

## PROJECTIONS DU CONFORT THERMIQUE DURANT LE XXIÈME SIÈCLE À NICE PAR DOWNSCALING STATISTIQUE

Nicolas MARTIN <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR 7300 ESPACE, Université Côte d'Azur, 98 Bd E. Herriot Campus Carlone, 06204 Nice,  
nicolas.martin@univ-cotedazur.fr

**Résumé :** Outre des vagues de chaleur de plus en plus intenses, l'évolution climatique génère de nouvelles normales thermiques qui mettent en péril le bien-être voire la santé de chacun. Ce travail traite de l'évolution des températures dans la ville de Nice pendant les étés du XXI<sup>e</sup> siècle. Par downscaling statistique mené sur les sorties de deux modèles climatiques régionaux (ALADIN-Climat 6.3 et REGCM 4.6 du projet CORDEX), des cartographies des températures moyennes de juillet à 1 m de résolution spatiale sont construites pour 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100. L'incertitude finale induite par les deux étapes successives de modélisation ne dépasse pas 1°C. L'indice humidex est calculé pour Nice en journée pour le RCP 8.5 et pour des hypothèses d'humidité relative de 60 à 80%. L'indice dépasse 45 en cœur d'été en 2081-2100.

**Mots-Clés :** projections climatiques, humidex, confort thermique, downscaling statistique.

### Introduction

Le sud-est de la France comme l'ensemble de la planète subit une évolution climatique rapide. L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre engendre un surplus énergétique dans le système climatique d'environ 3 W/m<sup>2</sup> actuellement (IPCC, 2021). La température de l'atmosphère et celles des océans augmentent, les glaces fondent et le niveau de la mer monte. Parallèlement les espaces urbains sont le siège d'un phénomène appelé îlot de chaleur urbain (ICU, Oke, 1981 ; Weston, 1988) qui se caractérise par des températures plus élevées dans ces lieux très artificialisés qu'à la campagne, notamment la nuit (Oke, 1973 et 1978). Le confort thermique urbain quantifié par exemple par l'humidex, par l'universal thermal climate index ou encore par la mean radiant temperature, se dégrade de plus en plus en raison de la hausse mondiale des températures, surtout durant les mois de juin à septembre. Les impacts sanitaires de ces manifestations climatiques sont déjà observés (Alonso et Renard, 2020). Les vagues de chaleur sont plus nombreuses, plus fréquentes et plus intenses (Meehl et al., 2004). L'urbanisation croissante rétroagit positivement sur la hausse des températures en ville en faisant baisser l'évapotranspiration des sols et de la végétation (Chapman et al., 2017 ; Kukla et al., 1986 ; Sun et al., 2019). Ainsi le nombre de décès prématurés liés au stress thermique augmente (Besancenot, 2002 ; Bobb et al., 2014). A titre d'exemple funeste, durant la première moitié d'août 2003 une surmortalité de 15000 personnes avait été enregistrée en France (Hémon et Jouglu, 2003).

Les ICU sont très largement documentés dans la littérature scientifique depuis plusieurs décennies et le nombre d'études par an ne cesse de croître, plus de 300 en 2015 par exemple (Masson, 2020). Cependant il n'est pas aisé de les appréhender au cas par cas, chaque site urbain étant une combinaison unique de facteurs topographiques et morphologiques. La densité de l'information météorologiques dans les villes, et notamment dans les centres urbains denses, est généralement très faible voire inexistante. Ainsi, quantifier le surplus de température, et le comportement de l'humidité voire le vent, en zone urbaine est un enjeu métrologique. Un réseau de mesures cohérent, associé à des campagnes de mesures mobiles, fournissent ces informations pour entrevoir la structure spatiale et temporelle des champs météorologiques de jour comme de nuit (Martin, 2018 ; Barbosa et Dubreuil, 2020 ; Richard et al., 2018 ; Alonso et Renard, 2020). Cette étape est complétée ensuite par la modélisation afin de combler les espaces qui restent encore non renseignés. Quel modèle de spatialisation choisir ? Deux grandes démarches coexistent : l'approche

