

STRUCTURE FINE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN PARISIEN À PARTIR D'UN RÉSEAU DE STATIONS NON CONVENTIONNELLES

Malika MADELIN¹, Vincent DUPUIS²

¹ UMR 8586 PRODIG, Université de Paris, Paris, France, malika.madelin@u-paris.fr

² UMR 8234 PHENIX, Sorbonne Université, Paris, France, vincent.dupuis@sorbonne-universite.fr

Résumé : Si l'îlot de chaleur urbain (ICU) se manifeste généralement par des températures urbaines nocturnes plus élevées que celles enregistrées dans les zones péri-urbaines ou rurales, la structure de l'ICU à des échelles plus fines est difficile à appréhender, en raison de la faible densité des réseaux de stations d'observation de référence. La disponibilité de nouvelles données de stations individuelles (e.g. Netatmo) offre des opportunités en termes de résolutions spatiales et temporelles, sous réserve d'une analyse critique importante. Dans cette communication, en utilisant un jeu de données Netatmo sur l'agglomération parisienne, nous nous intéressons à la structure fine de l'ICU et à la variabilité des températures inter et intra *Local Climate Zones*, résumant la morphologie urbaine et l'occupation du sol.

Mots-Clés : îlot de chaleur urbain ; stations individuelles ; LCZ *Local Climate Zones* ; agglomération parisienne.

Abstract: Fine scale structure of the urban heat island from a citizen weather station network. While the urban heat island (UHI) generally manifests itself by nighttime urban temperatures higher than those recorded in peri-urban or rural areas, the structure of the UHI at finer scales is difficult to apprehend. This is due to the low density of reference observation station networks. The availability of new data coming from individual weather stations (e.g. Netatmo) offers opportunities in terms of spatial and temporal resolutions, provided a significant critical analysis is done. In this communication, using a Netatmo dataset on the Paris agglomeration, we are investigate in the fine structure of the ICU and the inter and intra *Local Climate Zones* temperature variability, summarizing the urban morphology and the occupation of the ground.

Keywords: urban heat island, personal weather stations, LCZ *Local Climate Zones*, Paris area.

Introduction

L'îlot de chaleur urbain est un phénomène majeur en climatologie urbaine (Oke *et al.* 2017). Il est caractérisé par des températures de l'air nocturnes plus élevées dans le centre des villes que dans les campagnes environnantes, surtout lors des nuits de ciel clair et de vent calme (conditions radiatives). Il est lié à l'hétérogénéité des propriétés thermiques et des perméabilités des surfaces urbaines et rurales.

Pour aller au-delà de cette dichotomie ville/campagne et mieux appréhender les liens entre le climat urbain local, la morphologie urbaine et l'occupation du sol aux échelles fines, une classification de l'espace en Zones Climatiques Locales (LCZ *Local Climate Zones*), supposées homogènes, a été introduite par Stewart et Oke (Stewart et Oke 2012). Celle-ci divise l'espace en 17 classes, 10 classes urbaines (de 1 à 10) qui diffèrent principalement selon la hauteur et la densité des bâtiments et 7 classes « naturelles » divisées en 4 classes « végétalisées » (de A à D), 2 classes concernant les sols minéraux (roches et sables, E, F) et une classe pour les surfaces d'eau (G). Grâce à une standardisation des méthodes permettant de déterminer ces LCZ (Demuzere *et al.* 2021, Wudapt www.wudapt.org/) pour différentes villes à partir de données satellitaires, cette classification en LCZ s'est rapidement imposée dans des études de climatologie urbaine et est maintenant disponible pour un grand nombre de villes dans le monde.

Pour tester la pertinence de ces classifications en LCZ pour représenter le climat urbain local, un grand nombre d'auteurs ont cherché à quantifier la variabilité des températures observées au sein d'un même type de LCZ (*intra*) et entre types de LCZ différents (*inter*) pour différentes villes. En raison de la faible densité des réseaux de stations de référence, ces études se basent le plus souvent sur des observations satellitaires dans

