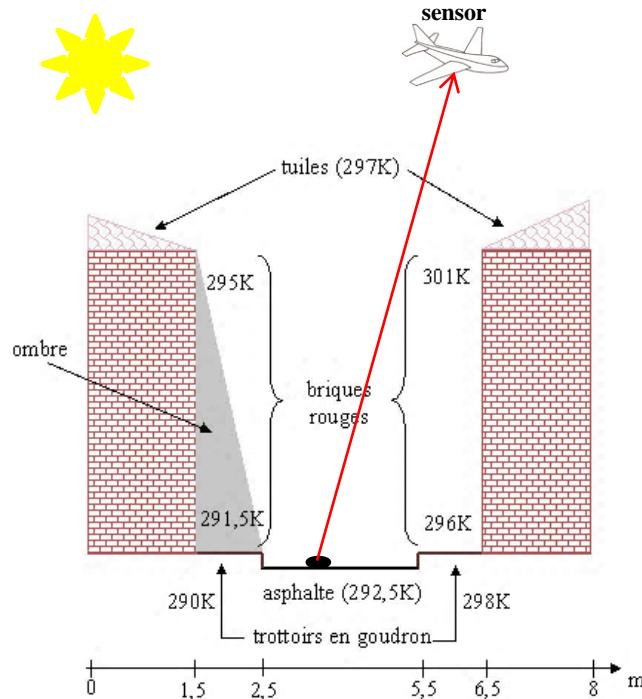
Luminance provenant de la cible



Luminance ne provenant pas de la cible

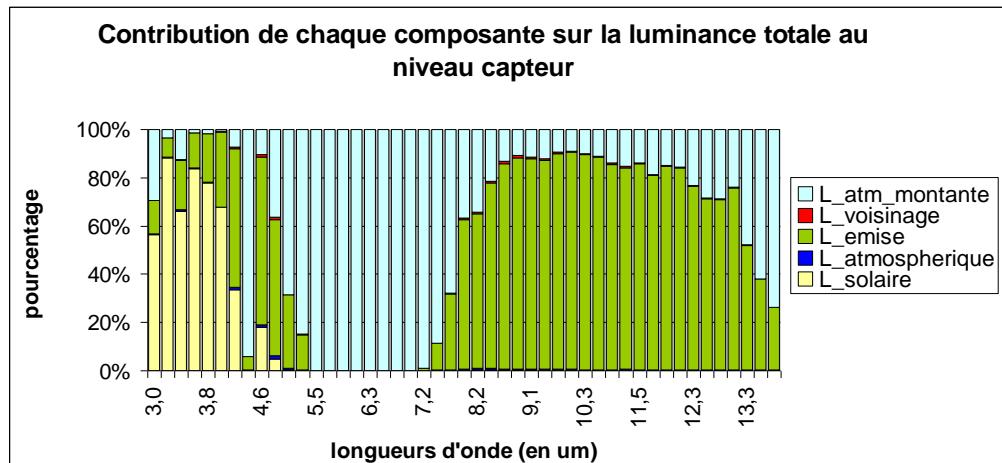


Transfert radiatif [8-14 µm]



