

# Apport de la télédétection dans la modélisation numérique du microclimat urbain à l'échelle du quartier

Baptiste BOUYER<sup>1,2</sup>, Auline RODLER<sup>1,2\*</sup>, Laure ROUPIOZ<sup>3</sup>, Sihem GUERNOUTI<sup>1,2</sup>, Marjorie MUSY<sup>1,2</sup>, Xavier BRIOTTET<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Équipe de recherche BPE, CEREMA, 9 Rue René Viviani, Nantes, France

<sup>2</sup>LOCIE UMR CNRS 5271, Université Savoie Mont Blanc, Chambéry, France

<sup>3</sup>ONERA – DOTA, 2 avenue Edouard Belin, Toulouse CEDEX 4, France

\*(auteur correspondant : auline.rodler@cerema.fr)

**Résumé** - Le projet DIRT (District Infrared theRmography for microclimaTe) s'inscrit dans les travaux du groupe TRISHNA urbain et a pour objectif d'évaluer l'apport des futures données infrarouges thermiques (IRT) mesurées par le satellite TRISHNA pour la cartographie de la température de l'air et d'indices de confort thermique en zone urbaine en s'appuyant sur des simulations numériques du modèle Solene-Microclimat. Nous présentons ici l'étude de l'influence de la résolution temporelle des données IRT sur les températures de surface simulées, les températures simulées sont notamment confrontées aux mesures de températures in situ.

## Nomenclature

$C$	Capacité thermique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>
$dt$	pas de temps, s	$\varphi$ Densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$
$h_c$	coeff. d'échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>
$h_r$	coeff. d'échange radiatif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	CLO courtes longueurs d'onde
$R$	Résistance thermique, $K.m^2.W^{-1}$	GLO grandes longueurs d'onde
$T$	température, K	

## 1. Introduction

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain désigne les zones urbaines où les températures d'air sont supérieures à celles des zones rurales environnantes. Ce phénomène, qui tend à s'intensifier avec le réchauffement climatique et lors d'évènements ponctuels tels que les vagues de chaleur, a des conséquences délétères sur le confort et la santé des populations urbaines. Au sein d'une ville, tous les quartiers ne sont pas égaux face à ce phénomène principalement en raison de l'hétérogénéité des activités, des infrastructures, de la proximité de végétation ou d'étendues d'eau, etc. Afin d'apporter une réponse adaptée à cette problématique, il est essentiel d'identifier les quartiers les plus touchés. Pour quantifier l'intensité des îlots de chaleur, deux indices sont généralement utilisés : l'indice UHI (Urban Heat Island) qui désigne la différence de température de l'air entre la ville et son environnement rural et l'indice SUHI (Surface Urban Heat Island) défini comme la différence de température de surface de la ville et de la zone rurale. La réalisation de cartographies détaillées de la température de l'air en milieux urbains pour l'évaluation de l'UHI par des mesures locales est très limitée. En revanche, en raison de la disponibilité et de la couverture des données, la télédétection dans le domaine de l'infrarouge thermique permet de déterminer la température des surfaces de la ville et donc de calculer l'indice SUHI aux heures de passage des satellites. Si on observe des comportements semblables de nuit, les deux indices diffèrent aux cours de la journée notamment en raison des formes urbaines [1]. Néanmoins, la pleine compréhension des relations entre les deux indices

n'est pas encore atteinte. Une piste prometteuse de poursuite de ces travaux est le couplage de la télédétection à la modélisation numérique du microclimat urbain.

L'un des objectifs de la mission franco-indienne TRISHNA, dont le lancement du satellite éponyme est prévu en 2025 [2], concerne la préparation de produits adaptés à l'étude des villes. Le projet DIRT (District Infrared theRmography for microclimaTe) s'inscrit dans les travaux du groupe TRISHNA urbain et a pour objectif d'évaluer l'apport des futures données infrarouges thermiques (IRT) mesurées par le satellite TRISHNA pour la cartographie de la température de l'air et d'indices de confort thermique en zone urbaine en s'appuyant sur des simulations numériques du modèle Solene-Microclimat [3]. Nous présentons ici l'étude de l'influence de la résolution temporelle des données IRT sur les températures de surface simulées, les températures simulées sont notamment confrontées aux mesures de températures in situ des sols et toits de la campagne de mesure FluxSAP2010[4].

