



HAL
open science

Mesure et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'aire urbaine de Metz Métropole

Nassima Hassani, Gilles Drogue

► **To cite this version:**

Nassima Hassani, Gilles Drogue. Mesure et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'aire urbaine de Metz Métropole : premiers résultats de la campagne de mesure 2019. *Climatologie*, 2020, 17, pp.8. 10.1051/climat/202017008 . hal-02547065v2

HAL Id: hal-02547065

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02547065v2>

Submitted on 7 Nov 2020

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

MESURE ET SPATIALISATION DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN DANS L'AIRE URBAINE DE METZ METROPOLE : PREMIERS RESULTATS DE LA CAMPAGNE DE MESURE 2019

Nassima HASSANI et Gilles DROGUE

Université de Lorraine, LOTERR, F-57000 Metz, France (nassima.hassani@univ-lorraine.fr)

Résumé

Cet article s'intéresse à la mesure et à la cartographie de l'îlot de chaleur urbain (ICU) dans la couche de canopée urbaine au sein de l'aire urbaine de Metz Métropole entre juin et septembre 2019. L'ICU a été suivi à partir d'un réseau de 23 stations météorologiques fixes permettant d'observer en continu la température de l'air à 3 m du sol. Les sites d'observation ont été soigneusement sélectionnés de façon à être représentatifs de différents types d'environnement (urbain, suburbain et périurbain) et typologies de revêtement (surfaces imperméables bitumées, surfaces végétalisées, étendues d'eau, etc.). L'objectif est d'évaluer les propriétés spatiales et temporelles de l'ICU au cours de cette période remarquablement chaude, et de déterminer son intensité à partir des données relevées en continu par le réseau de mesure. La période d'observation est particulièrement intéressante dans la mesure où elle se caractérise par la survenue des deux séquences caniculaires (25-30 juin et 21-26 juillet), offrant la possibilité de mieux comprendre le comportement thermique du tissu urbain et la dynamique de l'ICU local lors d'extrêmes chauds. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence un ICU de l'ordre de 3°C en moyenne au sein des zones densément urbanisées, pouvant atteindre 7,1°C en situation caniculaire ce qui est conforme au modèle prédictif de Oke (1973) fondé sur la relation population-ICU en Europe. Une importante présence de végétation est toutefois susceptible de réduire son intensité et ses effets contrairement aux étendues d'eau qui, la nuit, ne semblent pas jouer le rôle de puits de fraîcheur.

Mots-clés : ICU d'été, température de l'air, canicule, végétation, Metz Métropole.

Abstract : MEASUREMENT AND SPATIALIZATION OF THE URBAN HEAT ISLAND IN THE METZ METROPOLE URBAN AREA: FIRST RESULTS OF THE 2019 MEASUREMENT CAMPAIGN

This paper focuses on the measurement and mapping of the urban heat island (UHI) in the urban canopy layer within the Metz Metropole urban area between June and September 2019. The UHI was monitored using a network of 23 weather stations allowing continuous observations of the air temperature at 3 m above ground level. These observation sites were carefully selected so as to be representative of different types of environment (urban, suburban and periurban) and pavement typologies (asphalt impervious surfaces, vegetalized surfaces, bodies of water, etc.). The purpose is to evaluate the spatial and temporal properties of the summer UHI during this remarkably hot period, and to determine its intensity from the data continuously collected by the measurement network. The observation period is of particular interest as it is characterized by the occurrence of the two heat waves (June 25th-30th and July 21st-26th), offering the opportunity to better understand the thermal behavior of the urban fabric and the dynamics of the local UHI during hot extremes. The results obtained revealed an UHI of around 3°C on average in densely urbanized areas, reaching 7,1°C in a heat wave situation, which is in line with the predictive model of Oke (1973) based on the population-UHI relationship in Europe. However, a high presence of vegetation is likely to reduce its intensity and effects, unlike bodies of water, which do not seem to act as a cool sink at night.

Keywords : summer UHI, air temperature, heatwave, vegetation, Metz Métropole.

Introduction

L'urbanisation intense et rapide des territoires a pour effet général de modifier le climat local en créant un milieu bâti, rugueux, dense, carencé en eau et en végétation, où des rejets chauds et des polluants sont dégagés par les activités anthropiques. En outre, l'artificialisation des sols qui en résulte ralentit les processus essentiels d'évaporation et de transpiration végétale qui jouent le rôle de climatiseurs passifs (Escourrou, 1981; Cantat, 2004; Amorim *et al.*, 2009; Oke *et al.*, 2017). Ces spécificités du milieu urbanisé entraînent la formation d'un « îlot de chaleur urbain » (ICU). L'ICU est un phénomène climatique observé en toute saison en milieu tempéré, mais il est surtout intense l'hiver et l'été (Cantat, 2004). Au cours de l'été, il se manifeste essentiellement la nuit par temps calme et ciel clair après une journée chaude et ensoleillée. Un dôme d'air plus chaud couvrant la ville induit alors un gradient de température nocturne négatif opposant les centres-villes et le milieu rural environnant (Oke, 1987). Par temps très chaud, l'anomalie thermique peut atteindre plusieurs degrés Celsius en fin de nuit sous l'effet d'un refroidissement plus lent entre le centre de la ville et sa périphérie. L'intensité et l'extension spatiale de l'ICU dépendent du site de la ville, de son relief, de sa morphologie (forme et densité urbaine, nature et couleur des matériaux et revêtements), des activités humaines et des types de temps (Oke, 1987; Cantat, 1989; Lee, 1992).

L'ICU d'été est un enjeu socio-environnemental de premier plan : il a des conséquences sur la santé humaine, puisqu'il contribue en période de vague de chaleur, à créer un inconfort thermique surtout ressenti la nuit par les populations sensibles à la chaleur (personnes atteintes de maladies chroniques, jeunes enfants, femmes enceintes et personnes âgées). Il peut entraîner une surmortalité urbaine qui est d'ailleurs liée à l'effet synergique entre l'ICU et les polluants de l'air (Besancenot, 1995; Janoueix-Yacono, 1995). Pour s'en prémunir, les populations ont le plus souvent recours à la climatisation, mais celle-ci peut alors générer des rejets chauds dans l'air extérieur (Masson, 2017). L'ICU, qui se prépare en journée, contribue également à une surconsommation en eau du fait du recours à l'eau potable pour se rafraîchir en ville (arrosage des chaussées, miroirs d'eau, etc.) et pour hydrater les aménagements végétalisés.

Plusieurs villes et métropoles dans le monde ont fait l'objet de mesures de température l'air pour poser un diagnostic de l'ICU telles que Birmingham (Tomlinson *et al.*, 2013), Florianópolis (Da Rocha *et al.*, 2019), Sfax (Dahech, 2012), Séoul (Lee *et al.*, 2016), Nanjing (Yang *et al.*, 2020), Sydney (Yun *et al.*, 2020), Rennes (Foissard, 2015), Dijon (Richard *et al.*, 2018), Lyon (Renard et Alonso, 2019) ou encore Nancy (Leconte, 2014).

En France, leur gouvernance s'interroge aujourd'hui, dans le cadre de la politique nationale d'adaptation au changement climatique, sur les stratégies de développement local à adopter en vue de compenser les effets de la surchauffe urbaine, qu'ils soient de nature sanitaire, ou qu'ils concernent la consommation de ressources énergétique et hydrique (voir par exemple Hidalgo et Bretagne, 2016). C'est le cas également de Metz Métropole qui a souhaité participer techniquement et être pleinement intégrée aux activités de recherche présentées dans la suite de cet article. En effet, l'expertise apportée par ces activités porte sur des champs d'application multiples en matière de développement local et contribue à de nombreuses politiques publiques de la collectivité tels que la végétalisation, l'aménagement des espaces publics ou encore la biodiversité.

Dans ce contexte, notre article vise à présenter les premiers résultats issus de l'observation de l'ICU dans la couche de canopée urbaine sur le territoire de Metz Métropole. Les données exploitées ont été collectées par un réseau de stations météorologiques nouvellement implantées

sur ce territoire au début de l'été 2019, qui fut historiquement chaud en Europe de l'Ouest. L'objectif est d'évaluer la variabilité intra-saisonnière de l'ICU au cours de l'été météorologique, de mettre en relation ICU et tissus urbains et enfin d'analyser la relation entre ICU et canicule.