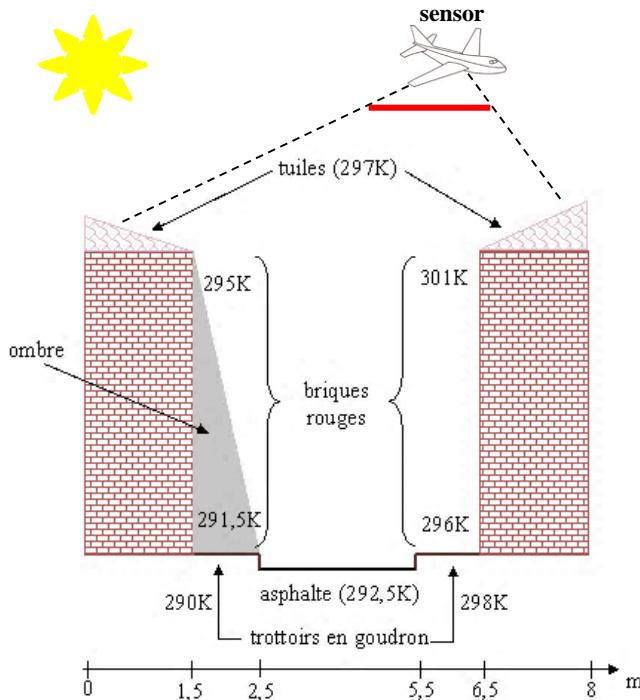
Analyse radiative à l'échelle du canyon

➤ Décomposition au niveau capteur

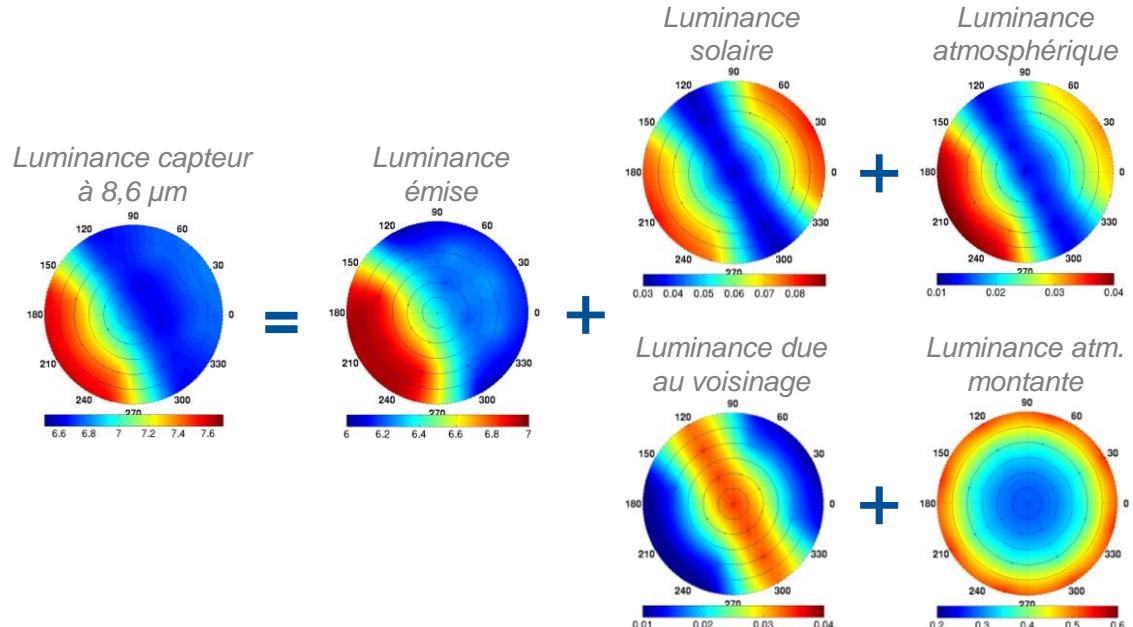


Fontanilles et al. 2008. TITAN : an Infrared Radiative Transfer Model for Heterogeneous 3D Surface - Application over Urban Areas, *Applied Optics*, 47(31)

Transfert radiatif [8-14 µm]



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

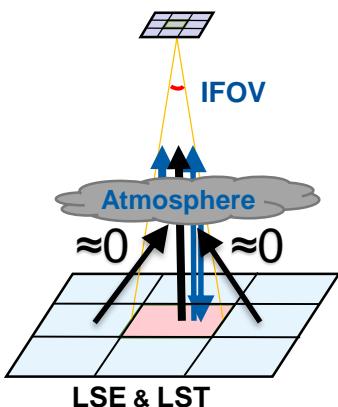


Fontanilles et al. 2008. TITAN : an Infrared Radiative Transfer Model for Heterogeneous 3D Surface - Application over Urban Areas, *Applied Optics*, 47(31)

