

MESURES DE LA TEMPÉRATURE ET SPATIALISATION DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN À DIJON

DE LAPPARENT B.¹, ROUX J.¹, RICHARD Y.¹, POHL B.¹, BIENTZ S.², CODET-HACHE O.², DUMAITRE F.³, TOUSSAINT H.⁴, TISSOT A.-C.⁴, THEVENIN D.⁵, THEVENIN T.⁶

(1) CRC, UMR 6282 Biogéosciences, CNRS/université de Bourgogne, 6 Bd. Gabriel, 21000 Dijon, France [yves.richard@u-bourgogne.fr]

(2) Ville de Dijon et communauté urbaine du Grand Dijon, France

(3) ADEME Bourgogne [franck.dumaitre@ademe.fr]

(4) ALTERRE Bourgogne

(5) Centre Météorologique de Dijon, Météo France [denis.thevenin@meteo.fr]

(6) THEMA [thomas.thevenin@u-bourgogne.fr]

Résumé – Dans le cadre du Plan Climat Énergie Territoire (PCET) du Grand Dijon, une campagne de mesures a été conduite du 6 juin au 28 septembre 2014. 50 sondes Hobo proV2 ont été déployées. Le choix des sites a été effectué de manière à ce que les différents types d'environnement urbain (Oke, 2006) soient représentés. L'Îlot de Chaleur Urbain (ICU) s'exprime principalement la nuit, lorsque des conditions radiatives étaient bien établies la veille. L'ICU est estimé à 1°C en moyenne sur l'été et 3 à 4°C les nuits de beau temps. Il a atteint 6°C lors des périodes les plus chaudes de l'été 2014. Un axe frais traversant l'agglomération montre que la présence de végétation et d'eau atténue l'effet de l'ICU.

Mots-clés : Températures ; Mesures, Ilot de Chaleur Urbain (ICU) ; Régression-krigeage.

Abstract – The Territorial Climate Energy Plan (PCET) of the agglomeration of Dijon (Grand Dijon) includes a measurement campaign (6 June to 28 September 2014). 50 Hobo proV2 thermometers were deployed. The selection of sites was carried out so that the different types of urban environment (Oke, 2006) are documented. The Urban Heat Island (UHI) is discernible mainly at night, when radiative conditions are well established the day before. It is estimated to 1°C on average for the summer, 3-4°C during nights of fine weather. It reached 6°C during the warmest periods of the 2014 summer. A cool axis through the agglomeration shows that vegetation and water can sensibly mitigate the ICU effect.

Keywords : Temperature ; Measurements ; Urban Heat Island (UHI) ; Regression-kriging.

Introduction

L'îlot de chaleur urbain (ICU) est une caractéristique majeure du climat urbain (Oke 1973, Pigeon *et al.*, 2008). Il désigne l'excès de température de l'air observé dans la canopée des zones urbaines par rapport aux zones rurales qui les entourent. En Europe, août 2003 et les 70.000 décès associés (Robine *et al.*, 2008) illustrent tragiquement les effets combinés des canicules, qui devraient être de plus en plus fréquentes, intenses ou longues (Meehl et Tebaldi, 2004), et de l'ICU. Une réponse possible consiste en un usage massif de la climatisation. Mais cela générerait une très forte augmentation de la consommation d'énergie (Lemonsu *et al.*, 2013). Ainsi, les collectivités urbaines, dans le cadre de politiques d'adaptation au changement climatique, s'interrogent-elles sur les moyens de limiter les effets négatifs associés aux canicules, que ce soit en termes sanitaires ou de consommation d'énergie (Cam, 2012). Tel est le cas de la Communauté Urbaine du Grand Dijon qui, dans le cadre de son Plan Climat Énergie Territorial, en partenariat avec l'ADEME Bourgogne, Météo France, Alterre Bourgogne et deux laboratoires de recherche (THEMA et CRC-Biogéosciences), a porté un programme de Mesures Urbaines de la Température dans l'Agglomération du Grand Dijon (MUSTARDijon). En France, les études de l'ICU fondées sur des observations reposent sur des stations fixes (Cantat, 2004) ou, dans quelques grandes agglomérations, ont donné lieu à des campagnes de mesures : ESCOMPTE à Marseille (Mestayer *et al.*, 2005), CAPITOU à Toulouse (Hidalgo *et al.*, 2008). Dédiée à une agglomération de taille moyenne, MUSTARDijon se caractérise également par le nombre de points de mesures et sa durée.

