



HAL
open science

Analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg (France)

Nathalia Philipps, Pierre Kastendeuch, Georges Najjar

► **To cite this version:**

Nathalia Philipps, Pierre Kastendeuch, Georges Najjar. Analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg (France). *Climatologie*, 2020, 17, pp.10. 10.1051/climat/202017010 . hal-03926485

HAL Id: hal-03926485

<https://hal.science/hal-03926485>

Submitted on 6 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg (France)

Nathalia Philipps^{*}, Pierre P. Kastendeuch et Georges Najjar

Laboratoire Icube (UMR 7357) – Université de Strasbourg, 67412 Illkirch Cedex, France

Résumé – Une analyse de la dynamique temporelle et de la distribution spatiale de l'îlot de chaleur urbain (ICU) strasbourgeois a été menée à l'aide d'un réseau de stations météorologiques réparties sur l'ensemble du territoire de l'agglomération strasbourgeoise. L'importante variabilité temporelle de l'ICU est illustrée non seulement à travers son comportement thermique journalier, mais également par le biais des fortes différences d'intensité selon les saisons et les types de temps. Favorisé lors de vents faibles et d'ensoleillement important, l'ICU se montre particulièrement intense durant les belles journées estivales, les moyennes pouvant localement atteindre un gain de cinq degrés lors du paroxysme nocturne. Concernant l'aspect spatial, les disparités entre stations soulignent une hétérogénéité de l'ICU essentiellement liée à la variabilité intrinsèque du milieu urbain. L'analyse statistique a ainsi mis en évidence le rôle de plusieurs paramètres morphologiques et d'occupation du sol, et par conséquent justifie pleinement la mise en place d'une classification en *Local Climate Zones* (LCZ) de l'Eurométropole de Strasbourg. La végétation apparaît comme étant un facteur de mitigation prééminent, notamment lorsqu'elle est présente de manière notable dans des zones densément bâties et fortement minéralisées. Concernant les paramètres relevant de la géométrie urbaine, les intensités moyennes d'ICU les plus élevées sont systématiquement mesurées dans les zones les plus densément bâties. Une nouvelle méthodologie de cartographie de l'ICU se basant sur les paramètres sous-jacents des LCZ est proposée. Cette carte permet l'obtention de valeurs pertinentes d'intensité de l'ICU en tout point du territoire.

Mots-clés : îlot de chaleur urbain / LCZ / végétation / géométrie urbaine / ΔT_{ur}

Abstract – **Titre en anglais** . The temporal dynamics and the spatial distribution of the urban heat island (UHI) in Strasbourg were analysed by using a substantial weather stations network which are distributed over the territory. The strong temporal variability of the phenomenon is illustrated both with regard to its diurnal variations and significant intensity differences according to seasons and weather conditions types. Most developed under cloudless and calm conditions, the UHI shows high magnitudes during sunny summer days, with means locally reaching up to 5°C at nocturnal peak. Regarding the spatial aspect, the intensity variations between the stations highlight the heterogeneity of the UHI, which is primarily explained by the diversity of urban forms. The statistical analysis has thus permitted to underscore the role of several morphological and land cover parameters, justifying the use of a Local Climate Zones (LCZ) classification of the Eurométropole of Strasbourg (EMS). The vegetation seems to have a predominant mitigation potential, in particular when it is notably planted in high-mineral, densely built-up areas. The strongest mean magnitudes are actually systematically measured in most built-up urban areas. This paper proposes a new mapping method for the spatialization of the UHI, which depends partly on LCZ parameters. The map presents relevant intensity values all over the metropolitan area.

Keywords: urban heat island / LCZ / vegetation / urban geometry / ΔT_{ur}

^{*} Auteur de correspondance : nathalia.philipps@etu.unistra.fr

Introduction

Dans un contexte de réchauffement climatique global, il est fort probable que les vagues de chaleur

seront amenées à être plus fréquentes, plus longues et plus intenses. D'ici la seconde moitié du 21^{ème} siècle, les températures relevées lors de la canicule de 2003 pourraient ainsi devenir la nouvelle norme

estivale (De Munck *et al.*, 2013). Les effets néfastes des vagues de chaleur seront davantage ressentis en ville, au sein desquelles le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) tend à exacerber le stress thermique engendré, entraînant de graves conséquences sanitaires pour les citoyens (Arnfield *et al.*, 2003 ; Zhao *et al.*, 2018).

La mise en place d'un ICU résulte en premier lieu de modifications de l'occupation du sol par rapport à la campagne environnante. Morphologie urbaine, propriétés thermiques des matériaux de construction et flux de chaleur anthropique sont autant d'aspects entraînant une hausse des températures en milieu urbain (Oke, 1995). Diverses stratégies de mitigation tentant d'agir sur ces facteurs sont actuellement mises en place par les villes, dans le cadre de politiques d'adaptation au changement climatique. La plupart sont centrées sur l'introduction de végétation, dont les effets d'atténuation ont déjà été l'objet de nombreuses publications (Spronken-Smith et Oke, 1998 ; Bowler *et al.*, 2010). Cependant les facteurs liés à la géométrie urbaine jouent également un rôle crucial dans l'établissement d'un ICU (Andreou, 2014), les rendant indissociables d'une politique de mitigation efficace.

