

CARTOGRAPHIE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN GRÂCE AUX THERMOMÈTRES EMBARQUÉS DANS LES VOITURES CONNECTÉES : CAS À TOULOUSE ET DIJON

Eva MARQUES ¹, Valéry MASSON ², Philippe NAVEAU ³, Olivier MESTRE ⁴, Vincent DUBREUIL ⁵, Yves RICHARD ⁶.

¹ *Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse, France, eva.marques@meteo.fr*

² *Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse, France, valery.masson@meteo.fr*

³ *Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Paris, France, philippe.naveau@lsce.ipsl.fr*

⁴ *Météo-France, Toulouse, France, olivier.mestre@meteo.fr*

⁵ *LETG-Rennes, UMR-6554-CNRS, Université de Rennes 2, Rennes, France, vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr*

⁶ *CRC-Biogéosciences, UMR-6282-CNRS, Université de Bourgogne-Franche-Comté, Dijon, France, yves.richard@u-bourgogne.fr*

Résumé : Les zones urbaines s'étendent rapidement et une part grandissante de la population mondiale s'installe en ville. L'impact de l'îlot de chaleur urbain (ICU) sur le confort thermique et la santé des citoyens préoccupe de plus en plus les décideurs locaux qui ont besoin de données climatologiques précises. Face à la difficulté de déployer des réseaux de mesure en ville, les climatologues se tournent vers de nouvelles sources de données collectées par la population. En les comparant à un réseau de stations semi-professionnelles, nous montrons que les thermomètres de véhicules connectés sont exploitables afin d'obtenir des cartes précises et fiables de l'ICU sur des zones jusqu'alors non explorées. À Dijon et Toulouse par exemple, ces nouvelles observations permettent d'analyser l'effet de l'orographie et de la météorologie sur l'ICU.

Mots-clés : Îlot de chaleur urbain, crowdsourcing, voitures connectées

Introduction

Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais en ville. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) caractérisé par des écarts de température entre la ville et la campagne environnante (Oke et al. 2017) concerne une part grandissante de la population. La température urbaine est généralement plus élevée la nuit, et l'écart s'intensifie en l'absence de nébulosité et lorsque le vent est faible. Ces conditions météorologiques sont régulièrement observées lors des vagues de chaleur, dont la fréquence et l'intensité augmentent avec le changement climatique (Perkins-Kirkpatrick and Lewis, 2020). L'ICU devient alors particulièrement préoccupant pour la santé des habitants : lors de la canicule de 2003 en Europe, Laaidi et al. (2012) ont par exemple montré que l'ICU a contribué à la hausse de la mortalité des personnes les plus vulnérables à Paris.

Face à ce constat, les villes souhaitent déployer des réseaux de mesure de température de l'air à fine échelle spatiale. Or l'implantation de stations météorologiques synoptiques en milieu urbain nécessite d'adapter les critères d'installation dictés par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) (Oke, 2004). De plus, des contraintes pratiques telles que le choix du support urbain ou les normes de sécurité freinent le déploiement de tels réseaux. En France, très peu de villes sont équipées ; nous pouvons cependant citer Dijon (Richard et al. 2018, 2021), Rennes (Dubreuil et al. 2011), ou Toulouse (Dumas et al. 2021).

Afin de pallier le manque d'observations de la température de l'air en ville, les climatologues se tournent désormais vers de nouvelles sources de données collectées par la population (Muller et al. 2015). Avec la rapide expansion des objets connectés, de plus en plus de mesures opportunes ou participatives sont récoltées par les habitants, notamment dans les zones urbaines où la densité de population est importante. Une revue de la littérature permet de cibler trois principaux systèmes d'observation dits de « crowdsourcing » pour étudier la température de l'air en ville : les smartphones, les stations météorologiques amateurs et les voitures connectées.

Les batteries de smartphones fournissent de très nombreuses mesures de température en zones denses en population (Overeem et al. 2013). Cependant, la localisation du smartphone et sa proximité avec le corps humain compliquent l'obtention d'une mesure exploitable de température de l'air dans la canopée urbaine.

Les stations météorologiques amateurs ont été plus largement exploitées pour cartographier l'ICU. En Europe, les stations connectées de l'entreprise NetAtmo ont permis d'observer l'ICU des villes de Berlin (Meier et al. 2015, Fenner et al. 2017), Londres (Chapman et al. 2017), Paris (Madelin and Dupuis 2019), Moscou (Varentsov et al. 2020), Vienne (Feichtinger et al. 2020), Toulouse (Napoly et al. 2018), Oslo (Venter et al. 2020) et Zurich (Zumwald et al. 2021). Selon ces études, un contrôle qualité rigoureux est impératif avant l'utilisation des données car les stations ne sont pas bien protégées du rayonnement solaire et leur emplacement n'est pas contrôlé. Le pourcentage d'observations écartées varie de 40 % à 75 % selon les sources.