Le travail présenté dans cet article ne représente qu'une partie des investigations menées pour diagnostiquer l'ICU au niveau de la métropole de Metz. D'autres approches quantitatives sont déployées telles que les mesures mobiles *in situ*, les thermographies par imagerie satellitaire et drone. Il est également prévu de mener une enquête de perception du risque caniculaire auprès des habitants et des décideurs publics destinée à évaluer la perception des ICU par les usagers, leur degré d'intégration dans les projets d'aménagement urbains et dans les stratégies d'adaptation au changement climatique.

1. Zone d'étude

La métropole de Metz est située en région Grand Est, dans le quart nord-est de la France (figure 1). Elle compte environ 220 000 habitants répartis dans 44 communes (Insee, 2016), et s'étend sur 306 km². Elle est traversée par deux cours d'eau : la Moselle et la Seille. Selon la classification de Köppen-Geiger (Eveno et *al.*, 2016), l'aire urbaine de Metz connaît un climat tempéré chaud de type *Cfb/Csb*, avec des hivers relativement froids et des étés relativement chauds. Sur la normale 1981-2010, les précipitations annuelles sont de l'ordre de 758 mm et la température moyenne annuelle s'élève à 10,7°C. Le mois de juillet est le plus chaud de l'année avec une moyenne de 19,6°C et un record sous abri de 39,7°C, enregistré le 25 juillet 2019 (voir <https://donneespubliques.meteofrance.fr/>).

2. Réseau d'observation de l'ICU

Depuis le 15 juin 2019, la métropole de Metz est maillée par un réseau de mesure géré par le Centre de recherches en géographie de l'université de Lorraine (LOTERR) comportant 21 stations météorologiques connectées (soit une densité spatiale de 1 station pour 15 km²). Celles-ci sont implantées sur cinq communes de l'agglomération (figure 1), dont la commune de Metz équipée de 14 stations. L'ensemble des stations forme le *Réseau de Mesures Thermo-Hygrométriques de l'agglomération de Metz (REMTHAM)*. Chaque station météorologique est constituée d'une sonde thermo-hygrométrique de marque HOBO U23 placée dans un abri anti-radiation normalisé de marque Davis. Celui-ci est fixé sur un candélabre ou un poteau électrique à 3 m du sol (pour limiter le vandalisme et le risque de vol) et orienté au sud (figure 2a). La température de l'air et l'humidité relative sont mesurées par intervalle de 30 minutes.

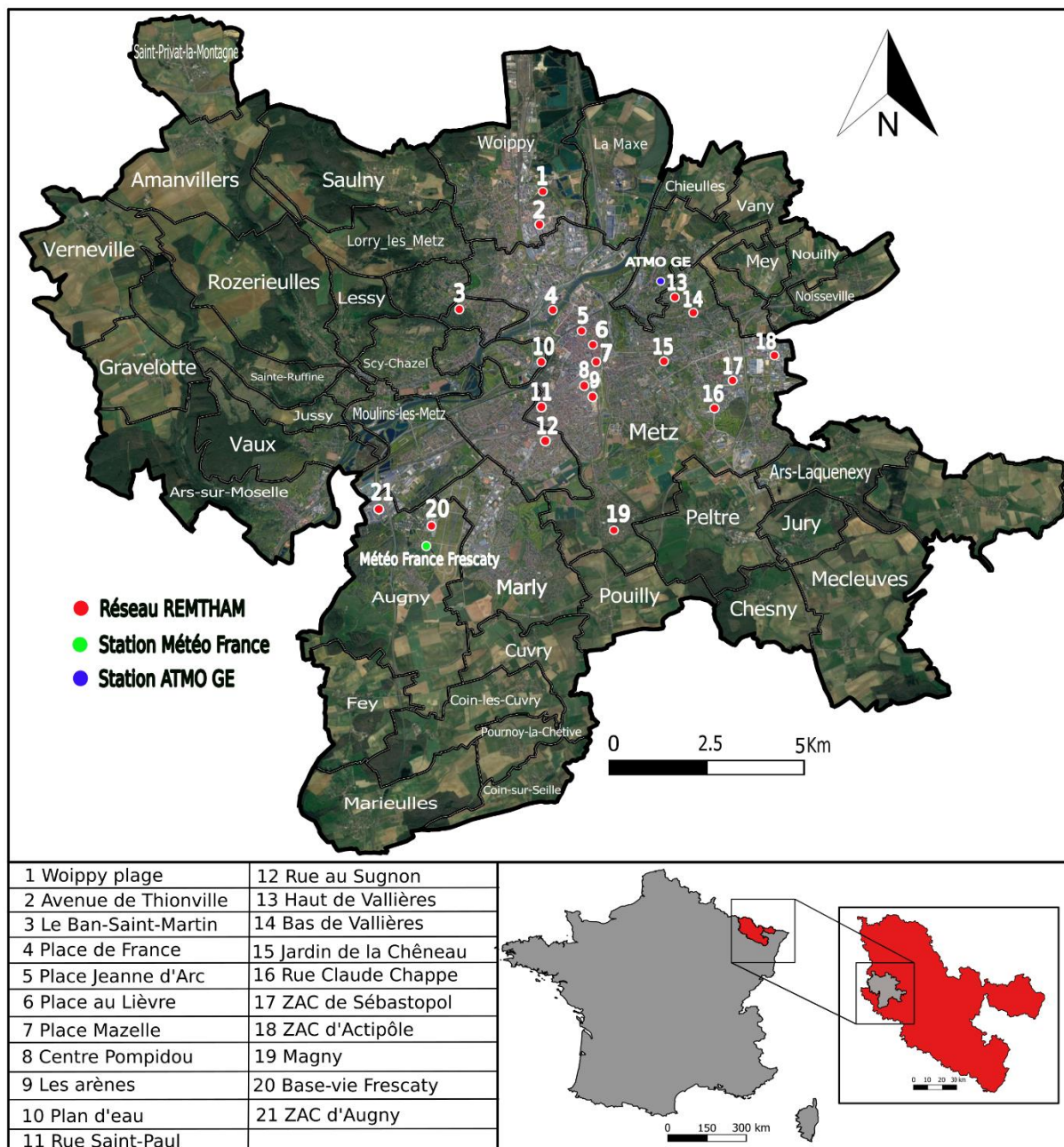


Figure 1 : à droite : carte de situation de la zone étudiée (France métropolitaine, Moselle, Metz métropole) ; à gauche : localisation des sondes du réseau REMTHAM et des stations météorologiques de Météo-France et du réseau ATMO Grand-Est.

Toutes les stations ont été installées dans des sites ouverts, peu sujets à des ombres portées (arbres ou bâtiments) de manière à être représentatifs de l'ambiance thermique du quartier environnant (Oke, 2006). En outre, pour limiter l'influence du candélabre ou du poteau électrique, l'abri anti-radiation a été déporté de plus de 30 cm grâce à une équerre en aluminium (figure 2b). Le choix des sites de mesure a été déterminé par la variété des paysages urbains (figure 3). L'espace urbain est en effet hétérogène en termes d'occupation du sol, d'activités humaines et de densité du bâti. Les mesures de l'ICU doivent donc tenir compte du contexte et être représentatives d'une ambiance thermique locale soit un périmètre de 400-500 m environ (voir Stewart et Oke, 2012; Foissard, 2015). Aussi, les sites équipés ont été déterminés selon quatre critères :

- La classification *Local Climate Zone* de Oke (Stewart et Oke, 2012), qui divise le territoire urbain par un zonage des ambiances climatiques potentielles. Ce zonage exprime une géométrie caractéristique et une occupation du sol qui modulent localement les conditions climatiques, surtout par temps calme et ciel dégagé. Une carte des LCZ de l'agglomération de Metz a été élaborée à partir de la BD TOPO de l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN) et du logiciel SAGA GIS (Fadli, 2018).

- Les typologies urbaines identifiées dans le schéma de cohérence territoriale de l'agglomération messine (SCOTAM) (Aguram, 2017) : habitat individuel continu, habitat individuel discontinu, habitat individuel groupé, habitat collectif continu, habitat collectif discontinu et habitat intermédiaire/mixte.