Face à l'hétérogénéité du milieu urbain, il apparaît alors essentiel de mieux cerner l'influence de ces différentes variables sur le comportement de l'ICU. Visant à l'origine la comparaison entre études d'ICU de différentes villes à travers le monde, les Local Climate Zones (LCZ) (Stewart et Oke, 2012) peuvent également en améliorer la compréhension à l'échelle intra-urbaine. Les 17 types de LCZ existants reposent en effet sur une dizaine de caractéristiques relevant aussi bien de l'occupation du sol que de la morphologie urbaine, et permettent ainsi de prédire l'intensité de l'ICU au sein d'une zone donnée, tout en soulignant le rôle de chaque paramètre dans la mise en place du processus. Or si des cartographies LCZ ont été mises en place pour diverses villes, peu d'études ont encore directement employé les valeurs des paramètres composant les LCZ dans l'objectif de cartographier l'ICU sur un territoire donné.

Cette étude se propose de fournir une analyse statistique de la variabilité de l'ICU strasbourgeois,

portant aussi bien sur sa dynamique temporelle que sur sa distribution spatiale. Elle vise à obtenir un aperçu de son intensité au sein d'un type de zone urbaine donné, et ainsi à mettre en évidence le rôle de plusieurs variables géométriques et d'occupation du sol dans une optique d'amélioration des stratégies de mitigation existantes. L'analyse se conclut par une nouvelle méthodologie de cartographie de l'ICU s'appuyant sur les paramètres sous-jacents des LCZ et les travaux d'Unger (2006).

1. Site d'étude, matériel et méthodes

1.1. Présentation de la zone d'étude et des sites de mesures

Agglomération composée de 33 communes, l'Eurométropole de Strasbourg (EMS) occupe une superficie de 340 km² et regroupe plus de 491 000 habitants (chiffres INSEE 2016). Localisée dans le nord-est de la France (48,583°N - 7,745°E ; figure 1a), elle présente un climat tempéré de type Cfb dégradé d'après la classification actualisée de Köppen-Geiger. La température moyenne y est de 10,9°C, avec un minimum et un maximum mensuels moyens respectifs de 1,8°C en janvier et 20,1°C en juillet (normales climatiques 1981-2010, Météo France). Les précipitations annuelles cumulées atteignent 665 mm, le minimum de 32,2 mm se présentant en janvier et le maximum de 81,9 mm en mai. En outre, l'EMS bénéficie d'un contexte topographique la prédisposant aux études de climatologie urbaine, avec un très faible dénivelé (10 m au maximum) et une situation quasi-plane.

L'agglomération dispose d'un réseau de plus d'une trentaine de stations météorologiques déployées sur l'ensemble de son territoire (figure 1b). Trois organismes se partagent leur gestion : Météo France, ATMO Grand Est et le laboratoire Icube. Celles dépendant des deux premières structures sont des stations permanentes, tandis que les autres ont été installées durant une campagne de mesures menée par l'équipe TRIO d'Icube entre 2013 et 2016, dans le cadre d'un projet de recherche visant à comprendre et modéliser la réponse de la zone urbaine strasbourgeoise aux conditions climatiques imposées (Najjar *et al.*, 2015).



Figure 1. a) Localisation de la ville de Strasbourg en France. b) Carte des 15 stations utilisées (sources des données : réseaux ICube, ATMO Grand Est et Météo France. Sources des photos : Google Map, Colin J pour ICube, Strasbourg).
Titre en anglais.

Les stations occupent des zones aux caractéristiques géométriques et d'occupation du sol variées. Certaines sont ainsi associées à un milieu urbain extrêmement minéral (stations situées au centre-ville comme la station Kléber), tandis que d'autres se situent au niveau de parcs urbains (stations du Jardin Botanique et du Jardin du Palais U) ou au sein du milieu rural (station d'Entzheim).

1.2. Matériel et méthodes

Afin d'obtenir une robustesse statistique la plus conséquente possible, seules cinq stations permanentes disposant d'une période de mesures étendue ont été sélectionnées pour la première partie de l'étude. Les données horaires de température de l'air (°C) recouvrent ainsi sept

années pleines (2013-2019), et sont mesurées à 1,5 m au-dessus du sol avec des capteurs électriques à résistance de platine fonctionnant avec la précision requise pour les standards météorologiques. Installée sur un toit d'un bâtiment à 20 m de hauteur, la DRIRE est la seule à déroger à la règle. Or les données de ce site ont été comparées avec celles d'une autre station dotée d'une période de mesures bien moins longue, aux caractéristiques similaires mais installée au niveau de la chaussée, et ont présenté un comportement proche avec un coefficient de corrélation (r) de 0,999 et une erreur-type (ET) de 0,367°C (Kastendeuch *et al.*, 2019).

L'intensité de l'ICU (ΔT_{ur}) à un instant t est obtenue en soustrayant la température de la station urbaine à celle de la station rurale de référence. Les