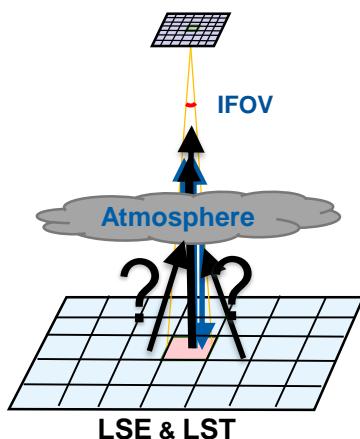
Transfert radiatif [8-14 µm]

Analyse radiative à l'échelle du satellite

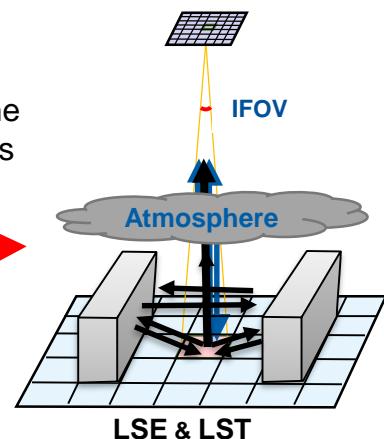
Résolution spatiale **basse**
(GSD > 100 m)



Résolution spatiale **haute**
(GSD < 100 m)



Certains effets radiatifs ne peuvent pas être négligés
• Effet d'adjacence
• Structure 3D



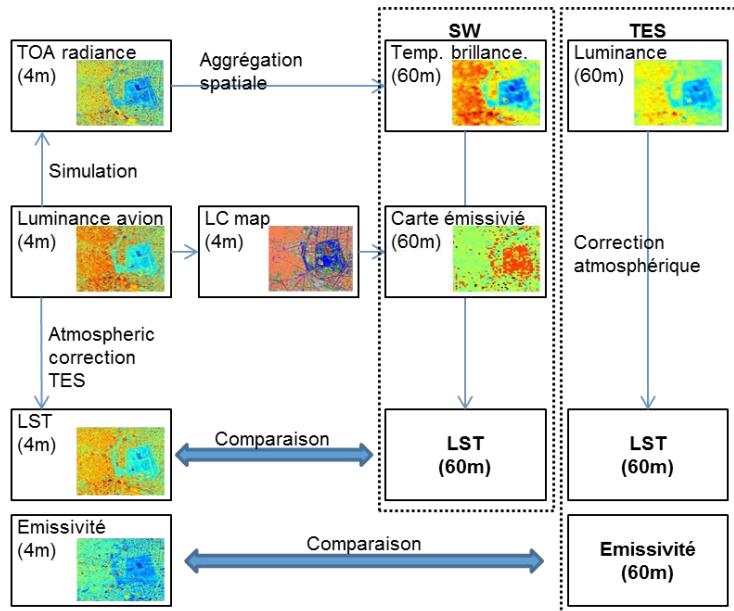
→ Erreur jusqu'à 4 K avec la méthode SW ou TES en utilisant une hypothèse sol plat

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

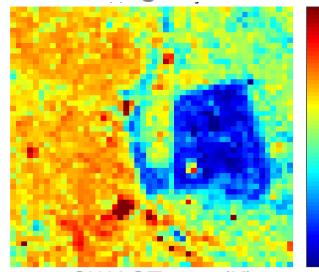
Images satellites TRISHNA simulées à partir de données aéroportées IRT



SW

RMSE day LST < 2K

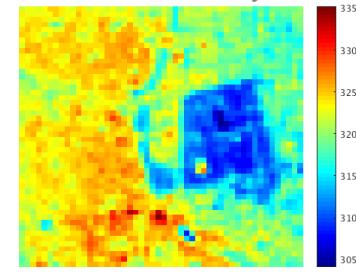
RMSE night LST < 0.7K



TES (4 bandes)

RMSE LST < 1K

RMSE emissivité < 1%



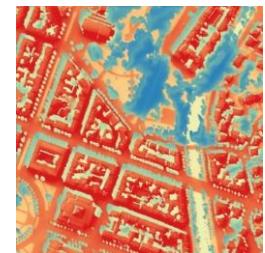
Limites

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

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)
- Maîtrise des incertitudes