- L'échantillonnage des éléments « naturels » (relief, plan d'eau, parcs urbains, etc.) susceptibles d'influencer les ambiances climatiques locales.

- La proximité des lieux accueillant des personnes vulnérables à la chaleur : Établissements d'Hébergement pour Personnes Âgées Dépendantes (EHPAD) et écoles primaires et maternelles.



Figure 2 : a) Station météorologique du réseau REMTHAM (rue de Saint-Paul, Montigny-Lès-Metz, France). b) Système de fixation de l'abri météorologique.

Notons que le territoire de Metz Métropole est équipé d'autres stations météorologiques dont les données nous ont été aimablement fournies dans le cadre de notre étude : il s'agit de la station de *Saint-Julien-lès-Metz* (installée en 2001) appartenant au réseau de mesure ATMO Grand-EST, à laquelle s'ajoute la station automatique de Météo France installée en 1929 sur le plateau de Frescaty. Cette dernière a été sélectionnée comme station de référence périurbaine, car bien qu'elle soit équipée d'une instrumentation différente de celle du réseau REMTHAM, elle s'est avérée être la plus fraîche, après consultation des données relevées par l'ensemble des stations. Ce choix est conforté par une fraction de bâti inférieure à 4 % et une fraction de végétation atteignant 80 % (figure 3).

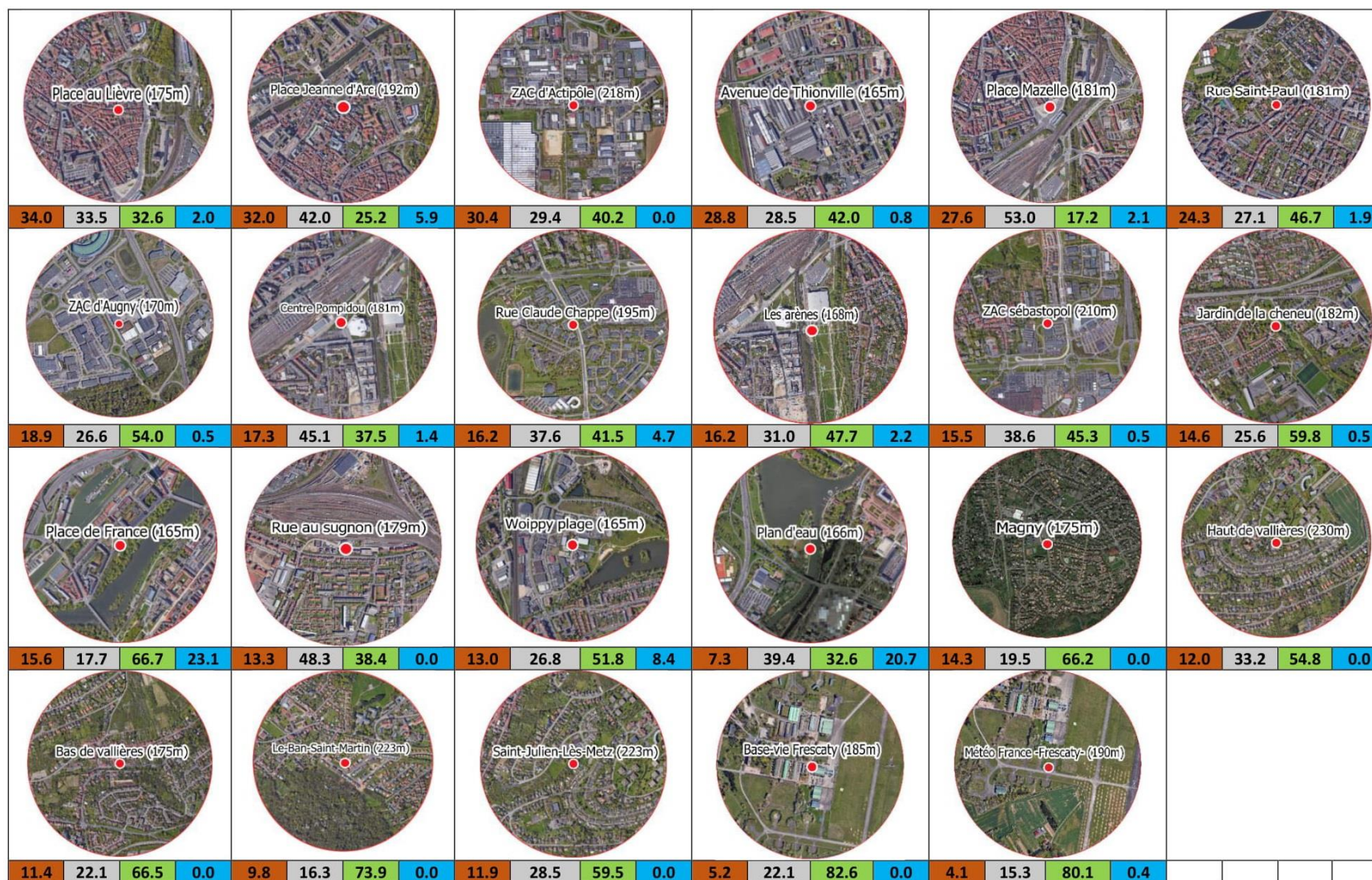


Figure 3 : Localisation des stations météorologiques et part d'occupation du sol en % (bâti = marron, surfaces imperméables = gris, végétation = vert et plans d'eau = bleu) dans un rayon de 500 m autour des stations météorologiques du réseau REMTHAM.

Données : BD TOPO IGN.

3. Résultats

3.1. Variabilité intrasaisonnière de l'ICU

Afin d'évaluer la variabilité intrasaisonnière de l'ICU au cours de l'été 2019, un binôme de stations a été constituée : il est composé d'une station située en plein centre-ville (station *Place au Lièvre*) servant de référence urbaine, et de la station automatique de *Metz Frescaty* choisie comme référence périurbaine (figure 3). Ainsi l'écart thermique moyen horaire entre l'hypercentre et la périphérie de l'agglomération a pu être établi pour la période s'étendant de la mi-juin à la fin septembre. Celui-ci est compris entre +2,5°C et +3°C après le coucher de soleil (à partir de 23 heure) durant les mois de juin et de juillet, caractérisés par la survenance d'épisodes caniculaires (tableau 1). Pour les mois d'août, l'écart moyen est aussi compris entre 2,5 et 3°C durant la nuit comme en juin et juillet. L'ICU moyen en septembre est en revanche plus faible durant la nuit (1,8 à 2,2°C). Ensuite, à partir de 9:00 l'écart moyen devient faible ou nul sur l'ensemble de la journée, ce qui rejoint les observations d'autres climatologues comme Cantat (2004), Kastendeuch et al. (2010), Dubreuil et al. (2010) et Lee et al. (2016).

Mois	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Juin (15-30)	3,0	2,9	2,8	2,6	2,8	2,8	2,3	0,8	0,1	0,3	0,4	0,7	0,6	0,8	1,0	1,0	1,1	1,2	0,5	0,6	0,9	1,7	2,8	3,0
Juillet (1-31)	2,6	2,8	2,8	2,8	2,7	2,7	2,6	1,8	0,8	0,4	0,2	0,3	0,6	1,0	0,9	0,9	0,9	0,7	0,6	0,6	0,6	1,1	2,1	2,7
Août (1-31)	2,8	2,8	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6	2,1	0,7	0,2	-0,3	-0,4	0,1	0,1	0,5	0,9	0,7	0,8	0,4	0,7	1,1	2,2	2,9	2,9
Septembre (1-30)	2,1	2,0	1,8	2,0	2,0	2,0	1,9	1,8	1,1	0,2	-0,3	0,1	0,3	0,3	1,3	0,9	0,7	0,6	0,3	0,5	1,6	2,2	2,1	2,2

Tableau 1 : Écarts moyens des températures horaires entre la station *Place au Lièvre* et la station de *Metz Frescaty* entre la mi-juin et la fin septembre 2019. D'après les données du réseau REMTHAM.