écarts horaires de température sont ainsi systématiquement calculés entre une station x et celle d'Entzheim, donnant l'intensité de l'ICU (°C)

mesurée au niveau de la première :

$$\Delta T_{ur}(t) = T_{Station\ x}(t) - T_{Station\ Entzheim}(t)$$

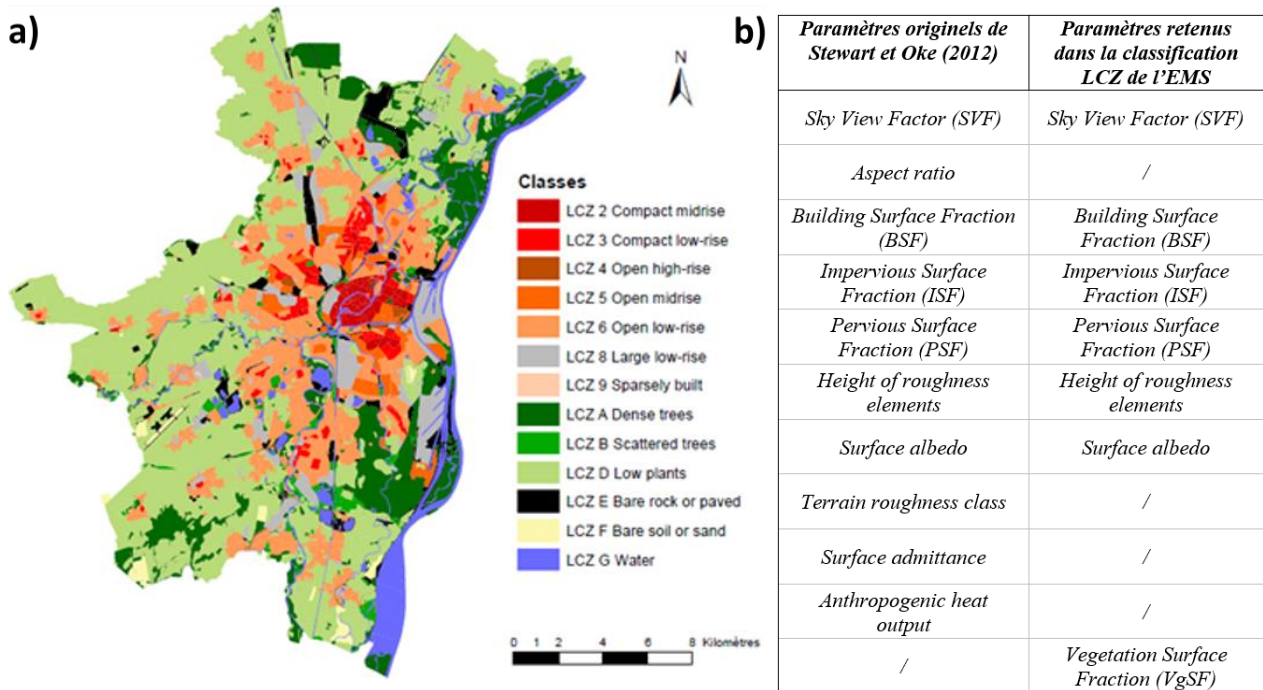


Figure 2. a) Cartographie LCZ de l'EMS (Montauban, 2019). b) Paramètres employés pour la classification LCZ de l'EMS comparés à ceux définis par Stewart & Oke (2012). *Titre en anglais.*

La figure 2a présente la classification LCZ de l'EMS obtenue par Montauban (2019) d'après Stewart et Oke (2012). Outre six des dix paramètres définissant chaque LCZ (figure 2b), il a été choisi d'y ajouter le pourcentage de surface végétalisée (VgSF), permettant ainsi d'opérer une distinction supplémentaire entre stations appartenant à un même type de LCZ et de mettre en évidence le rôle de la végétation dans la spatialisation de l'ICU. Celle-ci est illustrée à travers une cartographie basée sur la mise en place d'une régression linéaire multiple (MLR) entre l'intensité maximale moyenne de l'ICU ($\Delta T_{ur\ max\ moyen}$) et les paramètres LCZ.

Contrairement à l'aspect temporel de l'ICU analysé via l'étude de quatre couples sur sept ans, la mise au point de cette cartographie repose sur dix-sept stations urbaines étudiées sur une période d'une vingtaine de jours de l'année 2015. Afin d'obtenir un $\Delta T_{ur\ max\ moyen}$ en tout point de l'EMS, plusieurs équations de MLR sont calculées

avec le logiciel SAGA GIS à l'aide des valeurs des paramètres LCZ de chaque station. Leur qualité variant fortement en fonction des paramètres introduits en prédicteurs, seule la MLR au coefficient de détermination le plus élevé ($R^2 = 0,71$) a été retenue. Le $\Delta T_{ur\ max}$ moyen calculé pour cette étude dépend ainsi uniquement du BSF (fraction de surface bâtie), de l'ISF (fraction de surface imperméable) et du VgSF. Il est alors possible d'en calculer une valeur théorique pour chaque polygone LCZ de l'EMS en appliquant l'équation de régression. Un lissage des résultats obtenus est effectué via une moyenne mobile afin d'éviter les transitions trop abruptes entre deux LCZ voisines.

2. Variabilité temporelle de l'ICU strasbourgeois

De nombreuses études concernant des villes issues de zones climatiques très différentes ont déjà

mis en évidence le cycle journalier de l'ICU et sa prédominance nocturne. Or chaque cité dispose d'une combinaison unique de facteurs climatiques, morphologiques et géographiques pouvant occasionner quelques différences au niveau de la survenue de l'intensité maximale ou minimale horaire du phénomène (Eastin *et al.*, 2018). Quatre stations, en plus de la station rurale d'Entzheim (Météo France, LCZ B), illustrent la variabilité temporelle de l'ICU strasbourgeois sur la période 2013-2019 : DRIRE (ATMO Grand Est, LCZ 2), Botanique (Météo France, LCZ 2 végétalisée), Neudorf (ATMO Grand Est, LCZ 3) et Schiltigheim (ATMO Grand Est, LCZ 6). Cette variabilité est analysée à travers son évolution horaire journalière, puis du point de vue saisonnier avant d'être liée aux différents types de temps.