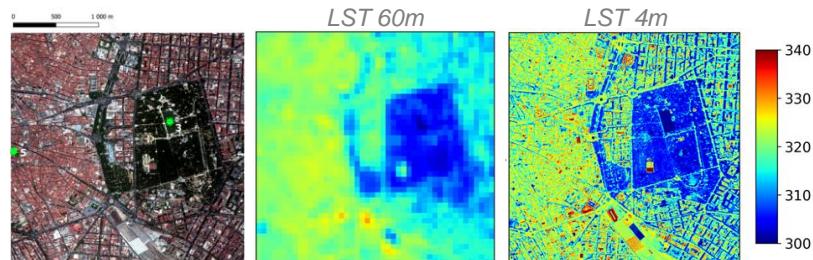
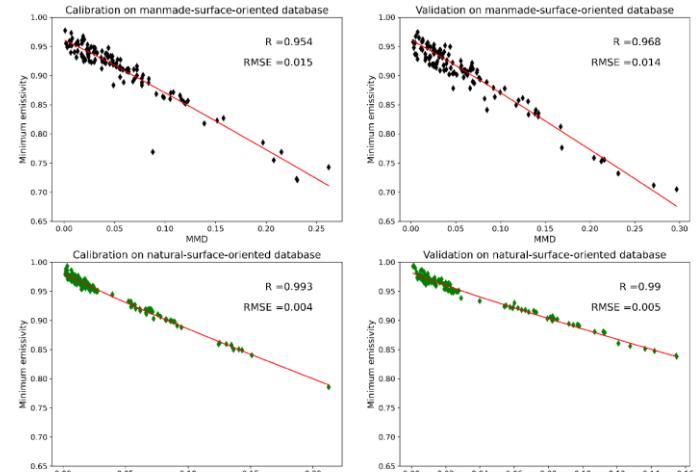
Algorithme TES adapté au milieu urbain

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



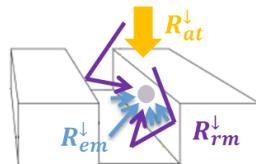
Michel et al. 2021. A New Material-Oriented TES for Land Surface Temperature and SUHI Retrieval in Urban Areas. *Remote Sensing*, 13 (24)

Impact de la structure 3D

Emissivité effective intégrant l'impact de la structure 3D

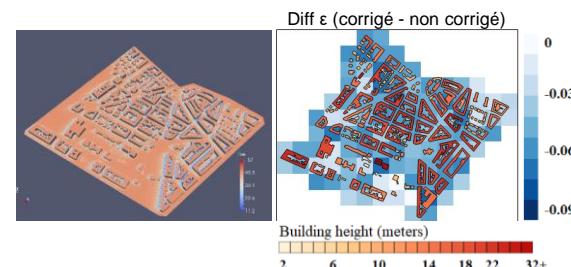
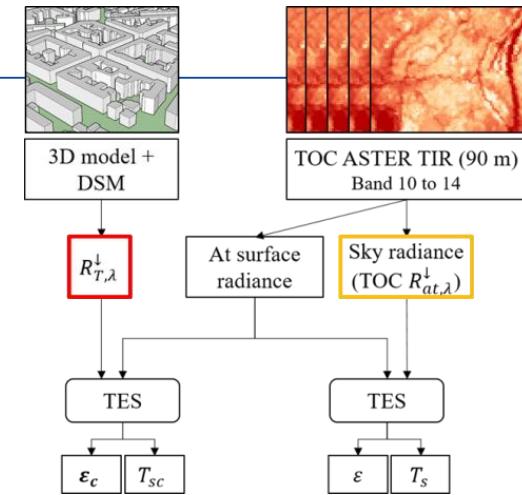
- Estimation du rayonnement incident en prenant en compte toutes les contributions
- MNS + modèle radiatif 3D
- Correction de l'impact du 3D dans TES

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



Tests sur des données ASTER (90 m)

- R_T^\downarrow : différence jusqu'à 68 W.m⁻² (~25%) → $\Delta\epsilon \approx 0.05$; $\Delta LST \approx 4 K$
 - 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