l'infrarouge thermique, disponibles avec une haute résolution spatiale (Geletič *et al.* 2016, Richard *et al.* 2018, Bechtel *et al.* 2019, del Pozo *et al.* 2021) mais possédant une résolution temporelle limitée. Si des différences sont effectivement observées entre LCZ, avec des LCZ urbaines en général plus chaudes que les LCZ végétalisées, le lien entre température de surface et température de l'air n'est toutefois pas évident, particulièrement en journée et la généralisation de ces résultats n'est donc pas triviale. Sur le plan des observations au sol, d'autres auteurs se basent sur des mesures mobiles (Leconte 2015, Renard et Alonso 2020) qui permettent d'avoir de la haute résolution spatiale mais là encore avec une profondeur temporelle souvent limitée. Enfin, d'autres travaux, plus rares, utilisent les mesures issues de réseaux denses de recherche et/ou des collectivités territoriales (quelques dizaines de stations) (Skarbit *et al.* 2017, Richard *et al.* 2018, Dubreuil *et al.* 2020, Gubler *et al.* 2021, Philipps *et al.* 2021). Là encore, des différences de comportements thermiques sont observées en fonction des types de LCZ mais le faible nombre de stations par type de LCZ rend les généralisations difficiles.

Parallèlement à ces études, un nombre plus limité d'auteurs se sont intéressés aux données issues des réseaux non conventionnels, émergents, de stations individuelles comme celles du réseau Netatmo (netatmo.com). Même si ces données nécessitent d'être sérieusement analysées et triées avant d'être utilisées (Meier *et al.* 2017, Madelin et Dupuis 2020), elles présentent l'avantage d'offrir une très haute résolution spatiale (plusieurs milliers de stations à Paris ou à Berlin par exemple) et temporelle, qui permet d'étudier la pertinence des LCZ pour caractériser le climat urbain local. Plusieurs études récentes ont été réalisées dans ce contexte pour les villes de Berlin (Fenner *et al.* 2017), Sydney (Potgieter *et al.* 2021), Moscou (Varentsov *et al.* 2021) ou encore Londres (Benjamin *et al.* 2021). Si dans toutes ces études, on retrouve des températures plus élevées pour les LCZ urbaines que pour les LCZ végétalisées, en accord avec le phénomène d'îlot de chaleur urbain, des différences au sein de LCZ d'un même type et entre LCZ d'un même groupe (urbains, végétalisés) sont également observées. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude sur Paris, métropole d'environ 10 millions d'habitants.

1. Données et méthodes

1.1. Classification en LCZ de l'agglomération parisienne

Pour cette étude, nous avons utilisé la classification LCZ de la région parisienne disponible sur le site WUDAPT (www.wudapt.org, Ching *et al.* 2018), plus précisément la version initiale pour l'agglomération parisienne, créée par Guillaume Dumas (Hidalgo *et al.* 2019). Il s'agit d'un raster (résolution 100m) qui recouvre une zone d'environ 50km autour de Paris, chaque pixel contenant l'information sur le type de LCZ (Figure 1).

1.2. Données de températures issues du réseau Netatmo

Nous avons utilisé des données de température de l'air des stations du réseau Netatmo autour de Paris collectées à l'échelon horaire depuis 2017 et triées suivant la méthodologie décrite dans Madelin et Dupuis (2020, proche de celle développée par Meier *et al.* 2017) : après tri, nous gardons du jeu initial environ un tiers des stations (~4 000 stations) et la moitié des données horaires. Pour cette étude, nous avons restreint le jeu de données aux stations situées à une distance inférieure à 50 km du centre de Paris (Figure 1), une distance suffisante pour bien appréhender l'îlot de chaleur urbain parisien (Madelin et Dupuis 2020).

Par ailleurs, pour le tri des données Netatmo, nous avons ainsi utilisé les températures minimales et maximales journalières de quatre stations de Météo-France (Paris Montsouris, Melun, Trappes et Creil). Nous avons également utilisé les données horaires de nébulosité et de vent moyen pour la station d'Orly, afin de déterminer les nuits correspondant à des situations de ciel clair (nébulosité moyenne inférieure ou égale à 2 octas) et de vent calme (vitesse moyenne inférieure ou égale à 2 m/s).