1. Matériel et méthodes

1.1. La campagne MUSTARDijon

Le matériel est constitué d'abris M-RSA contenant des sondes hygro-thermométriques. Ils ont été fixés à 3 m du sol (soit 1 mètre de plus que les mesures habituelles) afin de limiter les risques de vol ou de vandalisme (Roux, 2014). Une sonde a néanmoins disparu (parking du Zénith) et un abri a été retourné (Port du Canal). Les supports choisis sont des candélabres, garantissant homogénéité et éloignement des surfaces chaudes, ce sans avoir à installer un support. Les abris ont été fixés côté sud, au moyen de pattes prolongées, afin d'éviter que la température ne soit influencée par le support, les candélabres variant en couleur comme en matériau. Un effectif de 50 sondes, nécessaire pour les interpolations, a été retenu (Fig. 1).

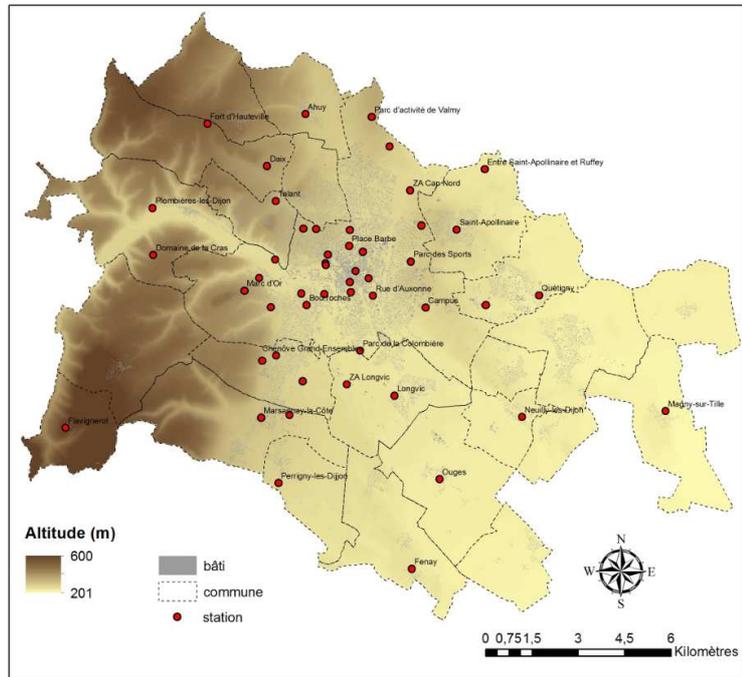


Figure 1. Le réseau MUSTARDijon et le Grand Dijon

50 sondes permettent d'échantillonner un maximum d'éléments naturels (relief, plan d'eau) et d'aménagements (type d'occupation du sol). Des sites ouverts ont été choisis, évitant le plus possible les ombres portées (bâtiments, arbres, ...). L'objectif était que les observations soient représentatives du quartier, et le moins possible influencées par l'environnement immédiat (rue, cour, ...), afin d'être comparées avec des températures simulées par modélisation dynamique à la résolution horizontale de 150m (Roux, 2014). 6 types de tissu urbain ont été instrumentés (Oke, 2006). Chacun accueille 8 à 12 sondes (Fig. 1). Au sein de chaque type, quelques sondes permettent d'explorer des questions d'échelle plus fine : influence de l'altitude, des parcs et jardins, des plans d'eau et de l'albédo des surfaces. A l'ensemble du dispositif vient s'ajouter la station Météo France Dijon-Longvic.