dynamique et celle statistique. De nombreux projets privilégient le recours aux modèles dynamiques, avec par exemple le projet MApUCE (Bocher et al., 2018). Les ICU nocturnes de 80 villes françaises à 250 m de résolution spatiale ont été calculés via le modèle TEB (Town Energy Budget) en utilisant une classification des LCZ (Local Climate Zone) par télédétection. Malheureusement cette approche n'apporte pas de résultats satisfaisant pour la ville de Nice en raison de spécificités climatiques locales non intégrées (Gardes et al., 2020).

Ainsi ce travail s'appuie sur une démarche statistique tout en utilisant des données d'entrée produites par des modèles climatiques régionaux (RCM) dynamiques : le modèle ALADIN-Climat et le Regional Climate Model system. A partir des pixels de 12 km de côté de ces 2 RCM, et pour plusieurs périodes et plusieurs scénarios, une descente d'échelle statistique intégrant les caractéristiques topographiques et morphologiques locales est établie. Les cartes de températures minimales ( $T_n$ ) et maximales ( $T_x$ ) produites à 1 m de résolution spatiale sont validées par comparaison avec le réseau de mesures de Météo-France sur la période 1986-2005 et par des campagnes de mesures mobiles de températures récurrentes effectuées entre juin et août 2015 (Martin, 2018). Enfin le calcul de l'indice humidex est réalisé pour des valeurs d'humidité relative comprises entre 60 et 80%, niveaux statistiquement rencontrés durant les mois d'été sur le littoral azuréen (Carrega, 2017).