Les véhicules connectés attirent également l'attention des météorologistes, en particulier pour l'amélioration des modèles de prévision de l'état de la route. En période hivernale, Siems-Anderson et al. (2019) ont montré que l'erreur moyenne de la température mesurée par les voitures est de 1°C. Bell et al. (2021) ont par ailleurs constaté grâce à une étude sur deux mois que l'erreur est plus importante par temps clair que lors des jours couverts ou pluvieux. En climatologie urbaine, Knight et al. (2010) ont exploré le potentiel des thermomètres embarqués dans les voitures à l'aide d'une étude participative sur Manchester. Grâce à une campagne de mesure et à l'obtention d'une base de données massive sur toute l'Europe de l'Ouest, nous approfondissons ces études en estimant l'erreur des thermomètres véhicules en milieu urbain et en période estivale, notamment lors d'une vague de chaleur favorable à l'apparition de fort ICU. Dans Marquès et al. (2022), nous quantifions l'erreur de mesure des thermomètres embarqués en comparant les températures avec un réseau dense de stations météorologiques urbaines pendant l'été 2018. Ces résultats, en partie présentés ici, permettent de faire avancer la recherche en climat urbain. Nous proposons un nouveau cas d'étude sur Toulouse, où deux configurations d'ICU nocturne sont observées par forte chaleur, avec des conditions météorologiques légèrement différentes.

1. Estimation de l'erreur de mesure des thermomètres embarqués

1.1. Facteurs physiques dégradant la mesure des thermomètres embarqués

Pour comprendre l'influence de la vitesse du véhicule sur la mesure du thermomètre embarqué, une De plus, l'intensité vent était un peu plus élevée lors de l'épisode caniculaire.

campagne de mesure est effectuée à Toulouse lors de la canicule de juin 2019. Lorsque la voiture est à l'arrêt et que le rayonnement solaire est fort, l'erreur du thermomètre augmente pendant plusieurs minutes jusqu'à atteindre +7°C d'écart avec la température de l'air mesurée par une sonde sous abri. Cet écart diminue lorsque la voiture prend de la vitesse et se stabilise au bout d'une dizaine de minutes autour de +1°C. La vitesse du véhicule agit comme une ventilation sur le thermomètre embarqué.

Nous avons étudié plus largement l'influence du rayonnement solaire sur le thermomètre véhicule grâce à une base de données de 6,7 milliards d'observations de voitures connectées ayant circulé de juin 2016 à décembre 2018 sur toute l'Europe de l'Ouest. Les données ont été récoltées dans le cadre d'un contrat d'assurance que le constructeur automobile PSA propose à ses clients. En échange de services d'aide à la conduite, ces derniers acceptent de partager les données personnelles de leur véhicule connecté. Chaque observation est composée d'une température arrondie à 0,5°C, du relevé du jour et de l'heure de la mesure (précise à la seconde), des coordonnées GPS, de la vitesse du véhicule arrondie à 5km.h⁻¹, de l'altitude. La répartition des données varie dans le temps et l'espace en fonction de la densité du trafic : celui-ci est plus intense en journée et notamment aux heures de pointe, en particulier dans les villes et sur les grands axes routiers. Aussi, afin de protéger la vie privée des conducteurs, les données ont été anonymisées et il est impossible de suivre les trajets, qui n'ont pas d'identifiant.

Grâce à deux études de cas au mois d'août 2018 sur les villes de Rennes et Dijon, nous avons pu établir un lien entre le rayonnement solaire et l'erreur de mesure des thermomètres embarqués. En effet, ces deux villes sont équipées de réseaux de stations météorologiques semi-professionnelles depuis respectivement 2004 (Dubreuil et al. 2011) et 2014 (Pohl et al. 2015). Ils ont été déployés selon une méthodologie rigoureuse : la plupart des types de zones urbaines définies dans Stewart and Oke (2012) sont équipées. Le

large échantillon d'un mois de données PSA a été comparé à ceux des deux réseaux météorologiques urbains. Nous avons sélectionné les observations véhicules situées à moins de 200m des stations de référence disponibles pour calculer l'écart de mesure entre les deux sources de données. Grâce aux stations synoptiques de chaque ville (situées respectivement aux aéroports de Dijon Longvic et Rennes St-Jacques) qui mesurent le rayonnement solaire incident, nous avons constaté que l'erreur des thermomètres embarqués augmente linéairement avec le rayonnement solaire.