1.2. Premiers diagnostics

Les séries ont été contrôlées via des doubles cumuls avec la station Météo France Dijon-Longvic. Aucune rupture ou dérive n'a été identifiée, même dans l'abri retourné. La comparaison entre la série de températures horaires d'hyper centre-ville (place du Palais des Ducs) et celle de Dijon-Longvic permet d'identifier les grandes caractéristiques de l'été 2014 (Fig. 2 a et b). Les chroniques présentent de grandes similitudes décrivant le cycle diurne et les changements, rapides ou graduels, des conditions météorologiques d'échelle synoptique. Les différences renseignent sur les moments où la surface influence le plus la température. Généralement inférieure à $1|^\circ\text{C}$, la différence de température entre les deux stations atteint 6°C les nuits des 7-9 juin. Cette valeur, compte tenu de la taille de l'agglomération, est conforme à la littérature (Oke, 1973). L'application de la formule de Oke ($\Delta t_{u-r}=1,93\log P-4,76$, avec t_u et t_r température urbaine et rurale et P population) conduit en effet à un delta de $5,66^\circ\text{C}$ pour une population de 250.000 habitants. Les moments où l'ICU se développe

relèvent de deux échelles de temps. L'ICU est essentiellement nocturne et ne s'exprime nettement que certains jours.

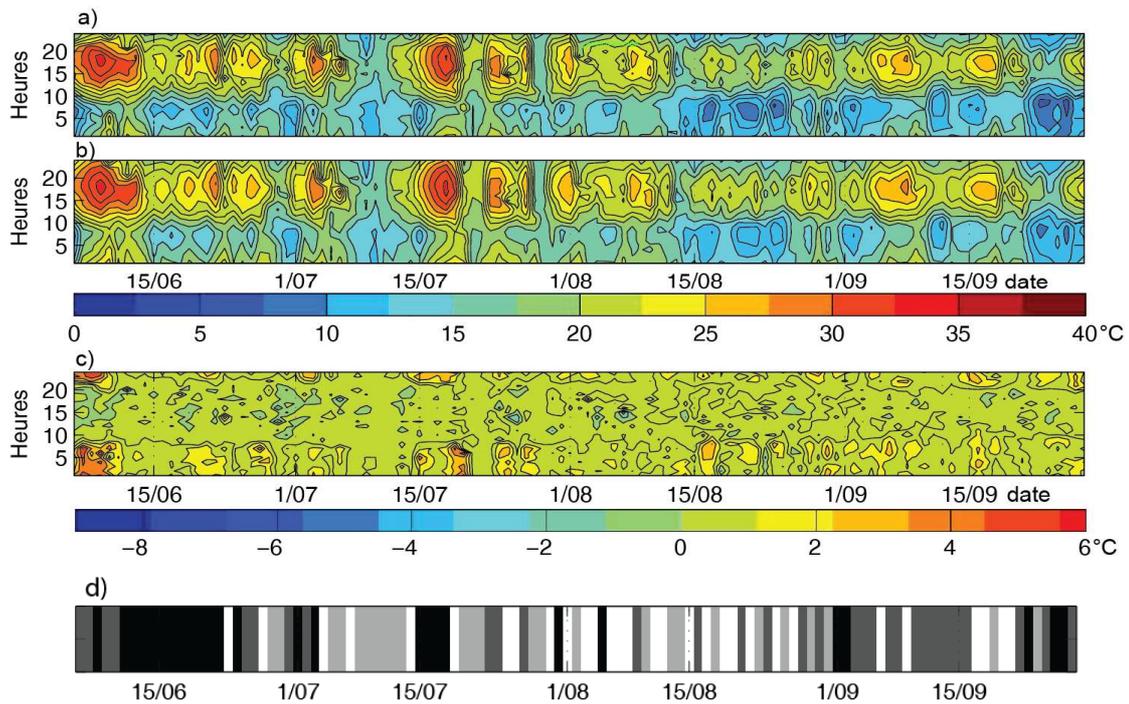


Figure 2. Chroniques horaires des températures de l'été 2014. a) station de référence : Dijon-Longvic, b) Place du Palais des Ducs, c) b-a, d) classes météorologiques : noir 1, gris foncé 2, gris clair 3, blanc 4.