Ces écarts thermiques nocturnes ont pour origine le stockage de chaleur en journée et le piégeage radiatif la nuit Dahech, « Evolution de la répartition spatiale des températures de l'air et de surface dans l'agglomération de Sfax entre 1987 et 2010. Impact sur la consommation d'énergie en été ». En effet, la présence de bâtiments et de surfaces imperméables (parkings, routes, etc.) conduit au stockage de l'énergie issue du rayonnement solaire durant la journée. Ce stockage d'énergie est également lié au piégeage du rayonnement par les canyons urbains (rues hautes et étroites) et aux caractéristiques physiques des matériaux constituant les bâtiments et les revêtements urbains (Stewart, 2011). Cette énergie stockée durant la journée est restituée la nuit par rayonnement nocturne, maintenant ainsi une température élevée au centre-ville.

3.2. Influence des typologies d'occupation du sol sur l'ICU

Pour mieux appréhender l'évolution de l'ICU en fonction de l'environnement immédiat du point de mesure, quatre types d'environnement, « *urbain dense* », « *végétalisé* », « *plan d'eau* » et « *surface imperméable à faible albédo* » ont été identifiés (figure 3) : ils correspondent respectivement aux stations *Place au Lièvre*, *Jardin de la Chêneau*, *Plan d'eau* et *Avenue de Thionville*. La station de *Metz Frescaty* sert de point de référence périurbain. De la mi-juin à la fin septembre, l'ICU maximal est calculé pour les quatre binômes de stations.

Les résultats obtenus montrent que l'ICU n'intervient pas systématiquement au cours de la nuit et qu'il est significativement plus marqué pendant les périodes caniculaires et les vagues

de chaleur (figure 4a). L'ICU correspondant à l'environnement de type « *urbain dense* » atteint régulièrement des valeurs supérieures à +4°C et un écart maximal de +6,7°C. De surcroît, les environnements de type « *surface imperméable à faible albédo* » et « *eau* » sont presque identiques d'après les courbes de la figure 4a. Il en ressort que l'effet de l'eau reste modéré pendant toute la période. *A contrario*, l'ICU moyen de l'environnement « *végétalisé* » est de l'ordre de +1°C et sa valeur maximale ne dépasse pas +3°C.

Par ailleurs, les valeurs horaires des quatre types d'environnement ont été calculées afin d'évaluer les effets diurnes et nocturnes des typologies retenues. D'après la figure 4b, on constate que le contraste entre elles est assez faible en journée, mais devient plus net à partir du coucher du soleil. A noter que la végétation a un effet rafraîchissant important durant la nuit contrairement à l'eau, dont l'effet rafraîchissant intervient plutôt en journée grâce à la convection. Ensuite, la courbe de l'environnement « *surface imperméable à faible albédo* » reste presque identique à celle de l'environnement « *plan d'eau* » le matin entre 6:00 et 9 :00, et le contraste thermique reste faible pour le reste de la journée. Enfin, l'environnement « *urbain dense* » se singularise des autres types d'environnement puisqu'il amplifie l'ICU de jour comme de nuit.

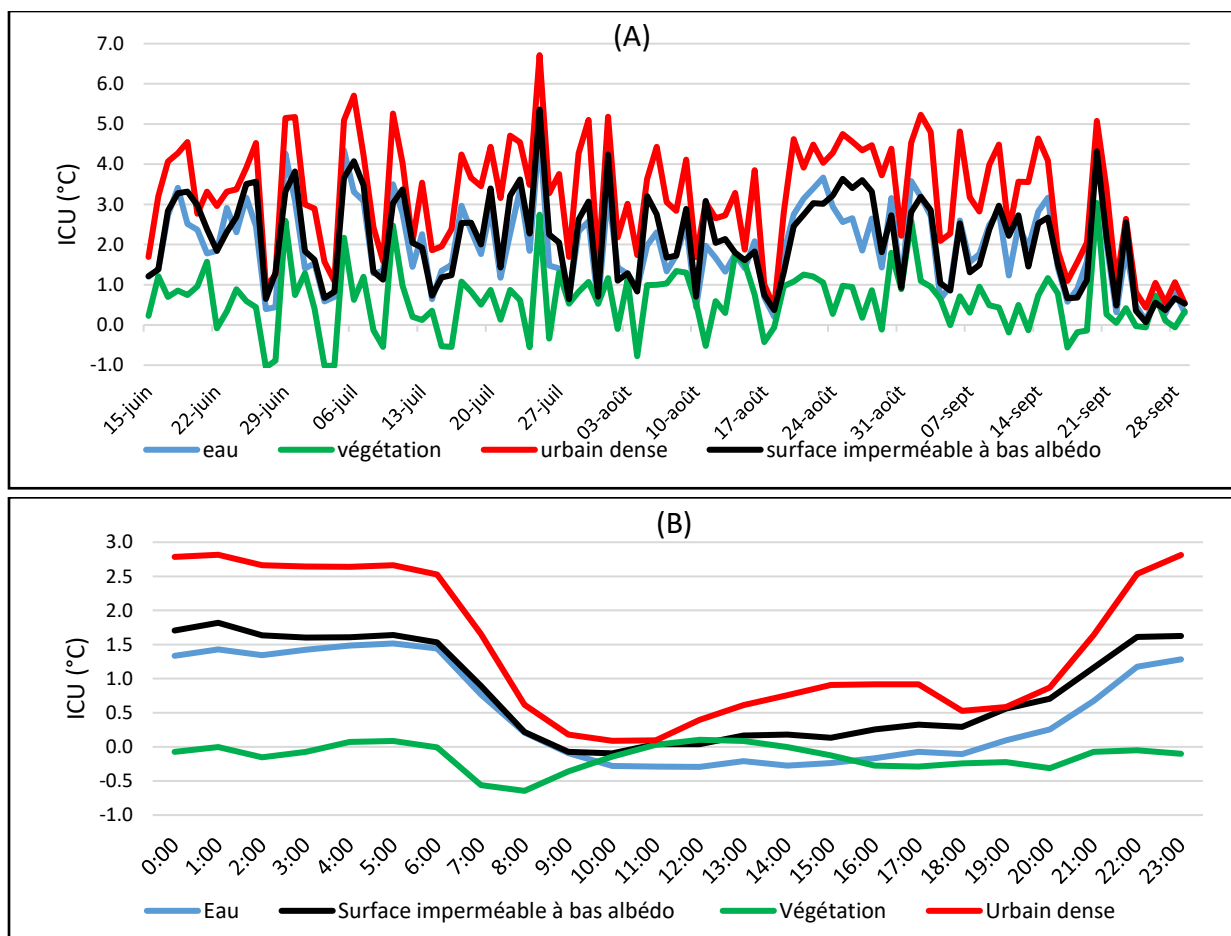


Figure 4 : a) Valeurs quotidiennes maximales de l'ICU des environnements « eau », « végétalisé », « urbain dense » et « surface imperméable à faible albédo » entre le 15 juin et le 30 septembre 2019. b) Moyennes horaires de l'ICU sur un cycle journalier pour les indices « eau », « végétation », « urbain dense » et « surface imperméable à faible albédo » entre le 15 juin et le 31 août 2019.

3.2. Relation entre ICU et canicule

Pour mieux comprendre le comportement de l'ICU en période de canicule, il est intéressant d'étudier la relation entre ces deux phénomènes afin d'établir si l'un a une influence sur l'autre (Richard et al., 2018). Cela passe par une étude de l'ICU sur toute la période estivale (juin-août) incluant les deux épisodes caniculaires de juin et juillet.

D'après la définition de Météo France, on parle de canicule lorsque deux seuils de températures, l'un diurne et l'autre nocturne, sont atteints ou dépassés sur trois jours au minimum. En ce qui concerne le département de la Moselle, ces deux seuils sont fixés respectivement à $T_n = 19^\circ\text{C}$ et $T_x = 34^\circ\text{C}$. Par ailleurs, étant donné que l'ICU est défini comme la différence de température entre les zones urbaines et les zones suburbaines ou périurbaines, deux stations installées en milieu urbain (*Place au Lièvre* et *Place Jeanne d'Arc*) et deux stations installées en milieu périurbain (*Base-vie Frescaty* et *Metz Frescaty*) ont été sélectionnées pour servir de points de référence. L'ICU est calculé quotidiennement par pas de 30 mn, comme la différence entre la moyenne des températures mesurée par les stations urbaines et la moyenne mesurées par les stations périurbaines. Pour chaque journée disponible, seule la valeur maximale de l'ICU (ICU_{\max}) est considérée.