1.2. Proposition de correction de l'erreur de mesure

Dans la base de données de véhicules PSA, les observations ont été anonymisées et il n'y a pas d'identifiant pour le trajet. Il est impossible de connaître le temps de roulage depuis le départ. Néanmoins, nous avons supprimé par précaution toutes les observations inférieures à 10 km.h⁻¹ pour la suite de l'étude.

D'après les résultats sur l'impact du rayonnement solaire sur le thermomètre embarqué, nous proposons une modélisation de sa contribution à l'erreur de mesure ΔT avec la relation linéaire suivante : $\Delta T = \alpha + \beta \times SW + \epsilon$ où SW est le rayonnement solaire horaire mesuré à la station synoptique de l'aéroport, considéré par manque de données à plus fine échelle comme uniforme sur la ville ; α , β les coefficients de la régression estimés par moindres carrés pour chaque ville et ϵ le terme d'erreur. La grandeur ΔT est ensuite retranchée à la mesure pour obtenir une observation corrigée, qui est utilisée pour estimer l'erreur de mesure des thermomètres embarqués.

1.3. Estimation de l'erreur de mesure après correction

Après avoir appliqué les corrections précédemment citées, la moyenne et la dispersion de l'erreur de mesure sont estimées. Les intervalles de confiance asymptotiques à 95 % obtenus sont disponibles dans le Tableau 1. Grâce à la correction sur le rayonnement solaire, la moyenne de l'erreur est proche de 0°C pour les deux villes, de jour comme de nuit. L'écart-type est faible la nuit ($\sigma \approx 1,1^\circ\text{C}$) mais augmente le jour, notamment lorsque le rayonnement solaire est fort ($\sigma \approx 2^\circ\text{C}$ quand il est supérieur à 700W.m⁻²). Les diagrammes en boîtes de la Figure 1 confirment que l'erreur est centrée et que la dispersion varie au cours de la journée, probablement avec le rayonnement solaire (dont l'effet n'a été corrigé qu'en moyenne). Aussi, l'erreur de mesure est estimée avec les voitures à moins de 200m de stations professionnelles, or ce rayon est assez grand pour observer de réelles variations de température très localement, plus probables la journée avec les ombres portées.

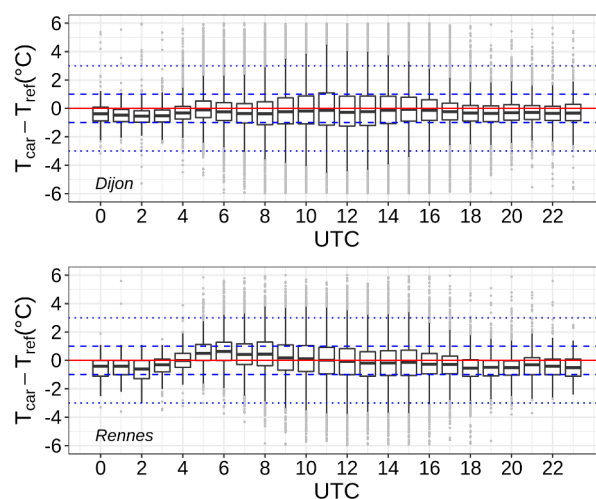


Figure 1. Diagrammes en boîtes par heure de l'erreur de mesure sur l'été 2018 des véhicules connectés par rapport aux réseaux semi-professionnels déployés sur Dijon et Rennes (Marquès et al. 2022)

2. Cartographie de l'ICU

Les résultats sur l'erreur de mesure des thermomètres permettent d'envisager de cartographier l'ICU sur les villes couvertes par la base de données du constructeur automobile PSA.

2.1 Calcul de l'ICU à partir de données mobiles

Les températures obtenues par les thermomètres embarqués sont des mesures mobiles opportunes. Par conséquent, il n'est pas possible de choisir un point rural fixe qui servirait de référence pour calculer l'intensité de l'ICU en tout point de la carte. Pour chaque heure, nous fixons la température de référence de l'ICU au premier décile de toutes les observations. L'ICU en chaque point est interprété en terme d'écart de température par rapport aux zones où l'ICU est nul. Sur les cartes obtenues, celles-ci correspondent à des aires rurales. Cette méthode est généralisable à n'importe quelle ville, peu importe sa topographie. Nous ajoutons 0,6°C tous les 100m d'altitude afin de s'affranchir du gradient vertical standard de température.