2. Résultats

2.1. Température moyenne été 2014

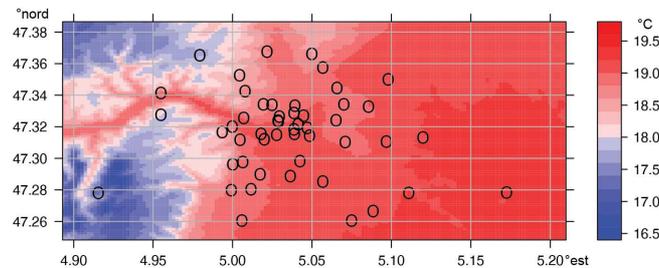


Figure 3. Température moyenne été 2014 estimée par régression sur l'altitude

Pour spatialiser les températures, nous employons une méthode de régression krigage (Hengl *et al.*, 2007), détaillée pour l'analyse de la température moyenne de l'été 2014. Une régression permet d'analyser les structures spatiales qui prévalent sur l'ensemble de la zone d'étude. En moyenne, sur l'été 2014, l'influence de l'altitude est forte : les différences d'altitude entre les 50 sondes expliquent 38% des variations spatiales des températures. Un gradient horizontal, essentiellement ouest-est, appréhendé via la combinaison latitude / longitude explique 20% des variations spatiales. Mais il est le fruit de la colinéarité entre longitude et altitude. La régression retenue ($T = -0.0068 \cdot \text{alt} + 20.68$) ne s'appuie donc que sur l'altitude (Fig. 3). Il y a environ 3°C d'écart entre le mont Afrique (600m) à l'ouest, et la plaine (200m) à l'est. Cet écart est produit par le gradient de 0.68°C/100m (coefficient directeur), gradient conforme à la littérature (0.6°C/100m en moyenne).

Sur les résidus de cette régression sont recherchées les structures spatiales de taille inférieure à la zone d'étude. Le semi-variogramme permet d'identifier une structure de portée

inférieure à $0,08^\circ$, soit quelques 7-8 km (Fig. 4a). Les résidus peuvent ainsi être krigés (Fig. 4b). Une poche chaude principale est identifiée sur le centre-ville (Dijon), une secondaire sur le sud-est de l'agglomération (Chenôve). Entre les deux, un axe frais correspond à la rivière Ouche. Le long de cet axe structuré par la rivière et le canal, on note, d'ouest en est, un lac (Kir), une « coulée verte » englobant une abondante ripisylve et un port (dit du canal) comportant une île boisée.

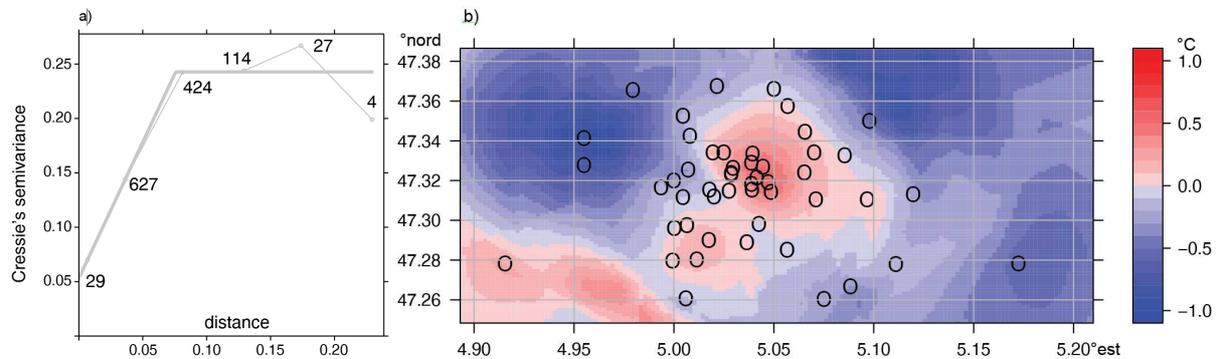


Figure 4. Température moyenne été 2014. a) semi-variogramme sur les résidus, b) krigage des résidus

Au sud-est de l'aire d'étude, une poche chaude n'est portée que par une seule station (Flavignerot). Au nord-ouest, une poche froide est également portée par une seule station (Plombières-les-Dijon). Ainsi le réseau déployé apparaît-il comme étant adapté à l'étude urbaine (poches portées par un ensemble conséquent de stations) et le krigage des résidus donne un ordre de grandeur quant à la valeur moyenne de l'ICU en été : $+1^\circ\text{C}$. En revanche, le réseau est inadapté en ce qui concerne les contrastes de températures sur l'ouest de l'agglomération, où le relief est marqué et complexe.