2.1. Dynamique moyenne journalière et saisonnière

L'opposition entre comportement diurne et nocturne de l'ICU apparaît clairement à travers les courbes du ΔT_{ur} horaire moyen de la figure 3a : l'intensité maximale moyenne est atteinte aux alentours de minuit pour toutes les stations, quel que soit leur type de LCZ. Le processus s'amplifie après le coucher du soleil, moment à partir duquel la zone rurale se refroidit nettement plus vite que le milieu urbain, et décline progressivement lors du lever du jour. En période diurne, le milieu rural tend à se réchauffer plus vite du fait d'un ombrage réduit et de l'importante inertie thermique des matériaux des zones urbaines, réduisant significativement les écarts de température entre ville et campagne. Cela peut même conduire à la survenue d'un îlot de fraîcheur urbain (IFU), y compris pour des zones très minéralisées en centre-ville. Un premier aperçu de l'hétérogénéité spatiale de l'ICU est souligné ici, avec une intensité nocturne en moyenne plus importante pour les stations au caractère urbain prononcé.

Ce cycle journalier en apparence régulier ne doit pas masquer l'importante variabilité de l'heure d'apparition ou de disparition de l'ICU (figure 3b) : celui-ci peut en effet survenir à n'importe quel moment de la journée, voire même atteindre son maximum en plein jour (Najjar, 2006). D'autres

aspects sont à prendre en compte, notamment le facteur saisonnier.

L'hétérogénéité saisonnière mesurée au niveau de Neudorf (figure 3c) révèle des courbes ayant une forme similaire à celle du ΔT_{ur} horaire moyen annuel, les principales différences concernant essentiellement l'amplitude du phénomène. Le printemps et l'automne enregistrent ainsi un ICU maximal moyen similaire, de l'ordre de $1,9^{\circ}\text{C}$. La saison vernale présente également un léger IFU matinal ($-0,1^{\circ}\text{C}$). Apparaissant comme une exacerbation des saisons d'équinoxes, l'été se caractérise à la fois par l'ICU maximal moyen le plus intense ($\sim 2,6^{\circ}\text{C}$) et un IFU moyen plus long et plus prononcé ($\sim -0,3^{\circ}\text{C}$) que son pendant printanier. La courbe du ΔT_{ur} horaire moyen hivernal est la seule à présenter une forme différente. La relative homogénéité des valeurs (moins de 1°C de différence entre le maximum et le minimum), ainsi que la persistance d'un ICU matinal, peuvent résulter de deux phénomènes : la hausse saisonnière des émissions de chaleur anthropique provoquée par le regain d'utilisation du chauffage, et la présence notable de conditions météorologiques défavorables à l'installation d'un ICU. Or ni l'intensité, ni l'heure d'apparition ou de disparition du processus (figure 3d) ne peuvent être expliquées par le seul facteur saisonnier. Le fait que les ΔT_{ur} moyens les plus élevés se produisent davantage durant les nuits estivales, période la plus propice aux belles journées, souligne surtout l'importance du lien entre type de temps et intensité de l'ICU.

2.2. Variabilité de l'ICU en fonction des conditions météorologiques

De nombreuses études ont déjà mis en évidence le rôle de la nébulosité et de la vitesse du vent sur l'ICU moyen (Cantat, 2004). Quatre types de temps sont abordés ici afin de démontrer l'influence prépondérante de ces deux paramètres sur son intensité (figure 4a). Nous avons choisi de définir les jours de beau temps, favorables au développement d'un ICU, comme étant caractérisés par une fraction d'insolation (FIN) supérieure ou égale à 80 % et une vitesse moyenne de vent inférieure ou égale à 3 m.s⁻¹.