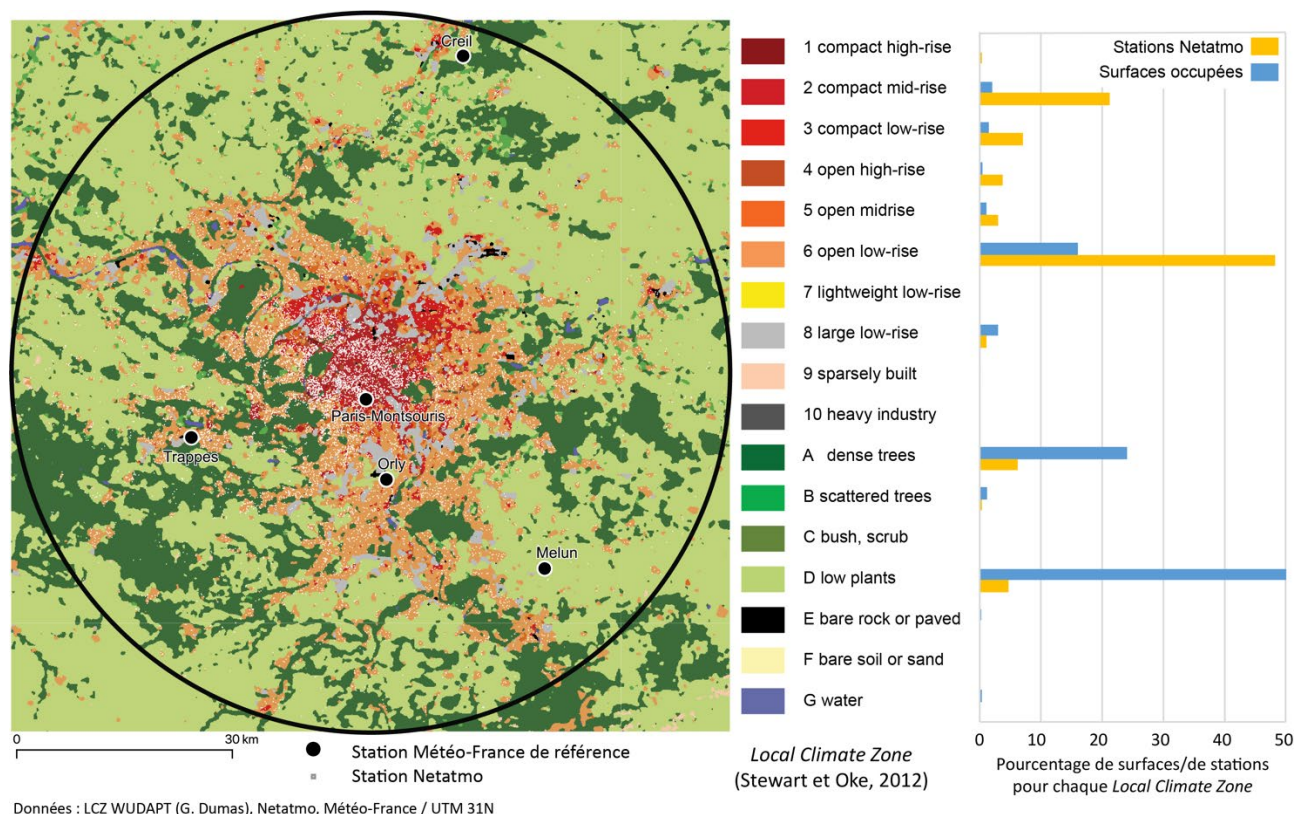


figure 1. Carte des LCZ pour l'agglomération parisienne et des stations Netatmo en 2021 (en points blancs) et des stations de référence (points noirs) ; délimitation de la zone d'étude d'un rayon de 50 km centré sur Paris (cercle noir) et histogrammes des surfaces occupées et des nombres de stations Netatmo par type de LCZ (en pourcentage).

1.3. Méthodologie

Afin d'étudier les liens entre la structure spatiale de l'îlot de chaleur urbain parisien (et du champ de températures de façon plus générale) et la division de l'espace en LCZ, nous avons attribué à chaque station le type de LCZ correspondant à sa localisation. Nous avons ensuite calculé diverses statistiques par type de LCZ, résumées dans ce manuscrit sous forme de graphiques temporels et de boîte à moustaches ou *boxplot*, en regroupant les observations à différents échelons temporels : année, saison, jour/nuit, nuit de situations dites « radiatives » (ciel clair, vent calme). En cela, nous reprenons une méthodologie classique pour ce type d'étude du lien entre températures et LCZ déjà utilisée, par exemple par Skarbit *et al.* (2017) ou encore Fenner *et al.* (2017). Enfin, nous avons cherché à évaluer l'influence de la distance au centre de Paris en calculant les gradients thermiques par type de LCZ lors de nuits radiatives.