## 2. Méthodologie

Ces travaux s'appuient sur la modélisation numérique du microclimat du quartier du Pin Sec à Nantes du 21 au 23 Mai 2010, dates correspondant à la campagne de mesure FluxSAP 2010. En attendant le lancement du satellite TRISHNA, les données de télédétection utilisées sont les images infrarouges aéroportées acquises lors de la campagne de mesures. Les températures de surfaces déterminées à partir des images infrarouges sont imposées dans lors de la résolution des bilans thermo-radiatifs.

### 2.1. Présentation du quartier modélisé

Le quartier du Pin Sec a été modélisé et placé au centre d'une veine numérique de 600 mètres de côté et 200 mètres de hauteur pour le calcul aéraulique réalisé par Code\_Saturne. Le modèle illustré sur la Figure 1 est constitué de 18 bâtiments, et de différents types de sol. Les positions des mesures de températures de surface réalisées pendant la campagne FluxSAP sont également reportées sur la Figure 1.

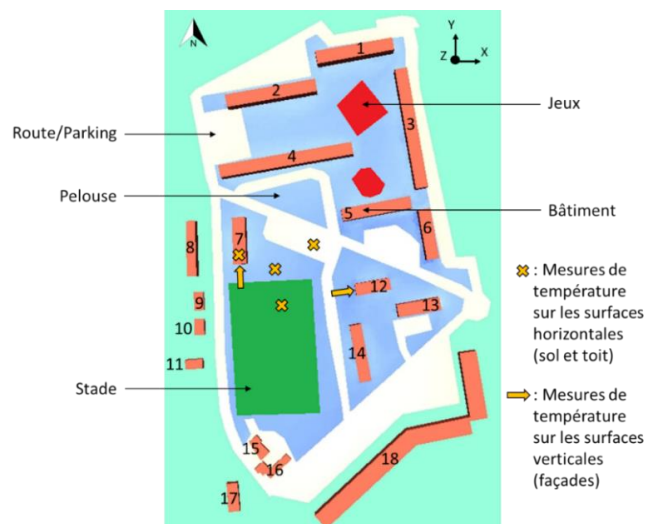


Figure 1 : *Modèle du quartier du Pin Sec : en blanc : route et parking, en bleu : pelouse, en vert : stade, en rouge : aire de jeux, en orange : bâtiments.*

Les différentes surfaces rencontrées dans le modèle (stade, pelouse, façade, etc.) constituent des familles réparties dans trois classes selon le type de surface, sol, sol végétal et bâtiment. La

composition de chaque famille et leurs propriétés radiatives, émissivité et albédo (les matériaux utilisés sont opaques dans les courtes et grandes longueurs d'onde), sont présentées dans le Tableau 1 tandis que les propriétés thermiques des matériaux utilisés sont présentées dans le Tableau 2.

Famille	Classe	Albédo	Emissivité	Composition (dans l'ordre à partir de la surface extérieure)
<i>Pelouse</i>	Sol veg.	0,22	0,95	Feuillage* (12cm) + Terre (10cm)
<i>Parking/route</i>	Sol	0,20	0,97	Asphalte (5cm) + Gravier (20cm)
<i>Stade</i>	Sol	0,23	0,97	Asphalte (5cm) + Gravier (20cm)
<i>Jeux</i>	Sol	0,46	0,86	Sable (20cm)
<i>Façade</i>	Bâtiment	0,40	0,90	Mortier de chaux (2cm) + Béton (19cm) + Laine de roche (35cm)
<i>Toit</i>	Bâtiment	0,20	0,93	Gravier (3cm) + Béton (25cm) + Laine de roche (35cm)