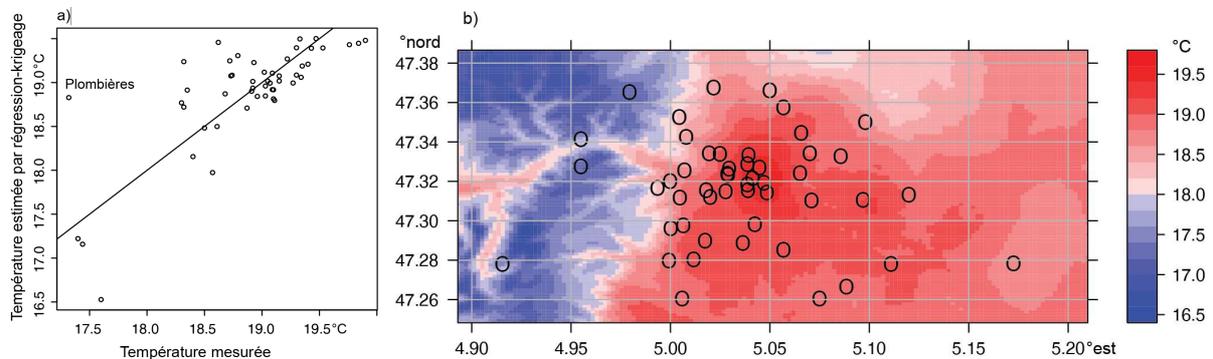


Figure 5. Température moyenne été 2014. a) validation croisée, b) estimation par régression-krigeage

Une validation croisée, où sont comparées aux 50 points de mesure, itérativement retirés de l'échantillon d'apprentissage, les températures observées et interpolées, signe une bonne qualité d'ensemble (alignement du nuage le long de la droite de parfaite interpolation) tout en présentant quelques points où les erreurs moyennes peuvent être importantes. L'erreur maximale (1.59°C) est notée à Plombières-les-Dijon (Fig. 5a). La cartographie finale (Fig. 5b) est élaborée en sommant les deux cartes intermédiaires (Fig. 3 et 4b). Lors de l'été 2014, les variations spatiales de la température moyenne du dijonnais (Fig. 5b) combinent ainsi essentiellement rôle du relief (Fig. 3) et de l'urbanisation (Fig. 4b).

2.2. Températures diurnes et nocturnes lors de conditions météorologiques contrastées

Le caractère discret de l'ICU, phénomène se développant essentiellement certaines nuits, nécessite de travailler sur des échantillons. Il convient d'identifier de manière objective les conditions météorologiques où l'ICU peut s'exprimer. Sa signature étant principalement une

atténuation de l'amplitude thermique diurne par moindre refroidissement nocturne, ont été analysés les rythmes diurnes des 115 jours. Au pas horaire, pour Dijon-Longvic, 7 variables ont été retenues : précipitations, pression, durée d'insolation, rayonnement global, visibilité et composantes zonale et méridienne du vent. La première composante d'une Analyse en Composantes Principales permet de produire un signal synthétisant les conditions météorologiques. Sur cette première composante, dont la valeur propre est de 30%, une Classification Hiérarchique Ascendante a été effectuée. Le dendrogramme permet d'isoler 4 grands types de rythmes diurnes (Fig. 6).