2. Variabilité *intra-* et *inter-LCZ* des températures du réseau Netatmo

2.1. Par saison, en fonction du jour et de la nuit

Nous avons choisi d'étudier la variabilité *intra-LCZ* et *inter-LCZ* des températures de l'air mesurées par les stations Netatmo en fonction des saisons en distinguant les jours (ici entre 12h et 15h UTC) et les nuits (entre 4h et 7h après le coucher du soleil). La figure 2 montre, pour l'année 2019, les températures médianes ainsi que les intervalles interquartiles pour les différentes classes LCZ. On observe globalement une variabilité *intra-LCZ* plus faible la nuit que le jour, pour une même saison, et des températures généralement plus élevées la nuit pour les classes LCZ urbaines que pour les classes LCZ végétalisées (A,D), en accord avec l'existence d'un îlot de chaleur urbain nocturne. Nous observons des tendances similaires pour les autres années étudiées (non montré ici).

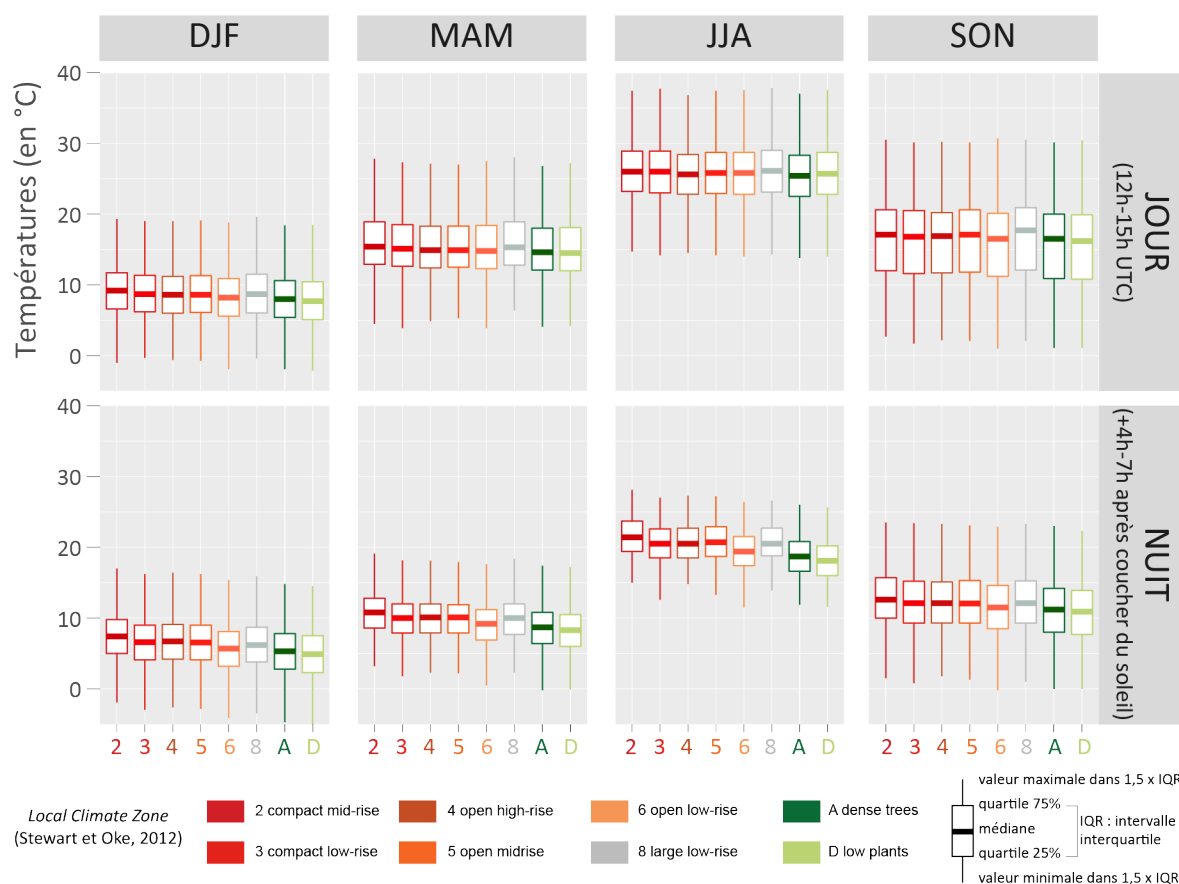


figure 2. Températures médianes et intervalles interquartiles associés, pour les stations Netatmo en fonction du type de LCZ sous forme de *boxplot* pour les différentes saisons de l'année 2019 et selon le jour et la nuit.

2.2. En fonction de l'heure, selon les saisons

Pour aller au-delà de l'analyse précédente et mieux appréhender la dynamique des variations *inter*-LCZ à l'échelle de la journée, nous avons choisi de calculer et représenter la différence des températures médianes des LCZ, en prenant comme référence la température