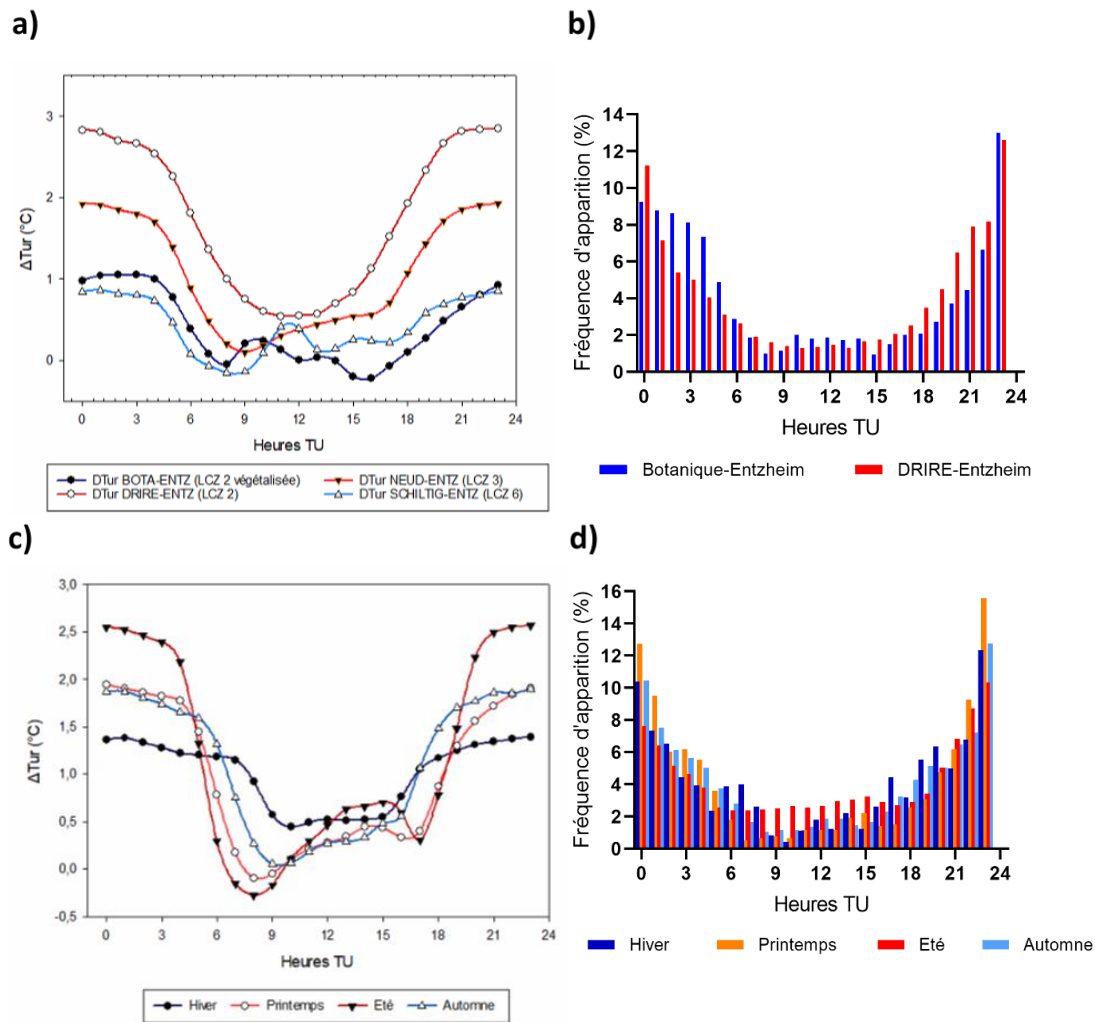
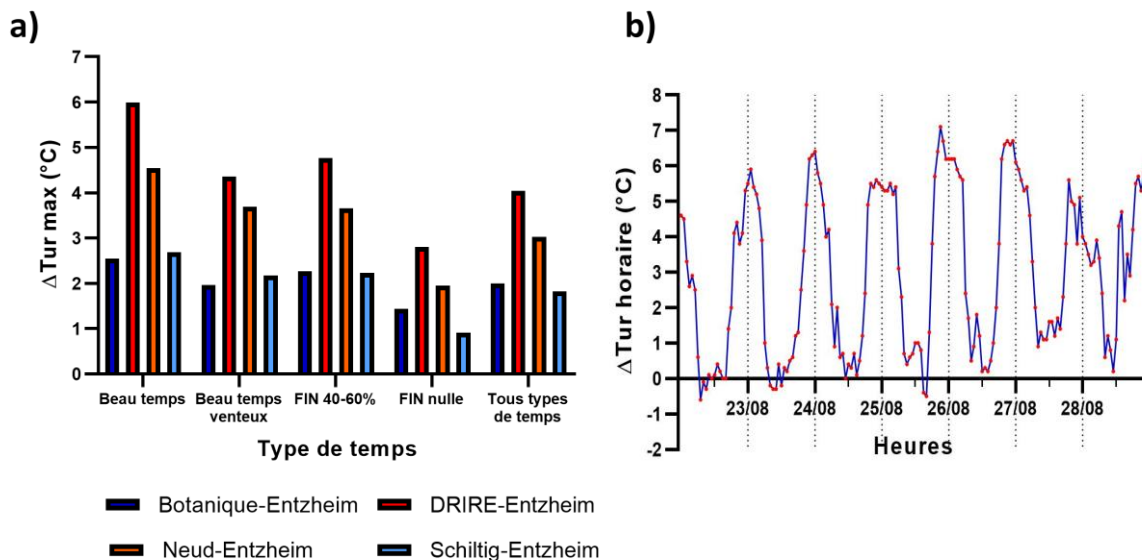


Figure 3. a) Intensité moyenne de l'ICU en fonction de l'heure. b) Fréquence d'apparition horaire du ΔT_{ur} max pour Botanique et DRIRE. c) Moyennes saisonnières de l'intensité horaire de l'ICU pour Neudorf-Entzheim. d) Fréquence d'apparition du ΔT_{ur} max en fonction de l'heure et la saison pour Neudorf-Entzheim. *Titre en anglais.*

L'ICU maximal moyen diminue en même temps que la FIN, en particulier pour les stations à caractère urbain marqué. Le ΔT_{ur} max moyen de la DRIRE passe en effet d'une valeur de près de 6°C lors de belles journées à 2,81°C sous un ensoleillement absent. A l'opposé, seule une différence de 1,12°C sépare ces deux valeurs pour Botanique. La vitesse journalière moyenne du vent exerce également un rôle considérable dans la mitigation de l'ICU puisqu'à ensoleillement égal, elle permet lorsqu'elle est assez forte une diminution notable du ΔT_{ur} max moyen (plus de 1,6°C pour la DRIRE). Lors d'une succession de

journées de beau temps (figure 4b), ce paramètre apparaît même comme étant un facteur limitant la dissipation de l'ICU : outre un effet d'accumulation visible entraînant une augmentation progressive du ΔT_{ur} max durant la période du 22 au 27 août 2019 (passant de 4,3°C à plus de 6,5°C les deux derniers jours), il subsiste un fort ICU lors de la journée du 28 août, présentant pourtant une FIN relativement basse (30,5 %). Or la faible vitesse de vent relevée (1,47 m/s) semble avoir permis au phénomène de persister malgré l'occurrence d'un type de temps a priori défavorable à son maintien.



bien davantage ($R^2 = 0,43$). Il s'avère que ces stations ont soit un VgSF important mais une fraction de surface perméable (PSF) très faible doublée d'un BSF non négligeable, soit la situation inverse. Plus que le rôle distinct de chacun de ces paramètres, ce sont ainsi les différentes combinaisons qui vont exercer une influence plus ou moins forte sur l'ICU, justifiant pleinement le recours aux LCZ.