*Feuillage\** : calcul du flux latent : LAI= 2,8 ; coeff. d'extinction  $k_s = 0,8$  ; coeff. d'évapotranspiration  $f = 0,7$

Tableau 1 : Classe, albédo, émissivité et composition des familles constituant le modèle numérique

Matériau	Conductivité thermique [W/(m.K)]	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacité thermique [J/(kg.K)]
<i>Terre</i>	0,7	1600	900
<i>Asphalte</i>	0,75	2100	950
<i>Gravier</i>	2,0	1950	1045
<i>Sable</i>	0,2	2000	720
<i>Mortier de chaux</i>	0,87	2150	1000
<i>Béton</i>	1,65	2150	1000
<i>Laine de roche</i>	0,04	30	1000

Tableau 2 : Propriétés thermiques des matériaux utilisés dans le modèle numérique

Les surfaces de la scène urbaine (géométrie) sont maillées avec un maillage triangulaire d'une longueur caractéristique de 4 mètres tandis que les faces de la veine numérique (boite englobant la géométrie étudiée comprenant les mailles et faces sur lesquelles les conditions aux limites sont imposées) sont maillées avec un maillage triangulaire d'une longueur caractéristique de 50 mètres. Le maillage volumique de l'air est tétraédrique et continu avec le maillage surfacique. Le maillage est ainsi constitué de 21 386 éléments de surface triangulaires et de 168 677 éléments de volume tétraédriques.

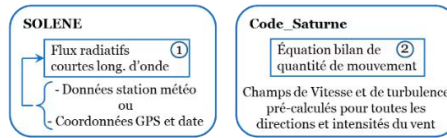
## 2.2. Présentation de SOLENE-Microclimat et hypothèses de calcul

Le microclimat à l'échelle du quartier est simulé avec le modèle SOLENE-Microclimat [3] Ce modèle repose sur le couplage de SOLENE qui assure le bilan thermo-radiatif et de Code\_Saturne qui résout la mécanique des fluides.

L'algorithme de SOLENE-Microclimat est schématisé sur la Figure 2. Au cours de la phase d'initialisation, SOLENE calcule le flux radiatif solaire courtes longueurs d'onde  $\varphi_{CLO\ net}$  à partir de données de station météo ou de la course du soleil connaissant les coordonnées GPS du quartier et la période simulée (étape 1) tandis que les équations de conservation de la quantité de mouvement, de continuité et de turbulence sont réalisées par le Code\_Saturne (étape 2). Lors du processus itératif (schéma implicite), Code\_Saturne (schéma k-eps standard) calcule les champs de vitesse, d'humidité et de température de l'air en utilisant comme données d'entrée les flux latent et convectif (ou sensible) calculés par SOLENE au pas de temps précédent (étape

3). Le coefficient d'échange convectif  $h_c$  est déterminé à partir de la corrélation de McAdams [5] pour les sols et celles de Montazeri [6] pour les façades et les toits des bâtiments. Ces résultats sont ensuite utilisés par SOLENE dans une seconde phase itérative pour calculer les flux radiatifs grandes longueurs d'onde  $\varphi_{GLO\ net}$  (étape 4) et pour résoudre le bilan thermo-radiatif de chaque facette du modèle (étape 5).