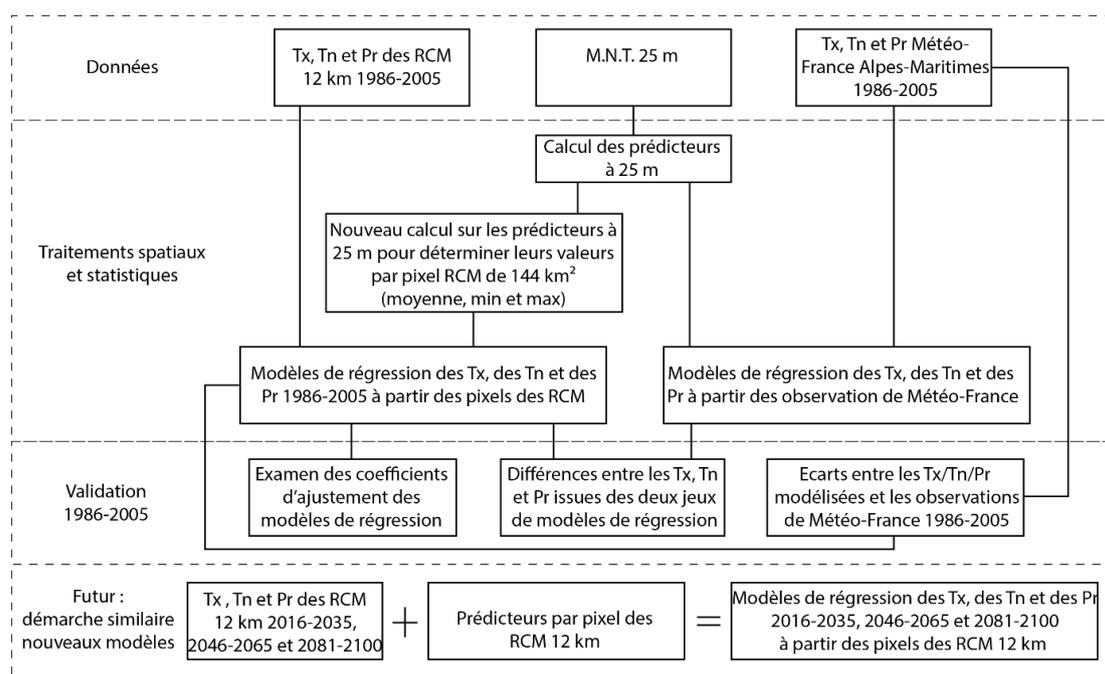
## **1. Données et méthodes**

### **1.1. Les sorties RCM ALADIN-Climat et RegCM4**

Les RCM utilisés sont le modèle ALADIN-Climat version 6.3 (AL63) du CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques – France) et le modèle RegCM4 version 6 (CM46) de l'ICTP (International Centre for Theoretical Physics – Italie), tous deux disponibles sur la plateforme Earth System Grid Federation et utilisés dans le projet Coordinated Regional climate Downscaling Experiment (<https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/esgf-ipsl/>). Chacun d'entre eux est alimenté en amont par des modèles climatiques globaux (GCM) différents. Le HadGEM2-ES est produit par le Met Office (anglais) et fournit les conditions aux limites du REGCM4. Il s'agit d'un « earth system model » (ESM), le type de modèle climatique global le plus élaboré actuellement. Le CNRM-CM5 (français) développé au CERFACS alimente ALADIN-Climat aux limites de son aire de modélisation. C'est également un ESM. Le recours à 2 GCM distincts, en amont, permet de prendre en compte plus d'incertitude relative à la modélisation climatique, c'est donc un avantage pour balayer un peu plus encore les champs des possibles.

### **1.2. Descente d'échelle statistique**

La méthode utilisée dans ce travail (Martin et al., 2013 et 2020), le downscaling statistique appliqué aux sorties de modèles climatiques régionaux, est illustrée dans la figure 1.



**figure 1.** Organigramme synthétique de l'enchaînement des traitements pour spatialiser à fine échelle spatiale les sorties des variables climatiques des modèles climatiques régionaux (source : Martin, 2020).

Les méthodes de descente d'échelle statistique sous-tendent que le climat régional ou local dépend de deux facteurs : le climat à échelle continentale et les caractéristiques locales ou régionales comme la topographie, la répartition terre/mer ou l'occupation du sol. La méthode retenue s'appuie sur la construction de modèles de régression linéaire multiple où chaque prédicteur retenu intègre un processus physique sous-jacent local pour expliquer et spatialiser les champs thermiques.

## 2. Résultats : cartes des températures minimales, maximales et indices humidex

### 2.1. Incertitudes des cartographies

Après une longue phase de tâtonnement, et cela pour chacune des variables à modéliser, les prédicteurs retenus pour les modèles de régression linéaire multiple sont les suivants :

- Température maximale – 5 prédicteurs : M.N.E. (Modèle Numérique d'Élévation) à 1 m, Topographic Position Index calculé dans un rayon de 3000 m, et dans un rayon de 40 m, exposition nord-sud des versant à 1 m et logarithme népérien de la distance à la mer à 1 m.
- Température minimale – 4 prédicteurs : M.N.E. à 1 m, logarithme népérien de la distance à la mer à 1 m, logarithme népérien de la hauteur de pente à 1 m et hauteur normalisée à 1 m (les deux derniers prédicteurs sont dérivés du M.N.E. selon le module « Relative Heights and Slope Positions » de SAGA-GIS).

Afin de mesurer la robustesse des modèles de régression mis en place, la comparaison des résultats avec les données mesurées par Météo-France au cours de la période de référence 1986-2005 est la plus rigoureuse des validations (calcul du RMCE, racine de la moyenne du carré des erreurs, à partir de 12 stations météorologiques implantées dans les Alpes-Maritimes dont 5 sur la frange littorale urbanisée). Pour l'ensemble des modèles mensuels des Tx, tout comme pour les modèles mensuels des Tn l'incertitude des modélisations climatiques à 1 m de résolution s'établit autour de 0,87°C (0,74°C pour les maximales et 1°C pour les minimales). Le tableau 1 ci-dessous regroupe les valeurs moyennes (établies à partir des 12

valeurs mensuelles) de RMCE obtenues pour chacune des variables climatiques relatives aux Tx et Tn modélisées à 1 m.