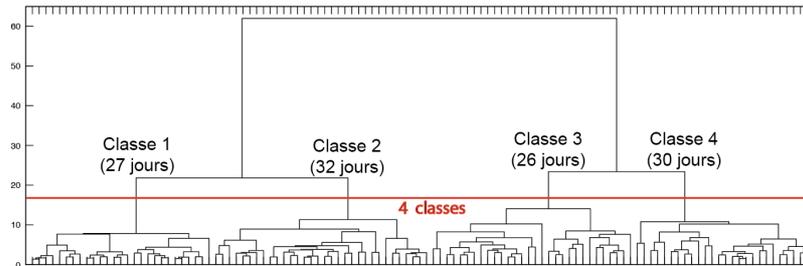


Figure 6. Dendrogramme de la CHA sur les 115 rythmes diurnes de la première CP d'une ACP. Station Météo France de Dijon-Longvic

Nous nous focalisons sur la classe 1 à laquelle est associée le plus fort ICU. Cette classe regroupe 27 jours (Fig. 1d) où les contrastes au cours des 24h ont été les plus importants en termes de rayonnement global, d'insolation et de vitesse de la composante méridienne du vent. Cela correspond à des conditions radiatives, sans vent synoptique régulier mais avec des brises de versant dont les vitesses et directions évoluent au cours des 24h. Nous affectons les valeurs nocturnes (1 à 8h UTC) du jour $j+1$ aux classes des jours j .

La méthode de régression-krigeage est appliquée au lever du jour, à 7h UTC (5h légales), lorsque les températures sont minimales (Fig. 7) et en fin d'après midi, à 17h UTC (15h légales), lorsque les températures sont maximales (Fig. 8). Au lever du jour, lorsque prévalaient des conditions radiatives la veille, l'altitude n'est pas un déterminant de la température. Seul un faible gradient nord-sud est observé ($R^2=0.02$). Les variations spatiales sont portées par des structures de taille inférieure au domaine d'étude, comme en témoigne le krigeage des résidus (Fig. 7a). En plaine, à savoir sur la moitié est de la zone d'étude, des écarts de 3 à 4°C sont observés entre le centre-ville et les zones rurales. Par beau temps la veille, les températures moyennes estivales au lever du jour, vont de 12°C en zone rurale, à 16°C en centre-ville et l'extension spatiale de l'ICU concerne toute l'agglomération (Fig. 7b).

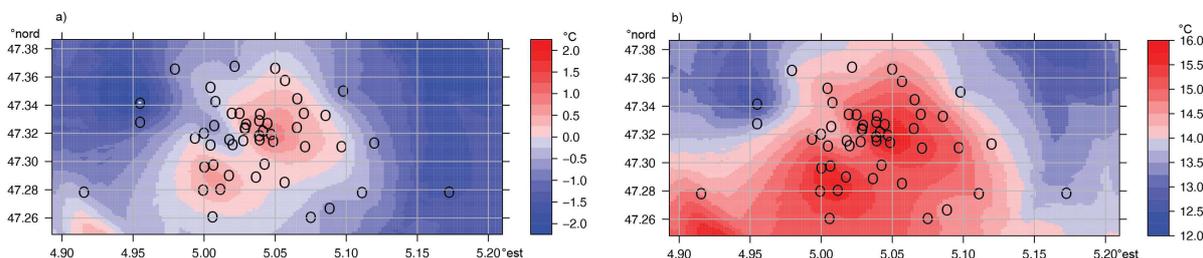


Figure 7. Température en classe 1 à 7h UTC. a) krigeage des résidus, b) estimation par régression-krigeage

A 17h UTC, le rôle de l'altitude est tyrannique : $R^2=0.58$. Associées dans une régression multiple, altitude, latitude et longitude expliquent 60% des variations spatiales. Il reste néanmoins des structures résiduelles, difficiles à kriger, expliquant des variations modérées (Fig. 8a). Au final, en plaine, les écarts entre centre-ville et zones rurales sont de l'ordre de 0.5°C (Fig. 8a). Ainsi, par beau temps, la température estivale en après midi est-elle avant tout fonction de l'altitude. Elle varie de 22°C en moyenne sur le Mont Afrique à 26°C en plaine, où elle est portée à 26.5°C en centre-ville.