- Calculs préliminaires :



- Phase itérative :

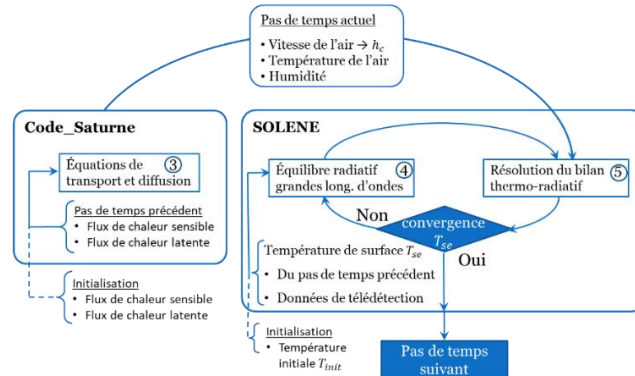


Figure 2 : Schéma de l'algorithme de Solene-Microclimat

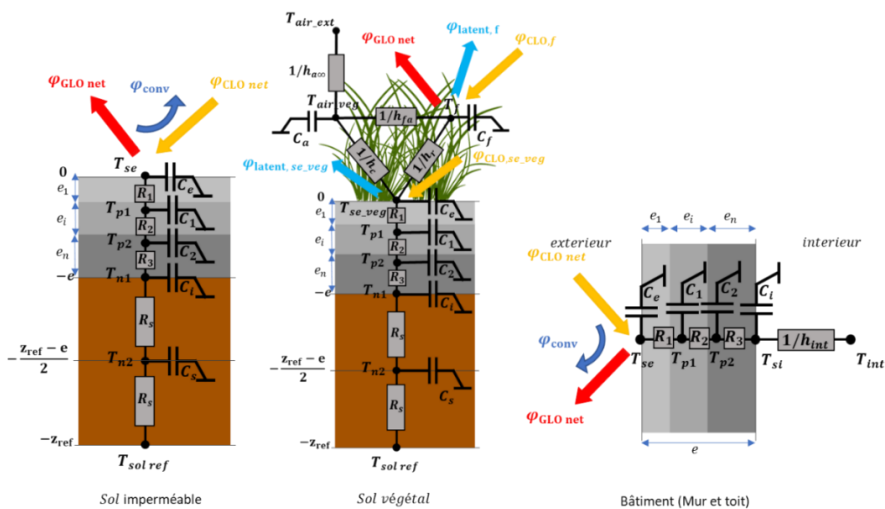


Figure 3 : Modèles du bilan thermo-radiatif selon les types de surfaces : dans les sols imperméables, dans les sols végétalisés et dans les bâtiments (murs et toits)

L'équilibre thermo-radiatif d'une facette est modélisé par l'analogie entre les grandeurs thermiques et électriques sous la forme d'une association de résistances et de capacités. Ce modèle est détaillé dans la thèse de Julien Bouyer [7]. Le modèle de paroi 1R2C utilisé par Bouyer a été remplacé par le modèle 3R4C de Fraisse et al.[8] pour une meilleure description de l'inertie thermique des parois. On distingue différents cas de figure selon le type de surface considéré : sol, sol végétal ou bâtiment (mur ou toit) comme illustré sur la Figure 3 correspondant à différentes conditions aux limites. À titre d'exemple, le bilan thermo-radiatif résolu à l'étape 5 est exprimé par le système d'équations (1) pour les sols imperméables.

Les flux radiatifs grandes longueurs d'onde  $\varphi_{GLO\ net}$  sont déterminés à partir des températures de surface obtenues à l'itération précédente et sont utilisés ensuite dans la résolution des bilans de chaleur (équations (1)). De nouvelles températures de surface sont obtenues et la boucle recommence jusqu'à ce que la convergence des températures de surface extérieures soit atteinte.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_{se}-T_{p1}}{R_1} + \frac{C_e dT_{se}}{dt} = \varphi_{CLO\ net} - \varphi_{GLO\ net} - h_c(T_{se} - T_{air}) \\ \frac{T_{p1}-T_{se}}{R_1} + \frac{T_{p1}-T_{p2}}{R_2} + \frac{C_1 dT_{p1}}{dt} = 0 \\ \frac{T_{p2}-T_{p1}}{R_2} + \frac{T_{p2}-T_{n1}}{R_3} + \frac{C_2 dT_{p2}}{dt} = 0 \\ \frac{T_{n1}-T_{p2}}{R_3} + \frac{T_{n1}-T_{n2}}{R_5} + \frac{C_i dT_{n1}}{dt} = 0 \\ \frac{T_{n2}-T_{n1}}{R_5} + \frac{T_{n2}-T_{solref}}{R_s} + \frac{C_s dT_{n2}}{dt} = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