Le test de l'Anova confirme les tendances thermiques significativement distinctes des stations

de la figure 5c, chacune associée à un type de LCZ donné. Les moyennes du ΔT_{ur} horaire corroborent sans surprise les intensités d'ICU plus élevées des LCZ les plus minéralisées et au bâti dense (types 2 et 3). Malgré son appartenance à une LCZ 2, Botanique se comporte davantage comme les stations CAD (LCZ 8) ou NIED (LCZ 6). La différence avec la DRIRE est hautement significative (plus de 4°C de différence aux alentours de 23 h TU) et illustre une importante variabilité intra-LCZ.

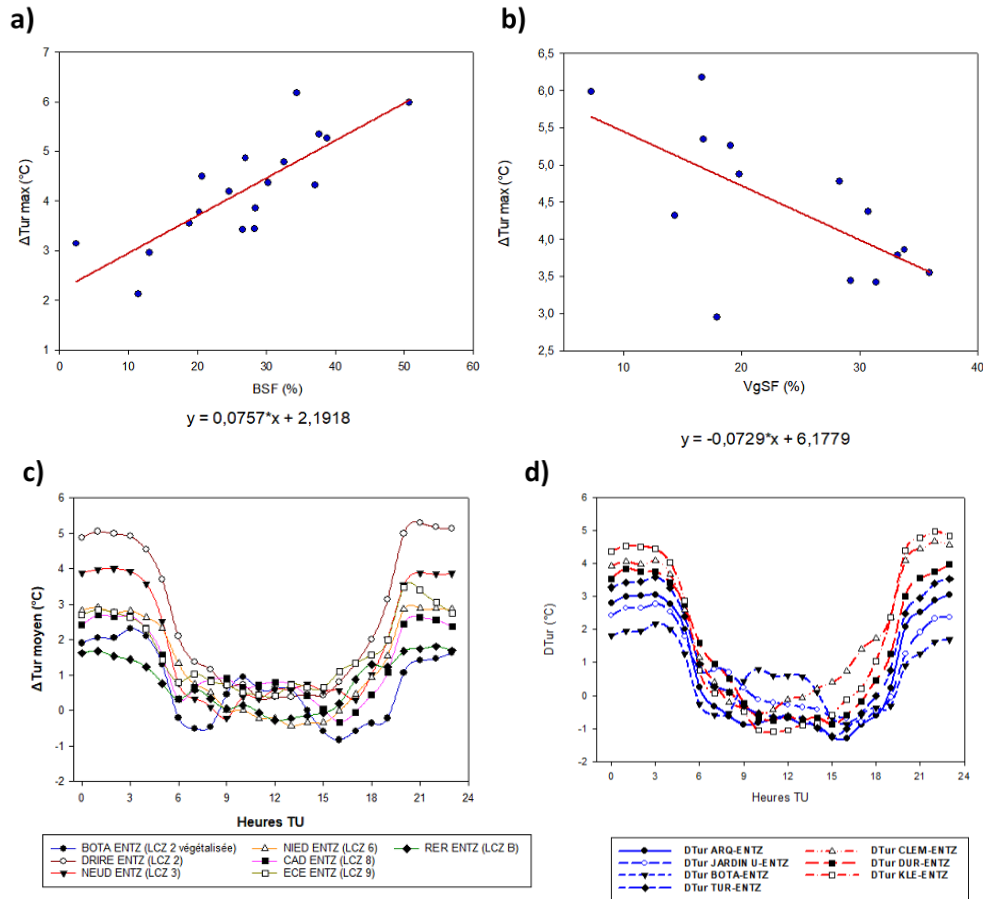


Figure 5. a) Régression linéaire $\Delta T_{ur \max}$ - BSF. b) Régression linéaire $\Delta T_{ur \max}$ - VgSF. c) Intensité moyenne de l'ICU en fonction de l'heure sur la période de beau temps 2015 : variabilité inter-LCZ. d) Intensité moyenne de l'ICU en fonction de l'heure sur la période de beau temps 2015 : variabilité intra-LCZ pour les LCZ 2. **Titre en anglais.**

La persistance d'une variabilité intra-LCZ est particulièrement mise en évidence au niveau des stations de l'étude appartenant au type 2 (figure 5d). Le potentiel de mitigation de la végétation apparaît très distinctement pour ce type de LCZ, de base propice à l'installation d'un ICU important. Or les quatre stations LCZ 2 les plus végétalisées (VgSF \geq

29 %, en bleu) présentent non seulement des valeurs nocturnes d'ICU beaucoup plus faibles que celles l'étant moins (en rouge), mais aussi des changements concernant l'apparition et la durée du phénomène d'IFU. Celui-ci peut ainsi démarrer en milieu d'après-midi, représentant une possibilité d'atténuation du stress thermique non négligeable.