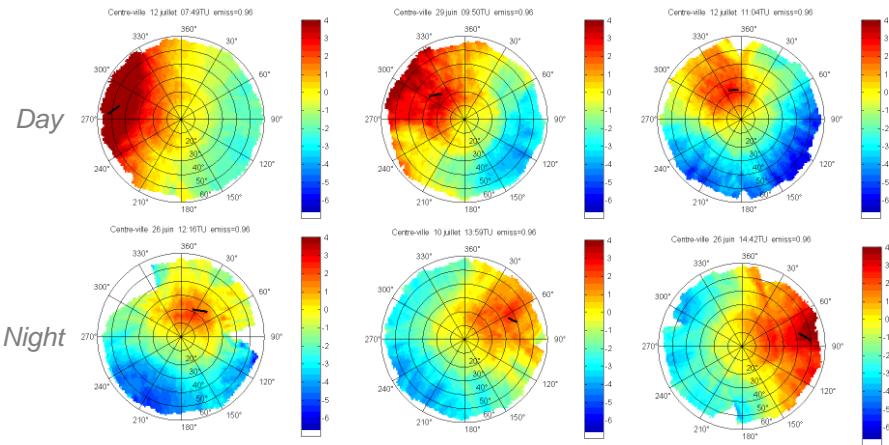
Roupiot et al. 2018. Correction for the impact of the surface characteristics on the estimation of the effective emissivity at fine resolution in urban areas, *Rem. Sens.*, 10 (5).

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)



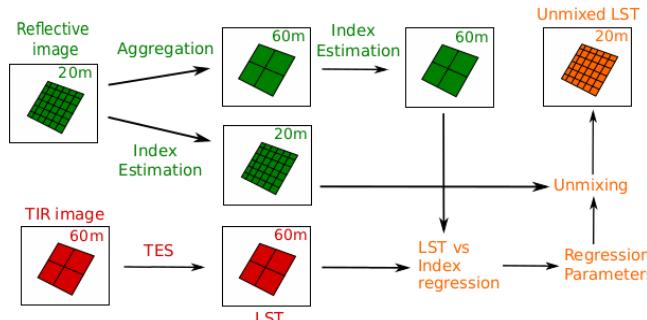
→ Modélisation et analyse des effets directionnels à la résolution TRISHNA (en cours)

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

Désagrégation

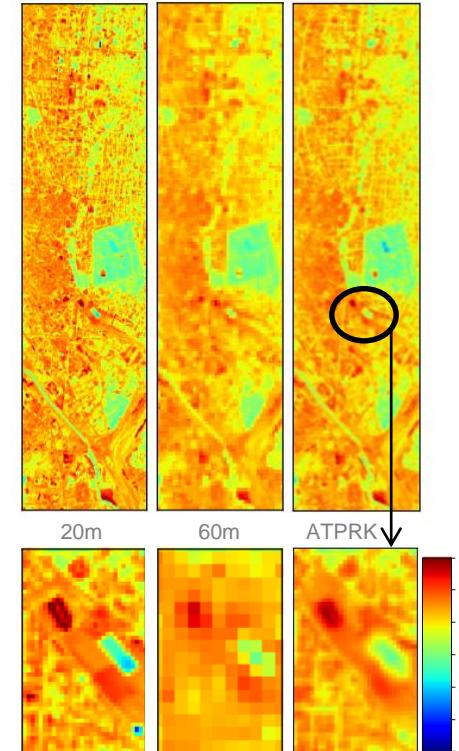
Démélange en LST

- 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).