### 2.3. Données de télédétection

Les données de télédétection utilisées sont les images infrarouges aéroportées acquises à la résolution de 0,5 mètres lors de la campagne de mesure FluxSAP 2010. Dix images ont été acquises entre le 21 Mai à 00h00 et le 23 Mai à 23h00. Les données brutes correspondent au rayonnement infrarouge mesuré par une caméra thermique au niveau de l'avion. La température de brillance mesurée au niveau de l'avion est convertie en température de brillance au sol par la méthode ELM [9] puis en température de surface à partir de l'émissivité de la surface considérée indiquée dans le Tableau 1. Les champs de températures obtenus sont placés sur l'axe chronologique de la simulation sur la Figure 4. Parfois, sur certaines mailles, nous n'avons aucune mesure car l'avion n'avait pas toujours une trajectoire identique. Dans ce cas sur ces mailles (en blanc sur la Figure 4), nous avons attribué les résultats du modèle (pas de forçage).

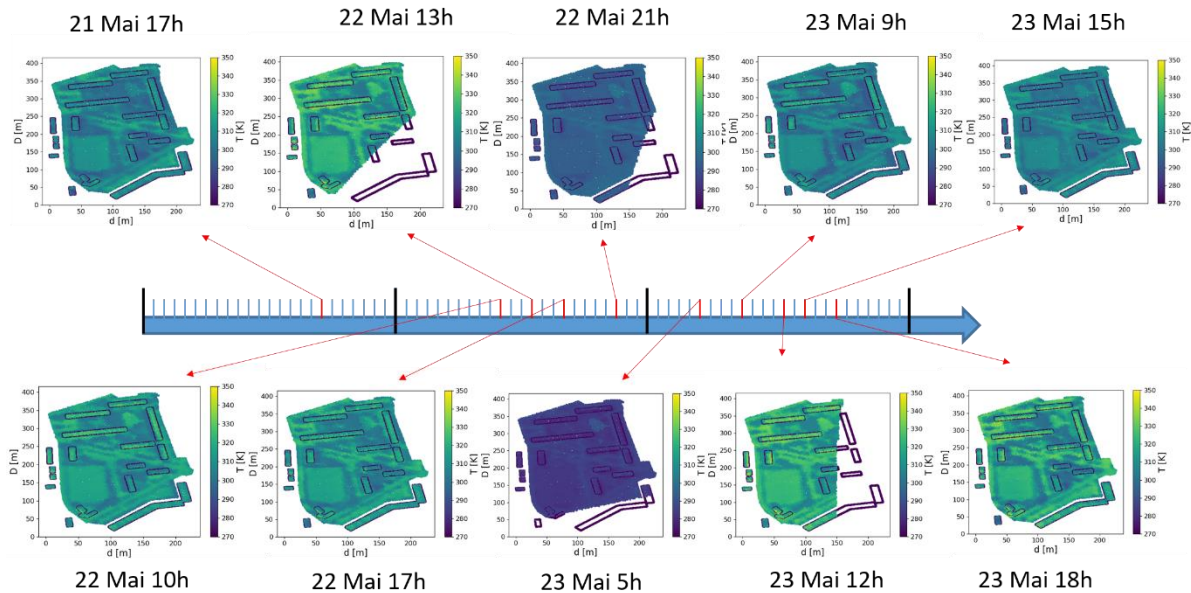


Figure 4 : Champs de températures de surfaces obtenus à partir des données de télédétection dans la chronologie de la simulation