Ne remettant nullement en cause la pertinence des LCZ, la variabilité intra-LCZ montre qu'en agissant sur certains paramètres (ici la végétation), il est possible de modifier le comportement thermique d'une zone urbaine et de mitiger localement l'ICU.

3.2. Cartographie de l'ICU strasbourgeois

Obtenue via la méthode décrite précédemment, la cartographie de l'ICU moyen maximum journalier (figure 6a) dépend entièrement de la qualité de la MLR et des valeurs prises par les paramètres LCZ sur l'ensemble du territoire. Les résultats permettent une distinction aisée des comportements thermiques de zones urbaines types comme le centre-ville, ainsi que la mise en évidence de certaines zones davantage périphériques mais présentant un ICU important. Or chaque polygone étant doté d'une unique valeur de ΔT_{ur} max moyen, beaucoup de transitions très abruptes et irréalistes (pouvant aller jusqu'à 8°C de différence) subsistent au niveau des limites entre deux LCZ. Le lissage par moyenne mobile (figure 6b) atténue de manière

notable cet effet. La pertinence de cette cartographie a été éprouvée via la comparaison du ΔT_{ur} max moyen mesuré d'une dix-huitième station urbaine, volontairement non-intégrée dans la MLR, avec celui prédit par la méthode. Le modèle cartographique diffère très peu de la mesure effectuée (ΔT_{ur} max cartographie = 4,14°C ; ΔT_{ur} max mesuré = 4,38). Ce type de cartographie constituerait de ce fait un outil potentiel efficace d'aide à la décision destiné aux urbanistes et aménageurs dans le cadre d'une volonté de mitigation de l'ICU.

Plusieurs limites persistent cependant pour cette première carte. Celle-ci repose ainsi sur une période d'une vingtaine de jours à peine, représentant un faible échantillon numérique et de ce fait une robustesse statistique amoindrie. Le fait qu'il s'agisse de la période recoupant le maximum de stations souligne également la nécessité de disposer d'un réseau météorologique le plus conséquent possible, et de préférence permanent, afin d'obtenir des MLR de qualité.

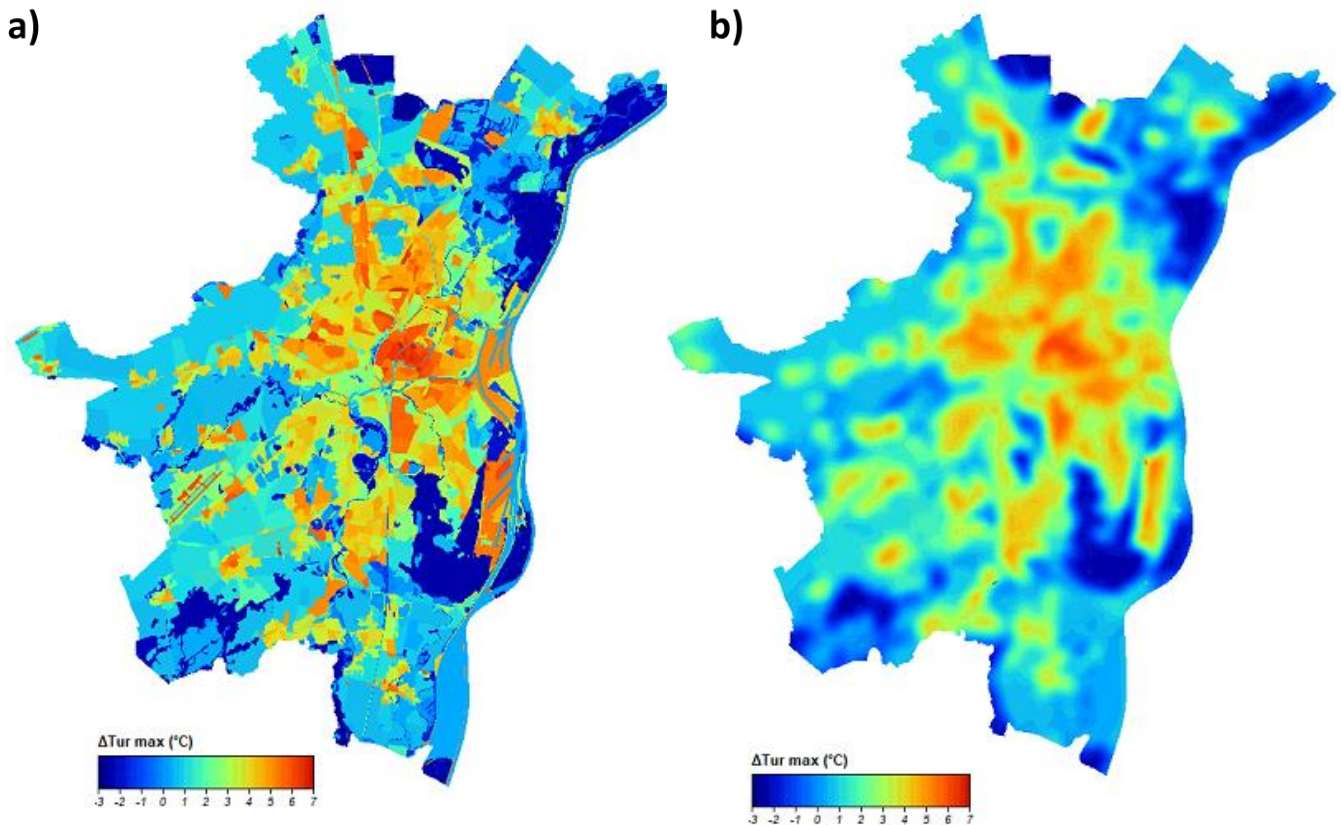


Figure 6. a) Cartographie originelle de l'ICU moyen maximum journalier, sans lissage. b) Cartographie de l'ICU moyen maximum journalier, avec lissage par moyenne mobile. *Titre en anglais.*