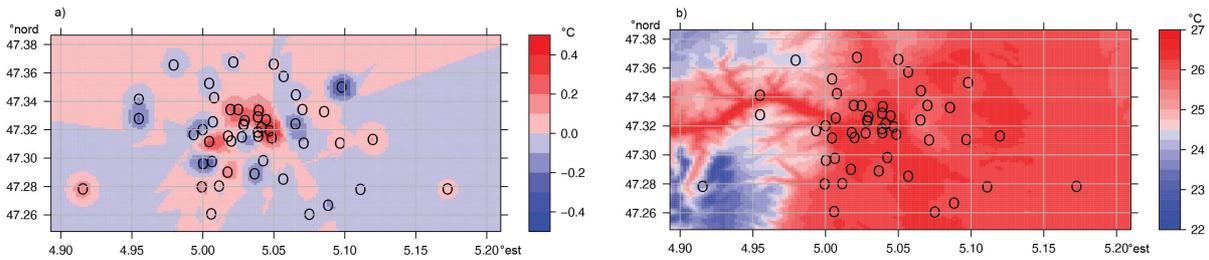


Figure 8. Température en classe 1 à 17h UTC. a) krigage des résidus, b) estimation par régression-krigeage

Conclusion

Cette étude préliminaire a permis de mesurer et de spatialiser l'ICU sur un été, 2014, dans une agglomération de 250.000 habitants, Dijon. Aucune canicule n'est intervenue. Néanmoins, lors des nuits de la période la plus chaude de l'été (début juin), l'ICU a atteint 6°C. En moyenne, sur l'ensemble de l'été, l'ICU est l'ordre de 1°C. A partir d'une CHA, il a été montré que par beau temps estival, l'ICU contribue à un différentiel de température limité à quelques dixièmes de degrés la journée (0.5°C), mais atteint 3 à 4°C au petit matin. Par régression-krigeage, on montre que l'ICU dijonnais présente une structure bipolaire. Deux poches chaudes circonscrites au centre ville se développent de part et d'autre d'un axe frais correspondant à la rivière, au canal, et aux zones vertes les jouxtant. Depuis septembre 2014, la campagne de mesure se poursuit et permettra de voir l'évolution des températures pendant les saisons intermédiaires, la période hivernale et un second été (2015). Des comparaisons seront effectuées avec des simulations réalisées avec le modèle WRF ainsi qu'avec l'imagerie infrarouge brillance 375x375m issu des derniers développements du Centre de Météorologie Spatiale.

Références bibliographiques

- Cam W.C.-N., 2012 : Technologies for Climate Change Mitigation: Building Sector. UNEP Risoe Centre on Energy, Climate and Sustainable Development, Roskilde, Denmark, 197 p. ISBN: 978-87-92706-57-7.
- Cantat O., 2014 : L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, **191**, 75-102.
- Hengl T., Heuvelink G.B.M., Rossiter D.G., 2007 : About regression-kriging: from equations to cases studies. *Computers & Geosciences*, **33**, 1301-1315.
- Hidalgo J., Pigeon G., Masson V., 2008 : Urban-breeze circulation during the CAPITOU experiment: observational data analysis approach. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **102**(3-4), 223-241.
- Meehl G.A., Tebaldi C., 2004 : More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science*, **5686**, 994-997.
- Oke T.R., 1973 : City size and the Urban Heat Island. *Atmospheric Environment*, **7**, 769-779.
- Lemonsu A., Kounkou-Arnaud R., Desplat L., Salagnac J.-L., Masson V., 2013 : Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate. *Climatic Change*, **116**, 679-692.
- Mestayer P.G., Durand P., Augustin P., Bastin S., Bonnefond J.-M., *et al.*, 2005 : The urban boundary-layer field campaign in marseille (ubl/clu-escompte): set-up and first results. *Boundary Layer Meteorology*, **114**, 315-365.
- Oke T.R., 2006 : *Initial Guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. WMO. <http://weather.gladstonefamily.net/UrbanMetOps.pdf>.
- Pigeon G., Lemonsu A., Masson V., Hidalgo J., 2008 : De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville, *La Météorologie*, **62**, 39-47.
- Robine J.-M., Cheung S.L.K., Le Roy S., Van Oyen H., Griffiths C., Michel J.-P., Herrmann F.R., 2008 : Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C. R. Biologies*, **331**, 171-178.
- Roux J., 2014 : L'îlot de Chaleur Urbain à Dijon : *Mise en place d'une campagne de mesures urbaines de la température*. Mémoire de Master, université de Bourgogne, 53 p.