**Tableau 1.** Valeurs de RMCE pour les Tx et les Tn moyennes sur la période de référence 1986-2005 pour les deux RCM.

RMCE en °C	Tx AL63	Tx CM46	Tn AL63	Tx CM46
Moyenne	0,7	0,78	0,98	1,02

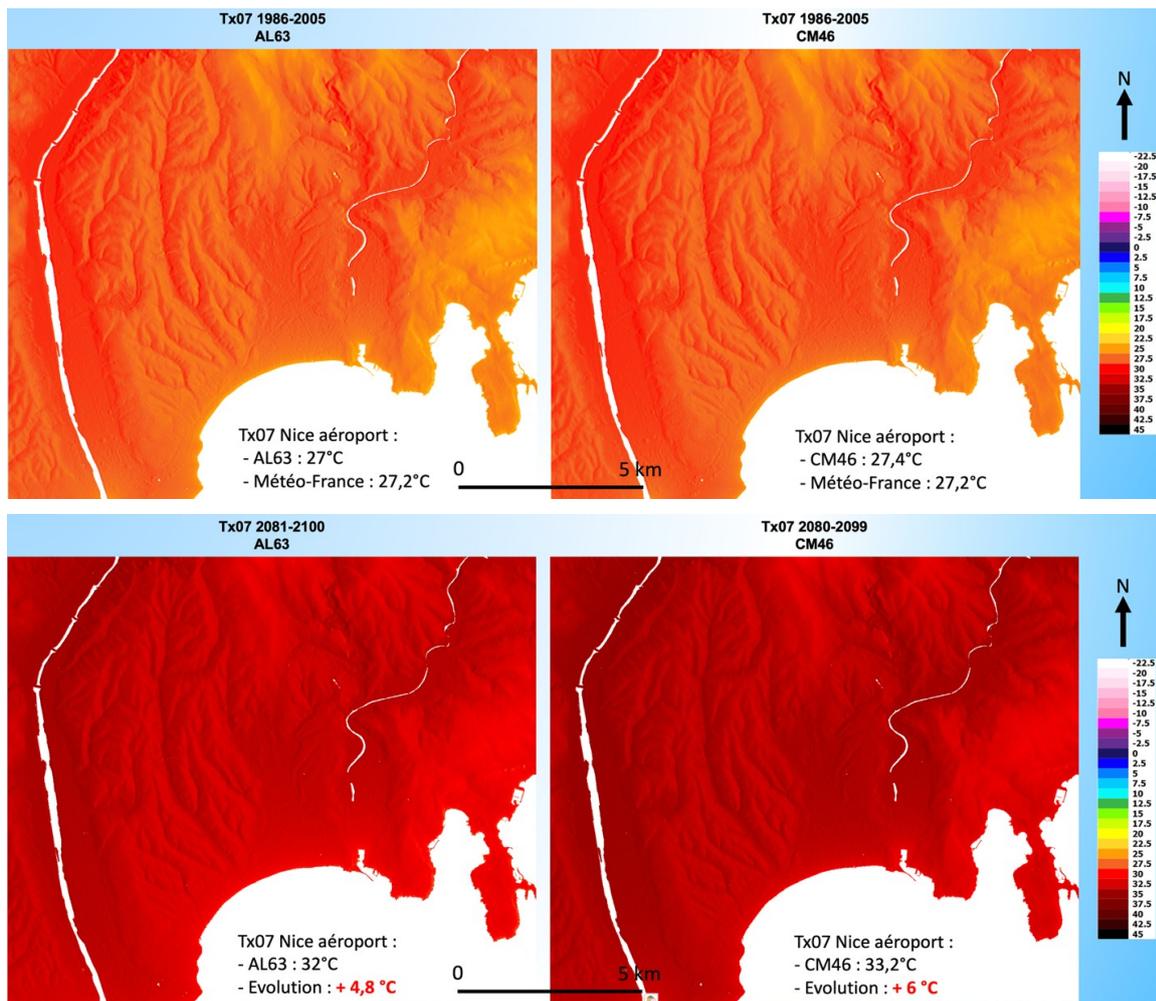
## 2.2. Cartographies des températures maximales et de l'humidex durant le XXI<sup>e</sup> siècle en juillet