Conclusion

L'analyse de la variabilité temporelle de l'ICU strasbourgeois révèle que celui-ci connaît sa forme la plus intense lors des nuits calmes dénuées de nébulosité, à l'image de nombreuses autres villes à travers le monde. Malgré l'hétérogénéité saisonnière notable, les conditions météorologiques synoptiques restent le facteur temporel prépondérant dans sa mise en place et sa disparition. L'augmentation de la durée et de la fréquence des vagues de chaleur, couplée ainsi à une succession plus longue de journées propices au phénomène, augmentera fortement le risque de survenue d'un ICU particulièrement fort.

Dans l'étude de la distribution spatiale de l'ICU strasbourgeois, les LCZ se sont avérées être un outil fort pertinent, tant sur le volet statistique que sur la mise en place d'une cartographie à l'échelle d'un territoire métropolitain. Le potentiel de mitigation de la végétation, bien illustré à travers l'analyse d'une importante hétérogénéité au sein d'un type de LCZ, apparaît comme étant amélioré lorsque ce facteur s'inscrit dans une combinaison de paramètres favorable. Une atténuation optimale de l'ICU passera ainsi obligatoirement par une considération de l'ensemble des variables en jeu, notamment celles liées à la densité de bâti et à la perméabilité des sols, la végétation seule ne suffisant guère à compenser une morphologie propice au phénomène.

Cette cartographie de l'ICU peut être prometteuse, notamment en matière d'estimation de son intensité au niveau de zones dénuées de stations de mesures. Cependant, elle nécessite plusieurs améliorations, en particulier concernant le paramétrage du lissage par moyenne mobile, ainsi qu'une validation plus rigoureuse. Outre l'établissement de nouvelles cartographies de l'ICU, il serait alors possible d'étendre cette méthodologie à d'autres variables climatiques, voire aux indices de confort thermique.

Références

Andreou E., 2014. The effect of urban layout, street geometry and orientation on shading conditions in urban canyons in the Mediterranean. *Renewable Energy*, 63, 587-596.

Arnfield J. A., 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23 (1), 1-26.

Bowler D. E., Buyung-Ali L., Knight T. M., Pullin A. S., 2010. Urban greenings to cool towns and cities, a systematic review of the empirical evidence. *Landscape and urban planning*, 97 (3), 147-155.

Cantat O., 2004. L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, 191.

De Munck C., Pigeon G., Masson V., Meunier F., Bousquet P., Tréméac B., Merchat M., Poeuf P., Marchadier C., 2013. How much air conditioning can increase air temperatures for a city like Paris? *International Journal of Climatology*, 33, 210-227.

Eastin M. D., Baber M., Boucher A., Di Bari S., Hubler R., Stimac-Spalding B., Winesett T., 2018. Temporal variability of the Charlotte (sub)urban heat island. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57, 81-102.

Hu Y., White M., Ding W., 2016. An urban form experiment on urban heat island effect in high density area. *Procedia Engineering*, 169, 166-174.

Kastendeuch P., Najjar G., Philipps N., 2019. Ilot de sécheresse et d'humidité à Strasbourg (France). *Climatologie*, 16, 72-90.

Leconte F., Bouyer J., Claverie R., Pétrissans M., 2015. Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: evaluation of the method using mobile measurements. *Building and Environment*, 83, 39-49.

Montauban O., 2019. *Une approche vectorielle pour classifier des données images et vecteurs dans le but d'extraire une cartographie des Local Climate Zones des quartiers de Strasbourg*. PFE, INSA Strasbourg.

Najjar G., 2006. *Etudes méso-climatiques en milieu hétérogène : de la moyenne montagne à la ville*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université Louis Pasteur, Strasbourg I.

Najjar G., Colin J., Kastendeuch P., Ngao J., Saudreau M., Landes T., Améglio T., Luhache R., Guillemin S., Schreiner G., Kleinpeter J., Nerry F., 2015. *A three years long fieldwork experiment to monitor the role of vegetation on the urban climate of Strasbourg, France*. 9th International Conference on Urban Climate, ICUC9, Toulouse, France, 6p

Oke T., 1981. Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations. *Journal of Climatology*, 1, 237-254.

Oke T., 1995. The heat island of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects. *Nat. Adv. Sci. Inst. Ser.*, 277, 81-107.

Spronken-Smith R. A. et Oke T., 1998. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (11), 2085-2104.

Stewart I. D. et Oke T. R., 2012. Local Climate Zones for

Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879-1900.

Unger J., 2006. Modelling of the annual mean maximum urban heat island using 2D and 3D surface parameters. *Climate Research*, 30 (3), 215-226.

Zhao L., Oppenheimer M., Qing Z., Baldwin J. W., Ebi K. L, Bou-Zeid E., Guan K., Liu X., 2018. Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 13 (3).

Citation de l'article : Philipps N., Kastendeuch P. P. et Najjar G., 2020. Analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg (France). *Climatologie*, 17, 10.