Sur toute la période de mesure disponible, les stations *REMTHAM* ont permis d'échantillonner 107 journées. Le seuil de 19°C durant la nuit a été dépassé pendant 20 jours en milieu urbain et pendant 7 jours en milieu péri-urbain. Quant aux mesures diurnes, elles indiquent que le seuil de 34°C a été dépassé 9 fois autant en milieu urbain qu'en milieu péri-urbain. Les journées de mesure sont alors triées et codées en 3 classes (tableau 2) :

- La classe A, qui comprend les journées qui n'ont pas atteint ou dépassé les seuils de température pour une canicule, est scindée en deux catégories (1) situation non anticyclonique et non caniculaire et (2) situation anticyclonique et non caniculaire.
- La classe B, qui représente les journées où un seul des deux seuils a été atteint ou dépassé,
- La classe C, qui représente les journées pour lesquelles les deux seuils ont été atteints ou dépassés.

D'après les résultats de la classe A, les ICU_{\max} supérieurs à 3°C sont sur-représentés tandis que ceux inférieurs à 3°C sont sous-représentés. Les premiers représentent 58% des cas pour la catégorie "situation non anticyclonique et non caniculaire" et 80% des cas pour la catégorie "situation anticyclonique et non caniculaire". L'intensité des ICU est ainsi plus élevée par situation anticyclonique (vents faibles et un ciel clair) que par temps couvert, pluvieux ou venteux.

Si l'on s'intéresse aux journées de types B et C, on constate que l' ICU_{\max} ayant une valeur supérieure à $+3^\circ\text{C}$ est également représenté de manière plus importante, avec 91% des cas pour la classe B et 86% des cas pour la classe C, alors que celui inférieur à $+3^\circ\text{C}$ est sous-représenté.

On en conclut donc que l'intensité de l'ICU est plus importante pendant les périodes anticycloniques caniculaires que pendant les périodes anticycloniques non caniculaires, ce qui met en évidence le caractère aggravant des épisodes caniculaires sur l'intensité de l'ICU.

Types de journée		$ICU_{max} < 1^{\circ}C$	$1 \leq ICU_{max} < 2$	$2 \leq ICU_{max} < 3$	$3 \leq ICU_{max} < 4$	$4 \leq ICU_{max} < 5$	$5^{\circ}C \leq ICU_{max}$	Total
A	situation non anticyclonique et non caniculaire	0	2	3	4	8	0	17 (17%)
	situation anticyclonique et non caniculaire	0	2	12	27	27	4	72 (67%)
B	dépassement d'un des 2 seuils	0	0	1	5	5	0	11 (10%)
C	dépassement des 2 seuils (caniculaire)	0	1	0	1	4	1	7 (6%)
Total		0	5	16	37	44	5	107

Tableau 2 : Nombre de jours par classe d'ICU en fonction du dépassement ou non des seuils de 19°C et 34°C définissant une journée comme caniculaire. L'écart thermique est mesuré pour chaque jour entre des sites urbains (Place au Lièvre et Place Jeanne d'Arc) et des sites périurbains (Base-vie Frescaty et Metz Frescaty).

Après avoir établi le lien entre canicule et ICU, il convient à présent d'étudier le comportement de ce dernier au cours d'une séquence caniculaire afin de déterminer si son intensité reste constante ou non. Pour ce faire, les données du même lot de stations que celui sélectionné précédemment ont été considérées en restreignant cette fois la comparaison à la période du 15 juin au 31 juillet 2019. Rappelons que les deux séquences caniculaires s'étendent respectivement du 25 au 30 juin et du 21 au 26 juillet. Les résultats sont présentés sur la figure 5. L'analyse de cette figure montre que :

- L'écart thermique entre les stations sélectionnées est manifeste aussi bien de jour que de nuit ; les sites urbains étant les plus chauds et les sites périurbains les plus frais. On remarque aussi deux pics de chaleur relevés lors des deux épisodes caniculaires : le 26 juin par la station du centre-ville à 37,2°C (17:00 heures locales) et 36,4°C relevé par la station Metz Frescaty. Le 25 juillet ces deux stations urbaine et péri-urbaine ont enregistré des températures respectivement de 40,0°C et 39,6°C à 17 :00 heures locales.

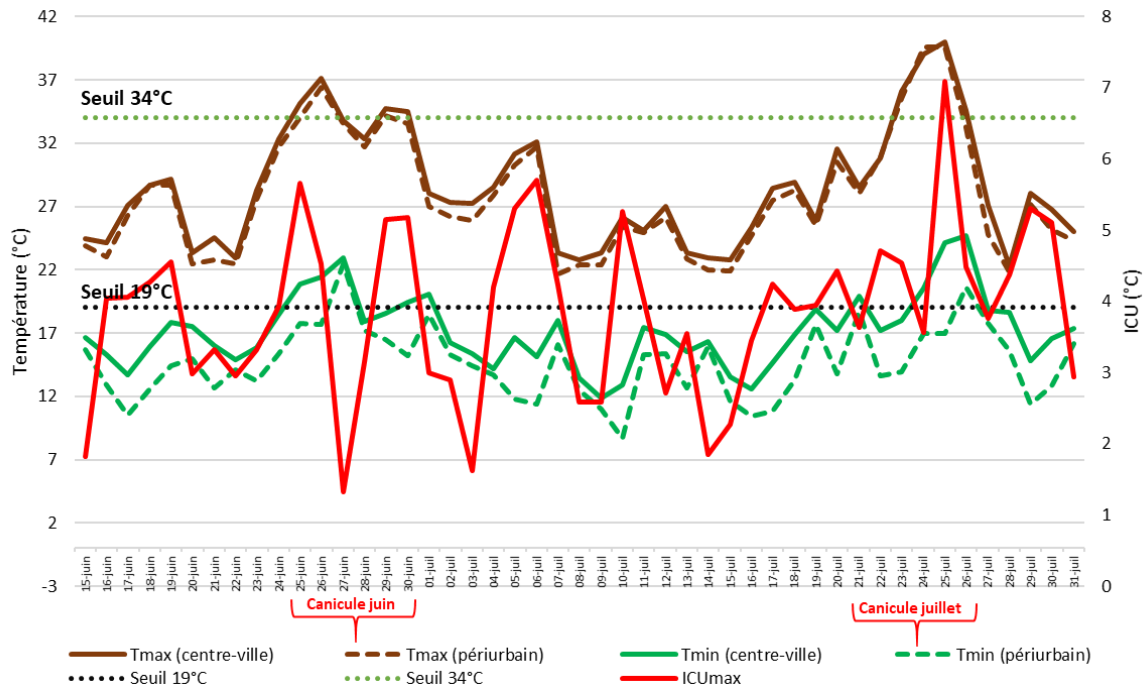


Figure 5 : Valeurs des températures maximales et minimales observées en milieu urbain et en milieu périurbain du 15 juin au 31 juillet 2019.

- Sur le plan chronologique, on relève que lors de la période qui a précédé l'épisode caniculaire de juin, l'ICU est modéré avec une moyenne de $+3,5^{\circ}\text{C}$. Cela s'explique par les conditions météorologiques caractérisées par une couverture nuageuse discontinue et des vents modérés. Puis, l'ICU du premier épisode caniculaire est bien marqué, atteignant une intensité maximale de $+5,7^{\circ}\text{C}$ et une intensité moyenne de $+4,5^{\circ}\text{C}$. Le 27 juin fait toutefois exception du fait de la situation météorologique perturbée avec un ciel couvert et des vents faibles (supérieur à 15 km/h).