médiane de la classe LCZ urbaine de type 2 (*compact mid-rise*). La figure 3 montre ces écarts en hiver (DJF) et en été (JJA) pour l'année 2019. On voit très bien l'îlot de chaleur urbain nocturne et sa dynamique, avec des températures enregistrées par les stations situées dans les LCZ végétalisées, majoritaires à l'extérieur du centre urbain, plus élevées la nuit que celles enregistrées dans celles situées dans les LCZ urbaines. Des écarts de plusieurs degrés sont observés, quasiment toujours positifs, et les variations diurnes sont plus élevées en été.

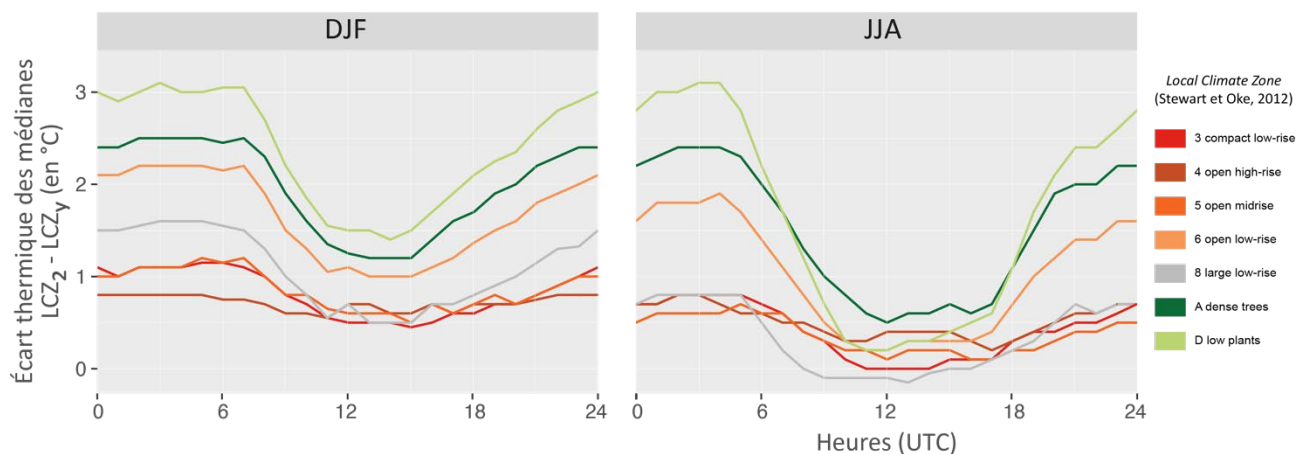


figure 3. Écart thermique des médianes entre LCZ 2 (*compact mid-rise*) et les autres LCZ, en fonction de l'heure, pour les stations Netatmo en hiver et en été 2019.

2.3. Influence de la distance au centre de Paris pour les dates correspondant à des situations de ciel clair et de vent calme

Pour mieux comprendre les variabilités *intra*- et *inter*-LCZ, particulièrement marquées lors des nuits radiatives (non montré ici), nous avons cherché à évaluer l'influence de la distance au centre de Paris. La figure 4 montre, pour une nuit radiative particulière (02/03/21), l'évolution des températures enregistrées par les stations associées à différentes LCZ en fonction de la distance au centre de Paris. On voit globalement une décroissance sur une vingtaine de kilomètres (en accord avec des résultats précédents, Madelin et Dupuis 2020), avec des gradients thermiques qui dépendent du type de LCZ.