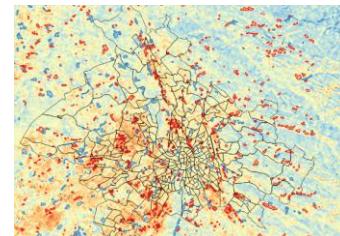
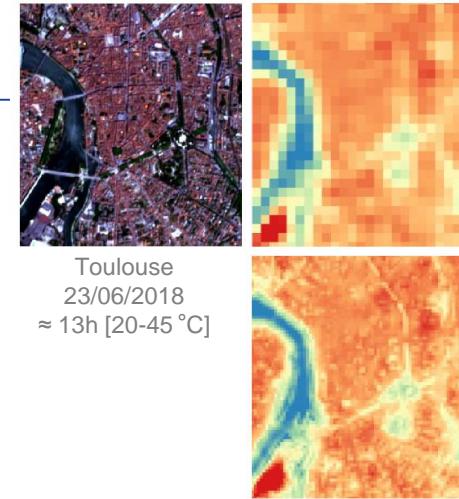
Applications de méthodes développées

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**



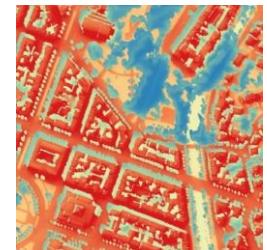
Détection points
chauds/froids +
interprétation

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

Etude du climat urbain

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

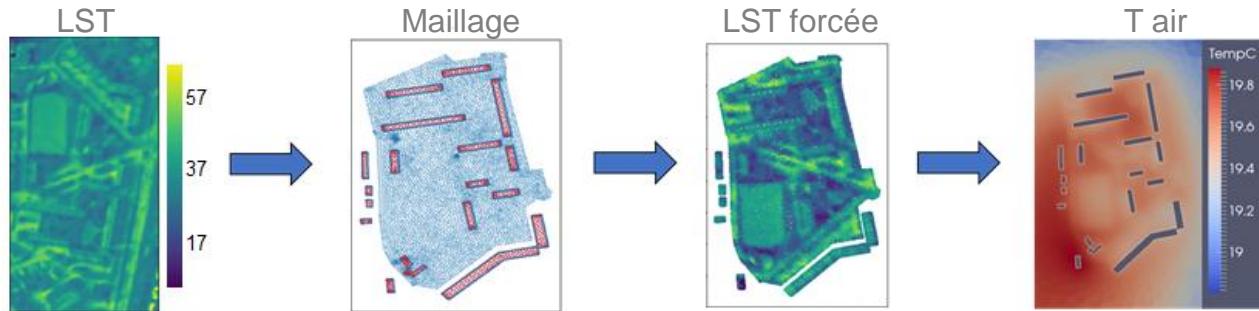
- Aller plus loin que la LST et l'indice ICUS
- Explorer les liens entre température de l'air/indice de confort et mesure de télédétection à fine échelle en milieu urbain
- Travaux dans le cadre des futures missions IRT satellitaires



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



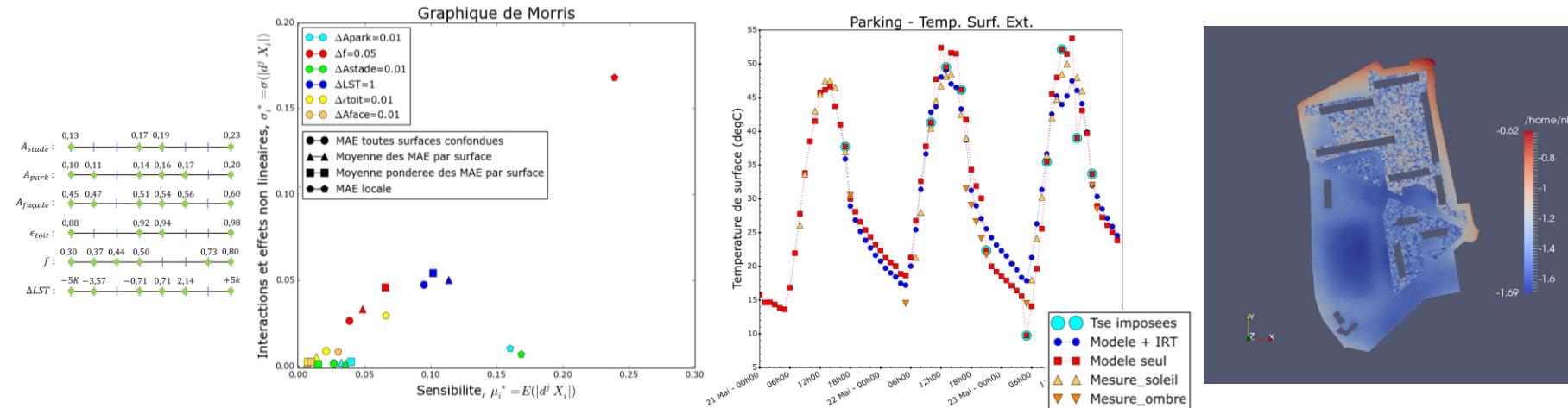
- **Méthode** : génération de LST TRISHNA (nadir) et assimilation dans l'outil microclimatique SOLENE-microclimat
- **Etude de cas** : quartier du Pin Sec (Nantes), Campagne expérimentale FluxSAP2010 → Températures de surface et émissivité mesurées au sol, Images aéroportées TIR