La figure 2 représente les Tx moyennes à Nice en juillet de 1986-2005 et de 2081-2100 pour le RCP 8.5. Les sites les plus encaissés, orientés ouest et situés loin du littoral sont les plus chauds. La différence entre un versant exposé ouest et un autre exposé est s'élève parfois à 2°C à altitude similaire ; cet écart est aussi constaté entre un espace très littoral et un autre situé à plusieurs kilomètres du trait de côte. Les vallées ainsi que les vallons, par définition encaissés, sont les espaces les plus chauds, tout comme l'amphithéâtre niçois entre le littoral et les premières collines. La Promenade des Anglais, les hauts de versants exposés à l'est et les collines les plus élevées sont les lieux les moins chauds.

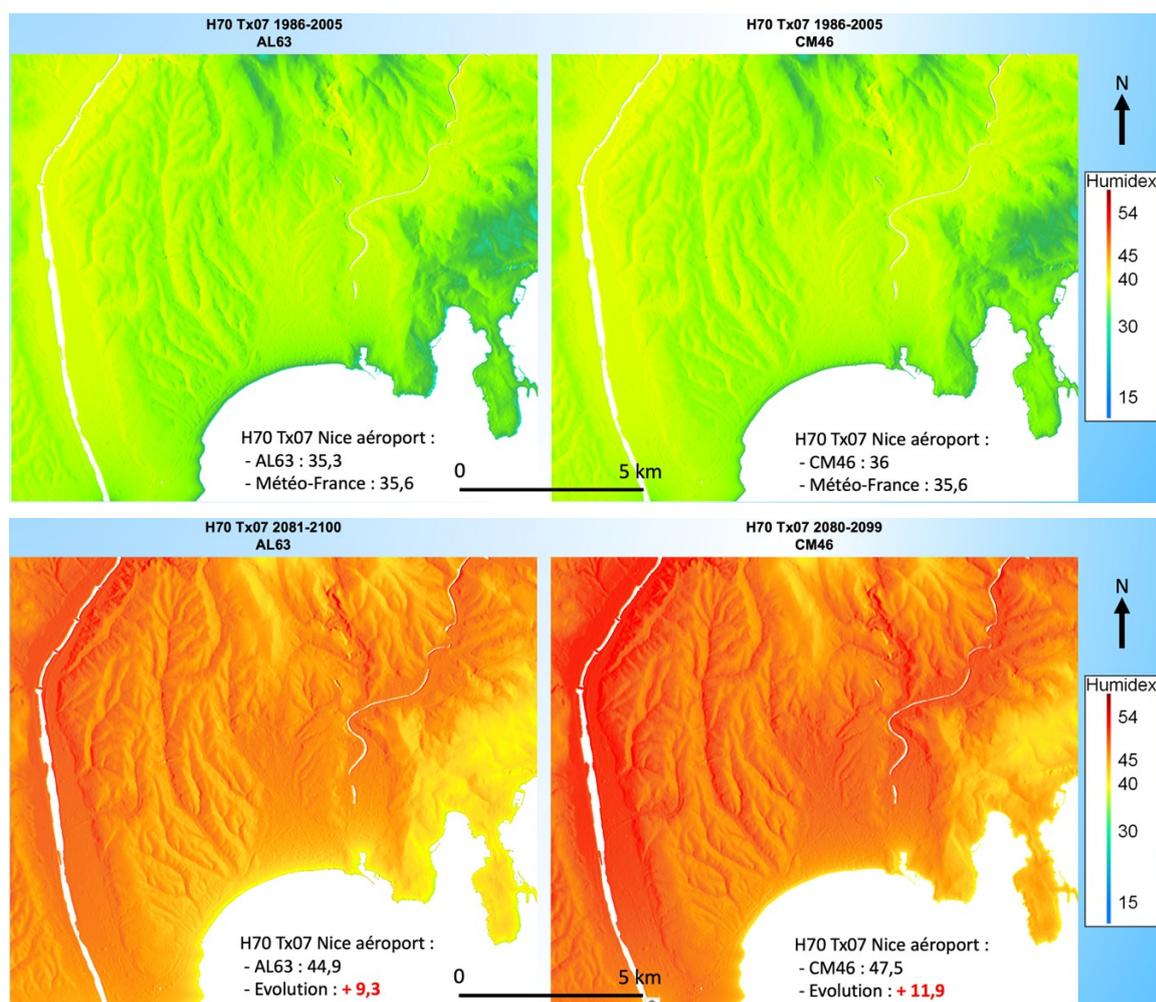
A l'échelle de ce territoire l'élévation des Tx dans le futur immédiat et plus lointain risque d'être fortement préjudiciable au confort thermique : l'augmentation actuelle de plus d'1°C promet d'atteindre 2,5 à 3°C en 2046-2065 puis 5 à 6°C pour la fin du siècle dans le RCP 8.5 (fig. 2). Ces chiffres seront fortement revus à la baisse dans l'hypothèse où le RCP 2.6 serait suivi, et la hausse des Tx serait plus mesurée, mais marquée (+2°C vers 2050 et + 2,5°C en 2090), en cas de réalisation du RCP 4.5.