Pour créer les cartes, nous tirons parti de l'abondance des données et agrégeons les d'observations dans l'espace et le temps. Ceci permet d'obtenir des cartes d'ICU médian fiables à 200m de résolution.

2.2 Cartographie à fine échelle de l'ICU grâce aux voitures connectées

À Dijon, l'ICU obtenu par les voitures connectées est conforme à celui mesuré par le réseau de stations semi-professionnelles (Figure 2). Les thermomètres embarqués fournissent des observations dans des zones non-explorées par les stations fixes. Le jour, l'ICU n'a pas de forme particulière, il est peu intense et ne varie pas beaucoup selon les zones. La nuit, l'ICU est concentrique et l'intensité maximale de 4°C est observée en centre-ville. À l'Ouest, on constate une inversion thermique de 3°C dans la vallée de l'Ouche.

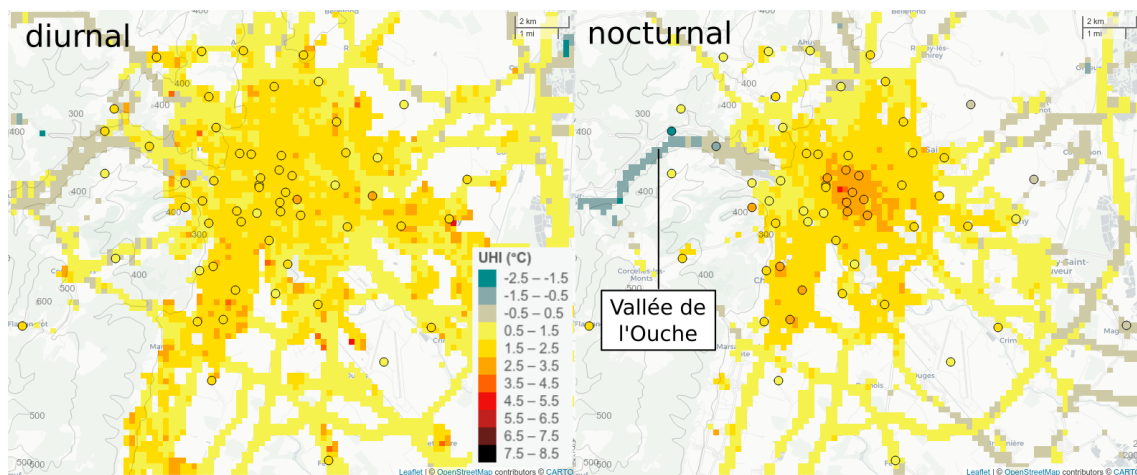


Figure 2. ICU (ou UHI en anglais) médian diurne (à gauche) et nocturne (à droite) pendant l'été 2018 sur la ville de Dijon (Marquès et al 2022). Fond de carte : données des véhicules connectés ; cercles : mesures du réseau semi-professionnel de Dijon.

À Toulouse (Figure 3), les mesures des véhicules connectés permettent de comparer l'étendue et l'intensité de l'ICU nocturne en conditions favorables (vent faible et absence de nébulosité). En période caniculaire, celui-ci s'élève à +2,5 voire +3°C dans le centre historique. Mais ce n'est pas lors de cet épisode caniculaire qu'il est le plus intense : quelques semaines plus tôt au début de l'été 2018, celui-ci atteint +4°C. En comparant les variables météorologiques sur ces deux épisodes, il apparaît que le rayonnement solaire en journée est plus intense en juin que lors de la canicule de début août 2018. Pour expliquer l'écart entre ces deux ICU, nous supposons donc que les matériaux urbains ont emmagasiné une plus grande quantité de rayonnement en juin, et l'ont ensuite restituée sous forme de chaleur la nuit. Aussi, l'intensité vent était un peu plus élevée lors de l'épisode caniculaire. Les conditions météorologiques des jours précédents, l'évolution de la végétation et l'humidité des sols des zones rurales alentours pourraient aussi expliquer cet écart.