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)



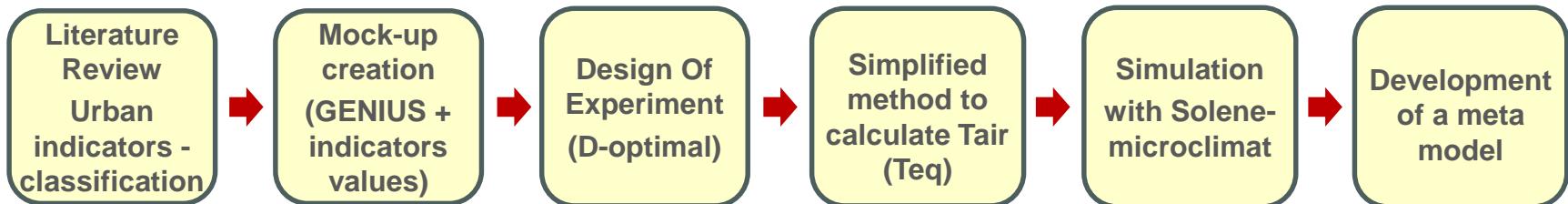
- Limites : façades non visibles, écarts entre mesures au sol et IRT, données tri-horaires, modèle seul déjà bien paramétré

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

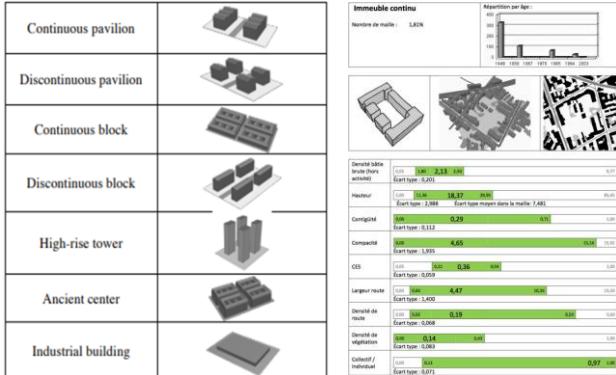
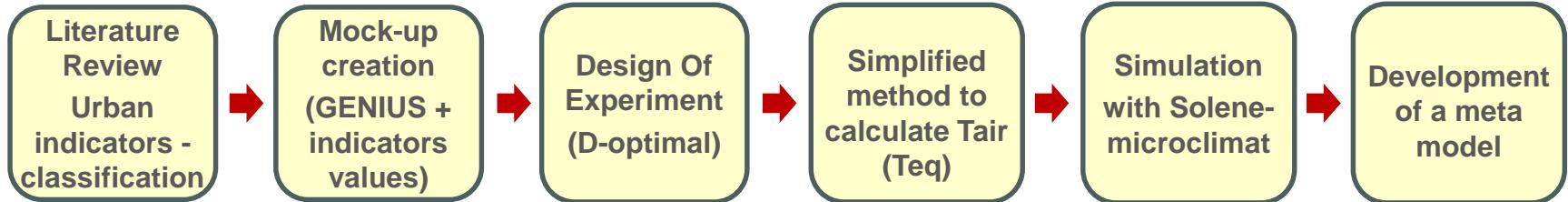
CNES DIRT: Influence of urban form and thermal radiative properties on urban air temperature – Stage D. Yao