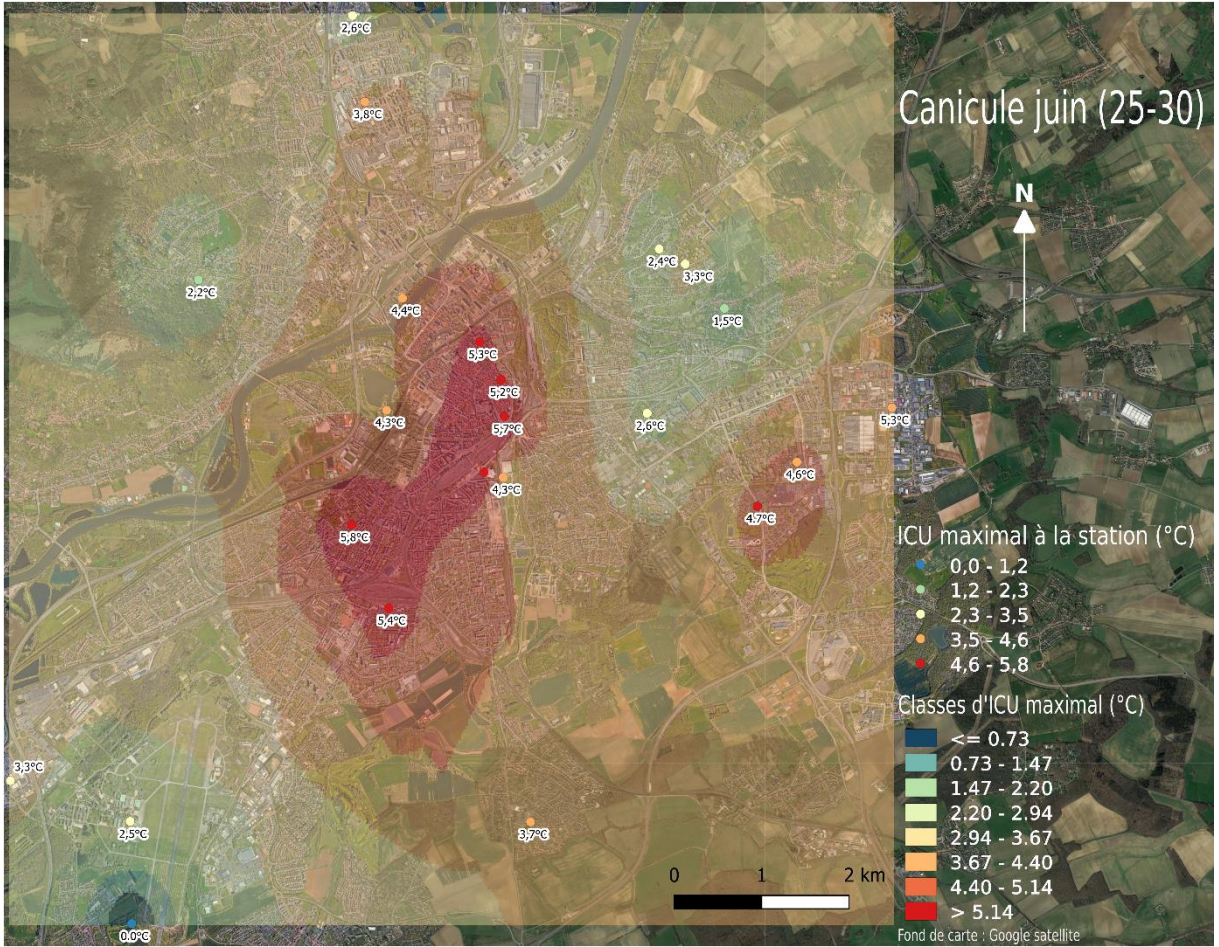
La période entre les deux canicules (du 1^{er} au 20 juillet) a ensuite donné lieu à un ICU moyen de $+3,6^{\circ}\text{C}$. On observe également une intensité maximale relevée pendant cette période de $5,7^{\circ}\text{C}$, plus exactement les 5, 6 et 10 juillet lors d'une situation anticyclonique. Ensuite, l'ICU connaît une baisse d'intensité juste avant l'épisode caniculaire de juillet. Cela s'explique par le fait que la couverture nuageuse limite l'effet radiatif à l'origine de la formation de l'ICU nocturne qui se prépare en journée; d'autre part le vent synoptique limite le stationnement de la masse d'air sur l'aire urbaine. Celle-ci n'a donc pas le temps d'être influencée par les états de surface propres à cet espace.

Enfin, l'ICU devient beaucoup plus marqué pendant la canicule de juillet où il atteint une intensité maximale de $+7,1^{\circ}\text{C}$ et une moyenne de $+4,7^{\circ}\text{C}$.

3.4. Spatialisation de l'ICU lors des deux épisodes caniculaires

L'ICU d'été, qui se limite à certaines nuits particulièrement chaudes, nécessite de travailler sur des périodes caractérisées par des conditions météorologiques spécifiques (un ciel dégagé couplé à un vent faible) propices à son apparition. Nous avons donc cherché à spatialiser les écarts maximaux entre les valeurs de température minimale de l'air (T_n) enregistrées par les stations du réseau *REMTHAM* et celles enregistrées par la station de référence périurbaine de la zone d'étude (ICU_{max}).

Pour cela, nous avons appliqué la méthode d'interpolation *Radial Basis Function* (RBF). Cette méthode permet de produire des surfaces lisses à partir d'un grand nombre de points de mesures et d'obtenir des résultats satisfaisants pour des variables à faible gradient spatial, ce qui est bien adapté à la température de l'air. Il s'agit d'une première spatialisation, un peu naïve, au sens où elle ne fait intervenir que les données de température. Elle ne s'appuie donc sur aucune variable auxiliaire pouvant servir d'explication à l'interpolation. Elle permet néanmoins de mettre en évidence une certaine organisation spatiale de l'ICU qui est remarquablement similaire entre les deux séquences caniculaires (figure 6a vs figure 6b). Un îlot de chaleur recouvre l'hyper-centre et les parties urbaines des communes de Montigny-lès-Metz, de Metz et de Woippy. En revanche, autour des stations suburbaines (*Bas de Vallières* et *Jardin de la Chêneau*) et de la station péri-urbaine (*Metz Frescaty*), des îlots de fraîcheur se dessinent sous l'effet des caractéristiques physiques de leur site (respectivement creux topographique et présence de végétation à un taux supérieur à 58%).