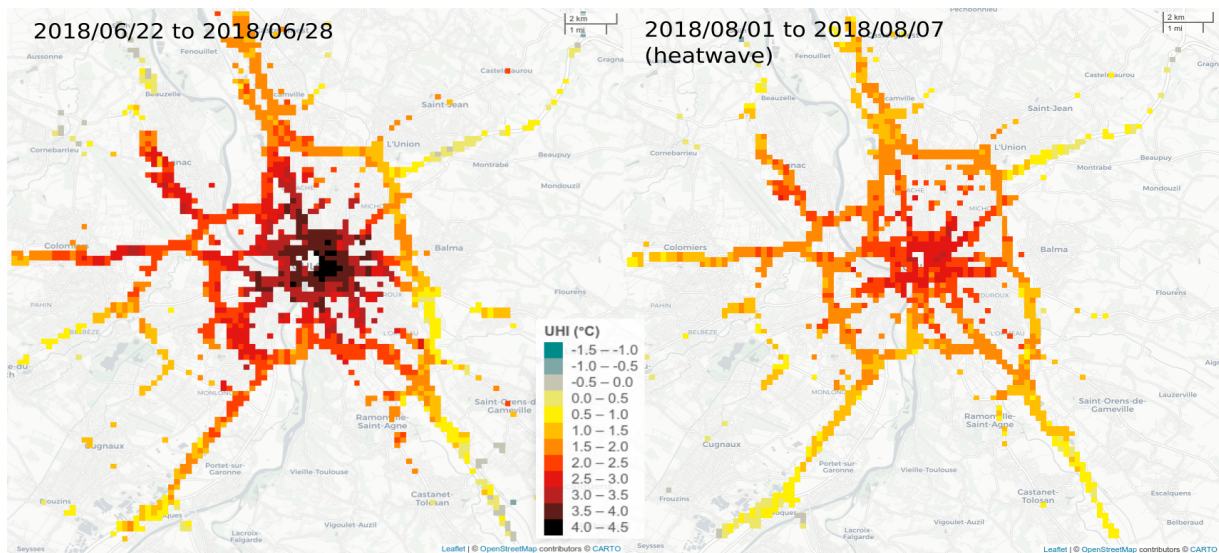


Figure 3. ICU nocturne médian (ou UHI en anglais) en conditions favorables hors canicule (à gauche) et lors d'une canicule (à droite) pendant l'été 2018 sur la ville de Toulouse obtenu grâce aux données des véhicules connectés.

Conclusion

Les véhicules connectés constituent une nouvelle source de données très prometteuse en réponse aux divers freins au déploiement de systèmes d'observations de température de l'air en milieu urbain. Après correction de l'effet du rayonnement solaire, l'erreur de mesure des thermomètres embarqués est en moyenne proche de zéro, même si sa dispersion varie au cours de la journée. Les observations sont plus fiables la nuit, mais elles sont moins abondantes en raison de la diminution du trafic. Le jour, l'erreur est plus dispersée mais ceci peut être corrigé en agrégeant spatialement les observations, beaucoup plus nombreuses que la nuit.

Les véhicules connectés permettent donc d'obtenir des cartes d'ICU médian à fine échelle dans de nombreuses zones urbaines encore non explorées. Ils constituent un nouveau levier très encourageant pour continuer la recherche en climat urbain car ils ouvrent la voie à l'exploration simultanée de villes aux morphologies et environnements régionaux variés. D'autres spécialistes des sciences atmosphériques s'empareront peut-être également de ces observations, en assimilation de données ou validation de modèles par exemple.

Remerciements : Nous remercions Yann Guillou et Nadine Aniot, qui ont joué les rôles d'intermédiaires avec les entreprises PSA et Continental (lors de la campagne de mesures) pour l'acquisition de données de véhicules connectés.

Bibliographie

- Bell, Z., S. L. Dance, and J. A. Waller, 2021: Exploring the characteristics of a vehicle-based temperature dataset for convection-permitting numerical weather prediction. *arXiv*, 2105.12526.
- Chapman, L., C. Bell, and S. Bell, 2017: Can the crowdsourcing data paradigm take atmospheric science to a new level? A case study of the urban heat island of London quantified using Netatmo weather stations. *Int. J. Climatol.*, **37** (9), 3597–3605.
- Dubreuil, V., H. Quénot, X. Foissard, and O. Planchon, 2011: Climatologie urbaine et îlot de chaleur urbain à Rennes. Ville et biodiversité : les enseignements d'une recherche pluridisciplinaire, P.Clergeau, Ed., Presses Universitaires de Rennes, 105–122.
- Dumas, G., V. Masson, J. Hidalgo, V. Edouart, A. Hanna, and G. Pujol, 2021: Co-construction of climate services based on a weather stations network: Application in Toulouse agglomeration local authority. *Clim. Serv.*, **24**, 100 274.
- Feichtinger, M., R. de Wit, G. Goldenits, T. Kolejka, B. Hollósi, M. Žuvela Aloise, and J. Feigl, 2020: Case-study of neighborhood-scale summertime urban air temperature for the city of Vienna using crowd-sourced data. *Urban Clim.*, **32**, 100 597.