- **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

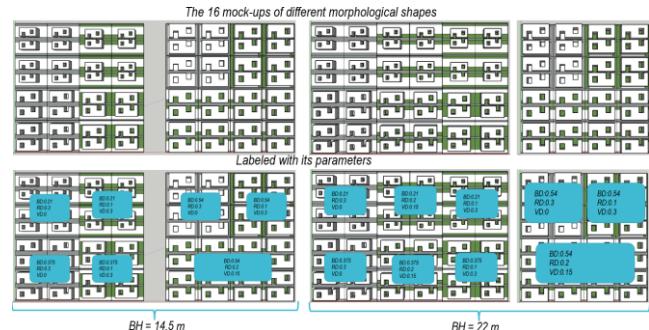
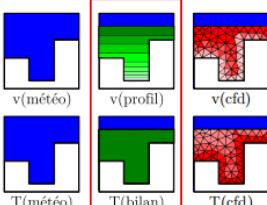


Etude du climat urbain

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



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



Regression Equation

$$Teq = -0.223 \cdot BD - 18.39 \cdot RD - 9.263 \cdot VD - 0.062 \cdot AW + 1.715 \cdot AR + 1.402 \cdot AS + 0.0983 \cdot BH + 1.2223 \cdot Tmeteo + 1.638 \cdot BD \cdot BD + 4.46 \cdot RD \cdot RD + 0.707 \cdot AW \cdot AW + 0.154 \cdot AR \cdot AR - 0.388 \cdot AS \cdot AS - 0.001890 \cdot Tmeteo \cdot Tmeteo + 0.504 \cdot BD \cdot RD - 0.287 \cdot BD \cdot AW + 0.212 \cdot BD \cdot AR + 0.271 \cdot BD \cdot AS - 0.0894 \cdot BD \cdot BH + 0.02451 \cdot BD \cdot Tmeteo + 0.257 \cdot RD \cdot AW - 1.115 \cdot RD \cdot AR - 1.255 \cdot RD \cdot AS + 0.0878 \cdot RD \cdot BH + 0.0698 \cdot RD \cdot Tmeteo - 0.198 \cdot AW \cdot AR - 0.576 \cdot AW \cdot AS + 0.02940 \cdot AW \cdot BH + 0.03687 \cdot AW \cdot Tmeteo + 0.202 \cdot AR \cdot AS - 0.03275 \cdot AR \cdot BH - 0.04667 \cdot AR \cdot Tmeteo - 0.04045 \cdot AS \cdot BH - 0.00480 \cdot AS \cdot Tmeteo - 0.003274 \cdot BH \cdot Tmeteo$$

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-microclimate

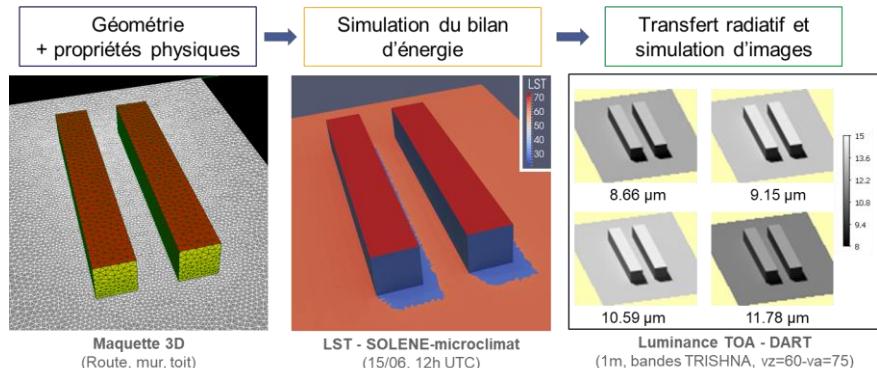
Bilan d'énergie 3D complet → LST à l'échelle métrique + températures de l'air

... 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

Télédétection IRT spatiale : application au milieu urbain

Laure Roupioz, Xavier Briottet
ONERA, Toulouse

Auline Rodler
CEREMA, Nantes