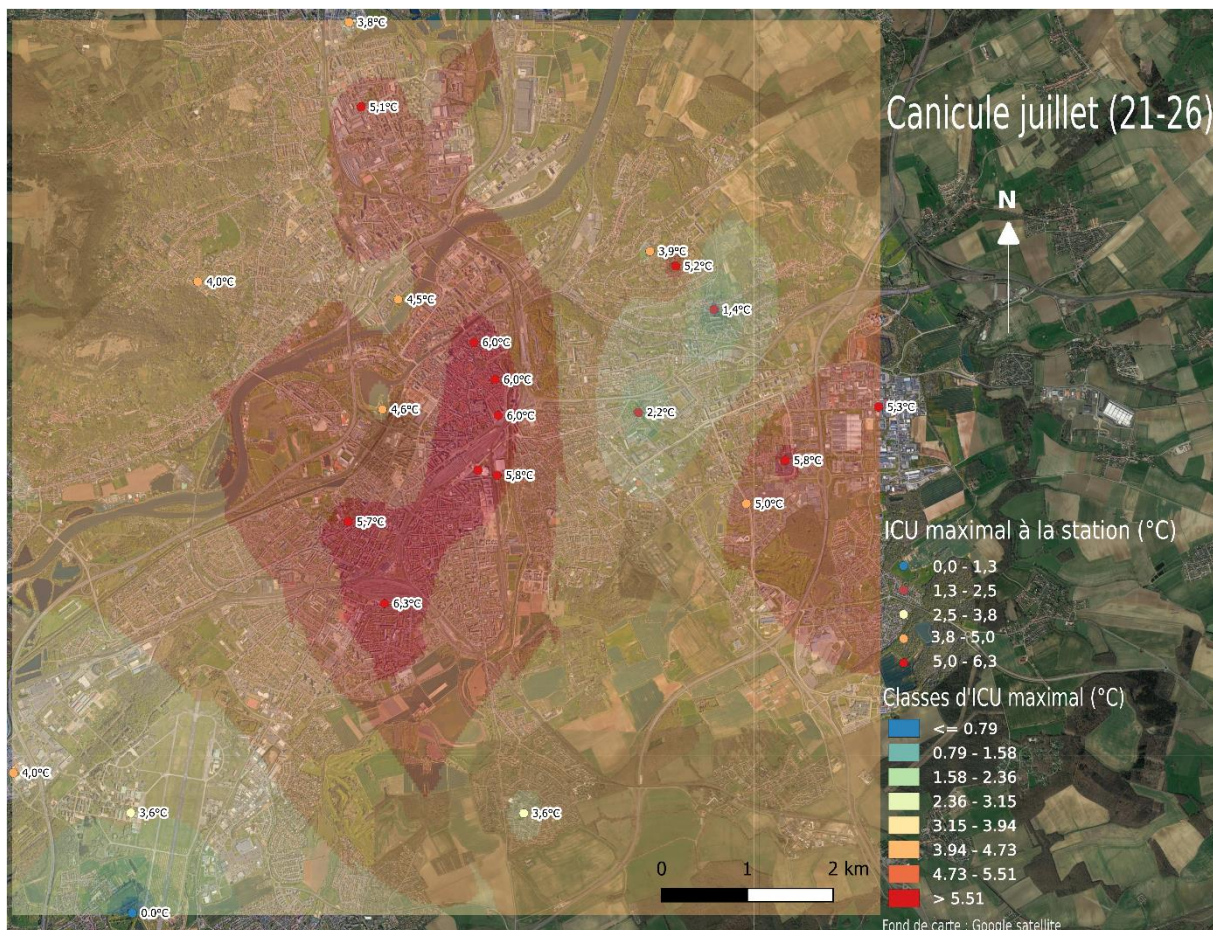


Figure 6 : Interpolation spatiale (méthode RBF) de l'ICU_{max} (écarts maximaux entre les températures minimales relevées par les stations REMTHAM et la station Metz Frescaty de Météo France pendant les épisodes caniculaires de juin et de juillet 2019).

Discussion et conclusion

Cette étude inédite a permis de mesurer et de spatialiser l'ICU au sein de l'agglomération messine au cours de l'été 2019. Les données collectées par le LOTERR (réseau REMTHAM), ATMO Grand Est et Météo France ont mis en évidence un excédent thermique de l'ordre de 3°C en moyenne sur le territoire de Metz Métropole pour les valeurs nocturnes. En période caniculaire, l'ICU atteint une intensité maximale de 7,1°C. Ce résultat s'accorde remarquablement bien avec le modèle prédictif de Oke (1973) établi à partir de jeux de données déjà anciens, collectés dans différentes métropoles européennes. Appliqué à notre cas d'étude, il s'écrit :

$$\Delta T_{u-r}(\max) = 2,01 \times \log(P) - 4,06 \quad (1)$$

où P est le nombre d'habitants de la métropole de Metz (220 000).

D'où l'on tire que :

$$\Delta T_{u-r}(\max) \approx 6,7^\circ\text{C} \quad (2)$$

Nos résultats sont également cohérents avec les monitorings de température réalisés dans d'autres aires urbaines françaises de taille moyenne (Nancy, et Dijon par exemple) ou de taille

plus importante (Grenoble, Strasbourg et Toulouse par exemple). L'étude menée par Fischer (2005) sur la métropole de Strasbourg a relevé un ICU intense légèrement supérieur à celui relevé dans la métropole de Metz et qui, là encore, est en adéquation avec le modèle de Oke (1973). Sur le territoire de Dijon Métropole, l'ICU est plus intense en début de saison tandis que les épisodes de chaleurs sont plus fréquents au cœur de la saison; ce qui corrobore nos observations bien que le mois de juin n'ait été échantillonné que sur la deuxième quinzaine. Enfin, les relevés effectués à Nancy sont similaires aux nôtres alors que la méthode employée est différente (mesures itinérantes), voir Leconte (2014). En revanche, l'ICU moyen messin est inférieur à ceux relevés dans les métropoles plus importantes telles que Toulouse dont l'ICU moyen est de 4°C (Soubeyroux et *al.*, 2017) et Grenoble dont l'ICU varie entre 5°C et 8°C en période caniculaire (Bigot et *al.*, 2017). Ces écarts sont liés à plusieurs facteurs dont le mode opératoire pour mesurer l'ICU, le climat plus chaud, la topographie, la population et la densité urbaines, ainsi que la forme et la superficie de ces aires urbaines.

Nos résultats montrent aussi que l'ICU moyen de Metz Métropole est globalement plus modéré que celui d'autres agglomérations de taille moyenne dans le monde. Ainsi, dans la zone chaude, la ville Florianópolis au Brésil, a enregistré un ICU variant entre 4°C à 5°C en période chaude avec un pic de 6°C pendant l'été 2018 (Da Rocha et *al.*, 2019). La ville de Sfax en Tunisie présente un ICU moyen compris entre 4°C à 7°C (Dahech, 2012). La ville d'Augsburg en Allemagne, située dans un contexte climatique proche de celui notre région d'étude, présente quant à elle, un ICU moyen de l'ordre de 5°C (Straub et *al.*, 2019).

Pour ce qui est des centres urbains plus importants, l'ICU de Metz Métropole est relativement proche de celui relevé à New York avec une valeur moyenne de 3,5°C (Hardin et *al.*, 2018), ou celui relevé à Séoul d'une valeur moyenne de 3°C (Lee et Baik, 2010). Bien que ces mégalo-poles présentent une population et une densité urbaines plus importantes, leur ICU reste modéré du fait des projections d'ombrage par les immeubles de grande hauteur (Hardin et *al.*, 2018) et par l'effet de brise marine (Kim et Baik, 2002).

Spatialement, nos résultats mettent en évidence une organisation complexe de l'ICU : l'écart thermique en période nocturne est d'environ 5°C à 6°C entre le centre-ville et les zones industrielles d'une part, et les zones périurbaines moins denses et les espaces verts d'autre part. L'ICU n'est donc pas cantonné aux zones à forte densité urbaine mais s'étend aussi aux zones d'activités périphériques (ZAC d'Actipôle, ZAC de Sébastopol, ZAC d'Augny et ZAC de Woippy). Ce sont les caractéristiques physiques des surfaces et la forte densité du trafic routier qui expliquent cette répartition spatiale. On retrouve dans ces zones de grandes surfaces artificielles (hangars métalliques, parkings, routes, etc.) à faible réflectivité solaire (donc forte absorption de chaleur radiative), forte diffusivité thermique et faible capacité thermique massique (ou pouvoir stockant) ce qui explique l'important dégagement de chaleur sensible durant la nuit.

Par ailleurs, les premières cartographies de l'ICU réalisées par une approche naïve montrent une structure spatiale en archipel constituée d'une mosaïque d'ICU et d'îlots de fraîcheur urbains (IFU). Ainsi, une coulée de chaleur se dessine sur un axe allant de Woippy à Montigny-lès-Metz en passant par l'hyper-centre de Metz où persiste une ambiance thermique chaude toute la nuit. En parallèle, un axe de fraîcheur se structure au sein d'une coulée verte qui s'étend entre le fond du vallon de Vallières (brise de versant descendante) et le jardin de la Chêneau.

Au terme de cette première campagne de mesure, plusieurs perspectives d'amélioration et de valorisation de nos travaux se dessinent : en vue de spatialiser l'ICU à l'échelle de

l'agglomération, il serait pertinent de densifier le réseau de mesure dans certains quartiers qui ne sont pas encore échantillonnés et de corrélérer les mesures de l'ICU avec des indicateurs urbains de manière à pouvoir le spatialiser objectivement par une approche de type géorégression (Suomi et Käyhkö, 2012; Foissard, 2015 ; Lima et al., 2017 ; Straub et al., 2019). Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail, par leur caractère démonstrateur, pourront également servir de support pour rendre concrète l'adaptation au changement climatique pour le grand public et l'accompagner au changement en matière de comportement et de pratique des lieux en période de forte chaleur.

Bibliographie

AGURAM, 2017. Densités et Formes Urbaines Résidentielles sur le territoire du SCOTAM, 2017, consulté en novembre 2018 sur : <https://www.aguram.org/aguram/densites-formes-urbaines-residentielles-sur-le-territoire-du-scotam>.

AMORIM M. C. C. T., DUBREUIL V., QUENOL H., SANT'ANNA NETO J. L., 2009. Características das ilhas de calor em cidades de porte médio : exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França). *Confins*, vol. 7, p. 1-16.

BESANCENOT J.-P., 1995. Vague de chaleur, pollution atmosphérique et surmortalité urbaine. In : *Climat, pollution atmosphérique, santé*. Hommage à Gisèle Escourrou. Dijon, GDR climat et santé, p. 47-70.