Lorsque les températures de surface issues des images infrarouge sont disponibles au pas de temps  $[i]$ , le calcul est réalisé une première fois sans ces données. Les températures de surface obtenues sont utilisées pour compléter les données de télédétection notamment pour les surfaces verticales qui n'apparaissent pas sur les images infrarouges. Le calcul est réalisé une seconde

fois en utilisant ce champ de températures de surface extérieure comme condition aux limites quand disponible afin que les températures des nœuds en profondeur ( $T_{p1}, T_{p2}, T_{n1}$  et  $T_{n2}$ ) soient en accord avec les températures de surface imposées. Le bilan de chaleur résolu pour les sols imperméables à cette étape est exprimé par le système d'équations (2). La vitesse en entrée de la veine numérique varie entre 1.4 et 3.5 m/s pour une direction nord est. La température varie entre 13°C et 26°C et il s'agit de conditions de ciel clair, avec peu de rayonnement diffus.

$$\begin{cases} \frac{T_{p1} - T_{se}}{R_1} + \frac{T_{p1} - T_{p2}}{R_2} = 0 \\ \frac{T_{p2} - T_{p1}}{R_2} + \frac{T_{p2} - T_{n1}}{R_3} = 0 \\ \frac{T_{n1} - T_{p2}}{R_3} + \frac{T_{n1} - T_{n2}}{R_s} = 0 \\ \frac{T_{n2} - T_{n1}}{R_s} + \frac{T_{n2} - T_{solref}}{R_s} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

### 3. Résultats

L'influence de la résolution temporelle des données de télédétection sur les estimations de température de surface simulée par le modèle est étudiée. Deux situations sont comparées : (1) assimilation du jeu de données d'origine soit 10 images répartie sur trois jours (environ 3 images par jours), (2) assimilation du jeu de données journalier reconstitué soit 10 images IRT par jour.

Notons que lors de la campagne fluxSAP 2010, les mesures de températures aéroportées ont été réalisées de telle sorte que les dix mesures soient réalisées à dix moments de la journée différents. Pour des raisons techniques, les dix mesures n'ont pas pu être réalisées le même jour mais sur trois jours consécutifs. L'idée initiale de ce décalage était de pouvoir les concaténer en une seule journée pour disposer de mesures toutes les heures, en vérifiant que les conditions climatiques ont peu évolué sur ces trois jours de mesure. Nous avons ainsi un jeu de données avec des mesures toutes les 3h en journée sur 3 jours, et un jeu de données avec dix mesures dans une journée que nous reproduisons sur 3 jours.

Les résultats de simulation avec le modèle seul (sans assimilation de données IRT), avec les données de télédétection d'origine, avec les dix jeux de données de télédétection par jour ainsi que les températures mesurées in situ, sont représentées sur la Figure 5 pour les sols imperméables, et la Figure 6 pour la pelouse et pour le toit. Les indicateurs d'erreur MAE et RMSE entre les températures mesurées et les températures simulées sont de nouveau calculés pour toutes les surfaces et sont indiqués dans le Tableau 3.

Sur les sols imperméables (stade et parking), les données de télédétection « d'origine » ont pour effet d'augmenter les indicateurs d'erreur par rapport au modèle seul. Imposer les températures de surfaces dix fois par jour permet d'obtenir une erreur moindre qu'avec les données d'origine mais plus importante qu'avec le modèle seul. On observe le 21 mai aux alentours de 12h00 les limites de l'utilisation des dix jeux de données par jours puisque les températures imposées sont plus élevées que les températures mesurées *in situ*.

Sur la pelouse en revanche, l'utilisation des données de télédétection a peu d'effet même si on peut noter une légère augmentation de l'erreur avec l'utilisation des dix mesures par jour. Cette augmentation est attribuée à l'utilisation des données le 21 mai puisqu'à nouveau les températures imposées sont plus élevées que les températures mesurées *in situ*.

Concernant le toit, l'utilisation des 10 mesures par jour permet cette fois d'atteindre l'amplitude des températures mesurées dès le 21 mai et de diminuer considérablement les indicateurs d'erreur.