- Fenner, D., F. Meier, B. Bechtel, M. Otto, and D. Scherer, 2017: Intra and inter local climate zone variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, *Germany. Meteorologische Zeitschrift*, **26**, 525–547.
- Knight, S., C. Smith, and M. Roberts, 2010: Mapping Manchester's urban heat island. *Weather*, **65** (7), 188–193.
- Laaidi, K., A. Zeghnoun, B. Dousset, P. Bretin, S. Vandentorren, E. Giraudet, and P. Beaudou, 2012: The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave. *Environ. Health Perspect.*, **120** (2), 254–259.
- Madelin, M., and V. Dupuis, 2019: Intensité et délimitation de l'îlot de chaleur urbain sur la région parisienne à partir de données participatives. XXXIIème Colloque International de l'AIC, *Le Changement Climatique, la variabilité et les risques climatiques*, 377-383.
- Marquès, E., Masson, V., Naveau, P., Mestre, O., Dubreuil, V., & Richard, Y. (2022). Urban heat island estimation from crowdsensing thermometers embedded in personal cars, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* (published online ahead of print 2022).
- Meier, F., D. Fenner, T. Grassmann, B. Jänicke, M. Otto, and D. Scherer, 2015: Challenges and benefits from crowd sourced atmospheric data for urban climate research using Berlin, Germany, as testbed. *ICUC9–9th Int. Conf. Urban Clim. jointly with 12th Symp. Urban Environ.*
- Muller, C., L. Chapman, S. Johnston, C. Kidd, S. Illingworth, G. Foody, A. Overeem, and R. Leigh, 2015: Crowdsourcing for climate and atmospheric sciences: current status and future potential. *Int. J. Climatol.*, **35** (11), 3185–3203.
- Napoly, A., T. Grassmann, F. Meier, and D. Fenner, 2018: Development and application of a statistically-based quality control for crowdsourced air temperature data. *Front. Earth Sci.*, **6**, 118.
- Oke, T. R., 2004: Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. *Citeseer*.
- Oke, T. R., G. Mills, A. Christen, and J. A. Voogt, 2017: *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Overeem, A., J. R. Robinson, H. Leijnse, G.-J. Steeneveld, B. P. Horn, and R. Uijlenhoet, 2013: Crowdsourcing urban air temperatures from smartphone battery temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, **40** (15), 4081–4085.
- Perkins-Kirkpatrick, S., and S. Lewis, 2020: Increasing trends in regional heatwaves. *Nat. Commun.*, **11** (1), 1–8.
- Pohl, B., and Coauthors, 2015: L'îlot de Chaleur Urbain de l'agglomération dijonnaise : campagne instrumentale in situ et modélisation climatique régionale haute résolution. *Workshop MISTRALS "Modélisation climatique régionale intégrée"*, Toulouse, France.
- Richard, Y., and Coauthors, 2018: How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Clim.*, **26**, 258–274.
- Richard, Y., and Coauthors, 2021: Is urban heat island intensity higher during hot spells and heat waves (Dijon, France, 2014–2019)? *Urban Clim.*, **35**, 100 747.
- Siems-Anderson, A., C. Walker, G. Wiener, W. Mahoney, and S. Haupt, 2019: An adaptive big data weather system for surface transportation. *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, **3**, 100 071.
- Stewart, I. D., and T. R. Oke, 2012: Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93** (12), 1879–1900.
- Varentsov, M. I., T. E. Samsonov, P. E. Kargashin, P. A. Korosteleva, A. I. Varentsov, A. A. Perkhurova, and P. I. Konstantinov, 2020: Citizen weather stations data for monitoring applications and urban climate research: an example of Moscow megacity. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **611**, 012 055.
- Venter, Z. S., O. Brousse, I. Esau, and F. Meier, 2020: Hyperlocal mapping of urban air temperature using remote sensing and crowdsourced weather data. *Remote Sens. Environ.*, **242**, 111 791.
- Zumwald, M., B. Knüsel, D. N. Bresch, and R. Knutti, 2021: Mapping urban temperature using crowd-sensing data and machine learning. *Urban Clim.*, **35**, 100 739.