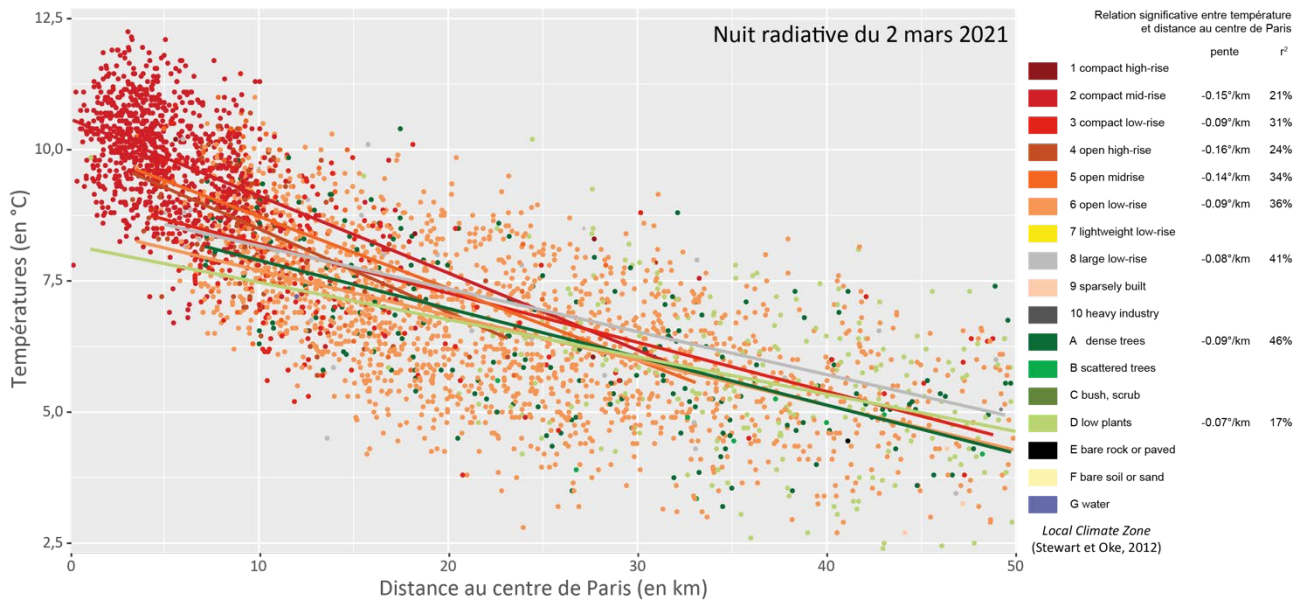


figure 4. Températures de l'air des stations Netatmo associées à différentes LCZ en fonction de la distance au centre de Paris.

Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans cet article à la variabilité spatiale aux échelles fines des températures issues d'un réseau non conventionnel de stations individuelles, le réseau Netatmo, en lien avec la description de l'espace urbain au moyen de la classification LCZ. Nos résultats montrent une variabilité des températures enregistrées en fonction des LCZ. En se focalisant sur les saisons, en séparant jour et nuit et même au-delà en isolant les nuits « radiatives » (ciel clair, vent calme), les disparités entre températures médianes enregistrées en fonction du type de LCZ apparaissent plus nettement. On retrouve ainsi l'existence d'un îlot de chaleur qui se traduit par des températures plus élevées dans les zones urbaines que dans les zones végétalisées. Toutefois, des différences sont également observées entre LCZ d'un même groupe, LCZ urbaines par exemple, différences qui mériteraient d'être approfondies par l'installation d'un réseau dense de stations de référence, basé sur les LCZ (comme à Toulouse, Dijon ou encore Rennes).

Bibliographie

Bechtel B., Demuzere M., Mills G., Zhan W., Sismanidis P., Small C. et Voogt J., 2019 : SUHI analysis using Local Climate Zones. A comparison of 50 cities. *Urban Climate*, **28**, p.100451.