BIGOT S., DUCHE S., MADELIN M. et ROME S., 2017. Etude du climat urbain : pour une mise à disposition de nouveaux services climatiques, *BSGLg*, n°68, Climatologie, p. 13-35.

CANTAT O., 1989. *Contribution à l'étude des variations du bilan d'énergie en région parisienne. Essai sur les bilans d'énergie dans les grandes métropoles*. Thèse de doctorat, Université de Paris IV-Sorbonne, 2 volumes, 362 p. et 254 p.

CANTAT, O., 2004. L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, p. 75-102.

DA ROCHA G., DUBREUIL V. et MENDONÇA F., 2019. Résultats préliminaires de l'étude de l'îlot de chaleur urbain à Florianópolis (au sud du Brésil). *Actes du XXXII^{ème} colloque de l'association internationale de climatologie*, Thessaloniki, Grèce, p. 378-383.

DAHECH S., 2012. Évolution de la répartition spatiale des températures de l'air et de surface dans l'agglomération de Sfax entre 1987 et 2010. Impact sur la consommation d'énergie en été. *Climatologie*, Numéro Spécial : Climats et changement climatique dans les villes, p. 11-32.

DUBREUIL V., QUENOL H., FOISSARD X., PLANCHON O., 2010. Climatologie urbaine et îlot de chaleur urbain à Rennes, in P. Clergeau (dir.) *Ville et biodiversité : les enseignements d'une recherche pluridisciplinaire*. Presses Universitaires de Rennes, p. 105-122.

ESCOUROU G., 1981. Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat. In : *Hommes et Terres du Nord*, 1981/3, Géographie physique, p. 87.

EVENO M., PLANCHON O., OSZWALD J., DUBREUIL V., QUÉNOL H., 2016. Variabilité et changement climatique en France de 1951 à 2010 : Analyse au moyen de la classification de Köppen et des types de climats annuels. *Climatologie*, Vol.13, p. 47-70.

FADLI Y., 2018. *Cartographie préliminaire des LCZ à l'échelle de Metz métropole*. Mémoire de fin d'étude sous la direction de Monsieur Gilles Drogue, Metz, p. 9-28.

FISCHER L., 2005. Phénomènes radiatifs et îlot de chaleur urbain dans l'agglomération de Strasbourg. *Revue Géographique de l'Est*, 45, p. 99-112.

FOISSARD X., 2015. *L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 2, Rennes, France, 248 p.

HARDIN A. W., LIU Y., CAO G., VANOS J. K., 2018. Urban heat island intensity and spatial variability by synoptic weather type in the northeast U.S., *Urban Climate*, Vol. 24, p. 747-762.

HIDALGO J. et BRETAGNE G., 2016. Intégration des enjeux climat-énergie dans le PLUI-H de Toulouse Métropole : retours sur l'ingénierie de projet. Compte-rendu synthétique d'une conférence, *4e Conférence Aménagement Climat*, CVRH de Toulouse.

INSEE, 2016. Bilan économique de Metz Métropole : quelques signes d'amélioration en 2015. Insee Dossier Alsace-Champagne-Ardenne-Lorraine n°2, consulté en décembre 2019 sur : https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/2129339/ac_ind_02.pdf.

JANOUEIX-YACONO D., 1995. Rapports entre brise de mer ou de lac, structure de la couche limite planétaire et pollution atmosphérique sur des plaines littorales urbanisées. *Climat, pollution atmosphérique, santé*, Dijon, GDR climat et santé, p. 177-201.

KASTENDEUCH P., NAJJAR G., LACARRERE P., COLIN J., 2010, Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg. *Climatologie*, Vol. 7, p. 21-36.

KIM Y.-H. et BAIK J.-J., 2002. Maximum Urban Heat Island Intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 41, n°6, p. 651-659.

LECONTE F., 2014. *Caractérisation des îlots de chaleur urbains par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, Nancy, France, 274 p.

LEE D. O., 1992. Urban warming ? An analysis of recent trends in London's heat island. *Weather*, Vol. 47, n°2, p. 50-56.

LEE S.-H., BAIK J.-J., 2010. Statistical and dynamical characteristics of the urban heat island intensity in Seoul. *Theor. Appl. Climatol.*, Vol. 100, p. 227-237.

LEE Y. Y., KIM J. T., YUN G. Y., 2016. The neural network predictive model for heat island intensity in Seoul. *Energy and Buildings*, Vol. 110, p. 353-361.

LIMA ALVES E. D., LOPES A., 2017. The Urban Heat Island Effect and the Role of Vegetation to Address the Negative Impacts of Local Climate Changes in a Small Brazilian City. *Atmosphere*, Vol. 8, n°2, p. 18.

MASSON V., 2017. Le climat urbain : de l'observation des processus à l'adaptation des villes au changement climatique. *Actes du XXXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Sfax, Tunis, p. 28-36.

OKE T. R., 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, Vol. 7, p. 769-779.

OKE T. R., 1987. *Boundary Layer Climates*. 2nd Edition, Methuen Co., London, New York, 435 p.

Oke T. R., 2006. *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*. World Meteorological Organization, 47 p.

OKE T. R., MILLS G., CHRISTEN A., VOOGT J. A., 2017. *Urban Climates*. Cambridge, Cambridge University Press, 546 p.

RENARD F., ALONSO L., 2019. Complémentarité de différentes sources d'acquisition de température en milieu urbain : cartes mentales, mesures participatives et données satellites. *Actes du XXXIIème colloque de l'association internationale de climatologie*, Thessaloniki, Grèce, p. 227-232.

RICHARD Y., REGA M., POHL B., PERGAUD J., EMERY J., VAIRET T., DUDEK J., ZITO S., THEVENIN D., THEVENIN T., 2018. Îlot de chaleur urbain et canicule : quelles relations ? *Actes du XXXIème colloque de l'association internationale de climatologie*, Nice, France, p. 213-217.

SOUBEYROUX J.-M., MASSON V., EDOUART V., CABANES O, POUJOL, G., 2017. Accompagner l'adaptation au changement climatique de la ville : l'expérience menée avec Toulouse Métropole. *Actes du XXXème colloque de l'association internationale de climatologie*, Sfax, Tunisie, p. 174-179.

STRAUB A., BERGER K., BREITNER S., CYRYS J., GERUSCHKAT U., JACOBET J., KÜHLBACH B., KUSCH T., PHILIPP A., SCHNEIDER A., UMMINGER R., WOLF K., BECK C., 2019. Statistical modelling of spatial patterns of the urban heat island intensity in the urban environment of Augsburg Germany. *Urban Climate*, Vol. 29, 100491 p.

STEWART, I. 2011. *Redefining the urban heat island*. Thèse de doctorat, The University of British Columbia, Vancouver. 368 p.

STEWART I. D., OKE T. R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 93, n°12, p. 1879-1900.

SUOMI J., KÄYHKÖ J., 2012. The impact of environmental factors on urban temperature variability in the coastal city of Turku, SW Finland. *International Journal of Climatology*, Vol. 32, n°3, p. 451-463.

TOMLINSON C. J., PRIETO-LOPEZ T., BASSETT R., CHAPMAN L., CAI X.-M., THORNES J. E., BAKER C. J., 2013. Showcasing urban heat island work in Birmingham measuring, monitoring, modelling and more. *Weather*, Vol. 68, n°2, p. 44-49.

YANG X., PENG L. L. H., JIANG Z., CHEN Y., YAO L., HE Y., XU T., 2020. Impact of urban heat island on energy demand in buildings: Local climate zones in Nanjing. *Applied Energy*, Vol. 260, p. 114279

YUN G. Y., NGARAMBE J., DUHIRWE P. N., ULPIANI G., PAOLINI R., HADDAD S., VASILAKOPOULOU K., SANTAMOURIS M., 2020. Predicting the magnitude and the characteristics of the urban heat island in coastal cities in the proximity of desert landforms. The case of Sydney. *Science of The Total Environment*, Vol. 709, p. 136068

Remerciements

A Sébastien Douche (Metz Métropole), Luc Manceau (LOTERR), Litifu Paruke, Mario Rega (CRC Dijon), Météo France, Atmo Grand-Est, ainsi qu'aux maires (en particulier Monsieur le Maire de la ville de Metz) et techniciens des communes de Metz Métropole.