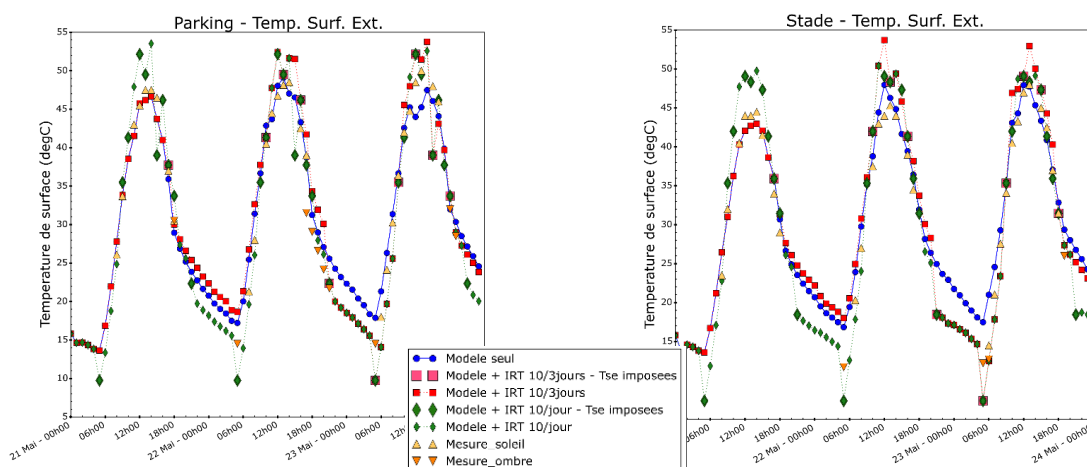


Figure 5: Comparaison des températures de surface obtenues avec et sans les données de télédétection et des températures mesurées sur le parking et sur le stade

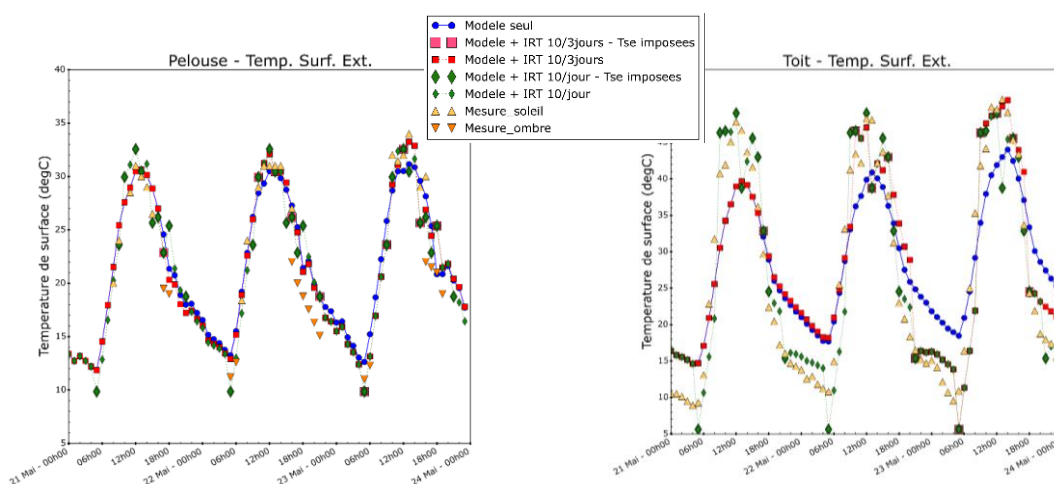


Figure 6: Comparaison des températures de surface obtenues avec et sans les données de télédétection et des températures mesurées sur la pelouse (gauche) et toit (droite)

Tableau 3 : Indicateurs d'erreur MAE et RMSE entre les températures mesurées et les températures simulées et avec sans données de télédétection pour les différentes familles de surfaces