Benjamin K., Luo Z. et Wang X., 2021 : Crowdsourcing urban air temperature data for estimating urban heat island and building heating/cooling load in London. *Energies*, **14**(16), p.5208.

Ching J., Mills G., Bechtel B., See L., Feddema J., Wang X., Ren C., Brousse O., Martilli A., Neophytou M., Mouzourides P., Stewart I., Hanna A., Ng E., Foley M., Alexander P., Aliaga D., Niyogi D., Shreevastava A., Bhalachandran P., Masson V., Hidalgo J., Fung J., Andrade M., Baklanov A., Dai W., Milcinski G., Demuzere M., Brunzell N., Pesaresi M., Miao S., Mu Q., Chen F. et Theeuwes N., 2018 : WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **99**, 1907-1924.

- del Pozo S., Landes T., Nerry F., Kastendeuch P., Najjar G., Philipps N. et Lagüela S., 2021 : Evaluation of the Seasonal Nighttime Lst-Air Temperature Discrepancies and Their Relation to Local Climate Zones (LCZ) in Strasbourg. In *XXIVTH ISPRS CONGRESS*, **43**.
- Demuzere M., Kittner J. et Bechtel B., 2021 : LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Frontiers in Environmental Science*, **9**.
- Dubreuil V., Foissard X., Nabucet J., Thomas A. et Quénot H., 2020 : Fréquence et intensité des îlots de chaleur à Rennes : bilan de 16 années d'observations (2004-2019). *Climatologie*, **17**, p.6.
- Fenner D., Meier F., Bechtel B., Otto M. et Scherer D., 2017 : Intra and inter 'local climate zone' variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. *Meteorologische Zeitschrift*, **26**, 5, 525-547.
- Geletiç J., Lehnert M. et Dobrovolný P., 2016 : Land surface temperature differences within local climate zones, based on two central European cities. *Remote Sensing*, **8**(10), p.788.
- Gubler, M., Christen, A., Remund, J. and Brönnimann, S., 2021. Evaluation and application of a low-cost measurement network to study intra-urban temperature differences during summer 2018 in Bern, Switzerland. *Urban climate*, **37**, p.100817.
- Hidalgo J., Dumas G., Masson V., Petit G., Bechtel B., Bocher E., Foley M., Schoetter R. et Mills G., 2019 : Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations. *Urban Climate*, **27**, 64-89.
- Leconte F., 2015 : *Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Madelin M. et Dupuis V., 2020 : Intensité et spatialisations de l'îlot de chaleur urbain parisien à partir de données participatives. *Climatologie*, **17**, 9.
- Meier F., Fenner D., Grassmann T., Otto M. et Scherer D., 2017 : Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. *Urban Climate*, **19**, 170-191.
- Oke T.R., Mills G., Christen A. et Voogt J. A., 2017 : *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Philipps N., Kastendeuch P. et Najjar G., 2020 : Analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg (France). *Climatologie*, **17**, p.10.
- Potgieter J., Nazarian N., Lipson M.J., Hart M.A., Ulpiani G., Morrison W. et Benjamin K., 2021. Combining high-resolution land use data with crowdsourced air temperature to investigate intra-urban microclimate. *Frontiers in Environmental Science*, p.385.
- Renard F. et Alonso L., 2020 : Températures de surface et mesures mobiles confrontées aux zones climatiques locales : exemples des agglomérations de Tokyo et de Lyon. *Climatologie*, **17**, p.11.
- Richard Y., Emery J., Dudek J., Pergaud J., Chateau-Smith C., Zito S., Rega M., Vairet T., Castel T., Thévenin T. et Pohl B., 2018 : How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Climate*, **26**, 258-274.
- Skarbit N., Stewart I.D., Unger J. et Gál T., 2017 : Employing an urban meteorological network to monitor air temperature conditions in the 'local climate zones' of Szeged, Hungary. *International Journal of Climatology*, **37**, 582-596.
- Stewart I.D. et Oke T.R., 2012 : Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93**(12), 1879-1900.
- Varentsov M., Fenner D., Meier F., Samsonov T. et Demuzere M., 2021 : Quantifying Local and Mesoscale Drivers of the Urban Heat Island of Moscow with Reference and Crowdsourced Observations. *Frontiers in Environmental Science*, p.543.