	Pelouse		Stade		Parking		Toit	
Modèle	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
Seul	2.69	3.60	2.24	2.89	2.83	3.84	6.02	6.45
+ IRT	2.56	3.36	3.36	4.00	4.08	5.27	4.73	5.61
+ IRT 10/jour	2.70	3.39	3.27	3.80	3.89	4.91	3.72	4.84

## 4. Conclusion

Cette première étude de l'influence de la résolution temporelle des mesures infrarouges sur les résultats de simulations permet déjà de tirer quelques conclusions quant à l'apport des



données de télédétection dans la modélisation du microclimat urbain. En effet, sur les surfaces déjà bien décrite par le modèle seul sur un quartier bien renseigné, imposer les températures de surface issues de la mesure aéroportée dans le modèle même avec une résolution spatiale très fine (0,5m) entraîne une augmentation de l'erreur due à une différence entre les températures mesurées in situ et les mesures de températures aéroportées. On peut donc s'attendre à ce que l'utilisation de données de télédétection à des résolution plus grossières dégrade davantage la précision des résultats de simulation.

Sur les surfaces moins bien décrites par le modèle seul, comme ici le toit, les données de télédétection permettent de rapprocher les températures simulées et mesurées *in situ* mais pour atteindre une erreur raisonnable, le forçage des températures doit être très fréquent. Le forçage semble donc utile dans le cas où l'on ne connaît pas bien les surfaces et le quartier.

Ces résultats doivent être vérifiés par une étude plus poussée afin d'analyser l'influence de la résolution temporelle et spatiale du forçage des températures de surface sur les simulations du microclimat urbain, notamment par la réalisation de simulations avec des données de télédétection agrégées avec une fréquence de forçage variable.

## Références

- [1] D. Zhou *et al.*, « Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives », *Remote Sens.*, p. 36, 2019, doi: 10.3390/rs11010048.
- [2] J.-L. Roujean, « TRISHNA: a franco-indian mission to monitor the water status of continental ecosystems – Theia », 5 août 2019. <https://www.theia-land.fr/en/trishna-a-franco-indian-mission-to-monitor-the-water-status-of-continental-ecosystems/> (consulté le 20 août 2021).
- [3] M. Musy, M.-H. Azam, S. Guernouti, B. Morille, et A. Rodler, « The SOLENE-Microclimat Model: Potentiality for Comfort and Energy Studies », in *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*, M. Palme et A. Salvati, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2021, p. 265-291. doi: 10.1007/978-3-030-65421-4\_13.
- [4] P. g. Mestayer, J.-M. Rosant, F. Rodriguez, et J.-M. Rouaud, « La campagne expérimentale FluxSAP 2010 : Mesures de climatologie en zone urbaine hétérogène », *La Météorologie*, vol. 8, n° 73, p. 34, 2011, doi: 10.4267/2042/42892.
- [5] M.-H. Azam, B. Morille, J. Bernard, M. Musy, et F. Rodriguez, « A new urban soil model for SOLENE-microclimat: Review, sensitivity analysis and validation on a car park », *Urban Clim.*, vol. 24, p. 728-746, juin 2018, doi: 10.1016/j.uclim.2017.08.010.
- [6] H. Montazeri et B. Blocken, « New generalized expressions for forced convective heat transfer coefficients at building facades and roofs », *Build. Environ.*, vol. 119, p. 153-168, juill. 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.04.012.
- [7] J. Bouyer, « Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments », École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, 2009.
- [8] G. Fraisse, C. Viardot, O. Lafabrie, et G. Achard, « Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy », *Energy Build.*, p. 15, 2002.
- [9] E. Karpouzli et T. Malthus, « The empirical line method for the atmospheric correction of IKONOS imagery », *Int. J. Remote Sens.*, vol. 24, n° 5, p. 1143-1150, janv. 2003, doi: 10.1080/0143116021000026779.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet District Infrared thermography for microclimate financé par le CNES, appels à projets TOSCA.