Durant l'été à Nice l'humidité relative est constamment comprise entre 60 et 80% en journée et atteint même parfois 90% la nuit, cette variable étant homogène sur la commune de Nice. Ainsi afin d'établir les cartes d'humidex à 1 m de résolution spatiale plusieurs hypothèses peuvent être faites quant au niveau du taux d'humidité relative : 60%, 70% ou 80% pour la journée. Les cartes (figure 3) présentées ici ont été calculées pour un taux de 70%.

En journée et pour la période 1986-2005 en juillet l'humidex moyen (H70 Tx07) est compris entre 30 et 40 (fig. 3), synonyme donc d'un certain inconfort selon Environnement Canada (la transpiration s'évapore moins bien et la thermorégulation est plus difficile). Pour les mois de juillet 2016-2035 et le RCP 8.5 cet indice progresse pour atteindre et dépasser 40 au maximum avec des valeurs de 42-43 ; les niçois ressentent donc aujourd'hui beaucoup d'inconfort pendant la période estivale. Pour 2046-2065 la hausse de cet indice se poursuivra avec le réchauffement : il dépassera 40 dans beaucoup d'espaces à Nice (excepté la frange littorale et le sommet des collines les plus élevées). Les plus fortes valeurs flirteront avec 45, synonyme de danger pour la santé. Enfin toujours dans le RCP 8.5 et pour la fin du siècle l'humidex explosera, avec très peu d'espaces où l'indice sera inférieur à 45, seulement le littoral et les premières centaines de mètres derrière le trait de côte (fig. 3). Ainsi l'ensemble de la population niçoise sera exposé à un danger pour sa santé durant un été « moyen » puisqu'il s'agit ici du calcul de l'humidex en fonction de la température maximale moyenne de juillet.



**figure 2.** Températures maximales moyennes de juillet 1986-2005 (en haut) et 2081-2100 (en bas) en °C à 1 m après downscaling statistique sur les modèles ALADIN6-3 et RegCM4-6.



**figure 3.** Indices humidex moyens de juillet 1986-2005 (en haut) et 2081-2100 RCP 8.5 (en bas) à 1 m après downscaling statistique sur les modèles ALADIN-3 et RegCM4-6 pour les températures maximales et pour une hypothèse de 70% d'humidité relative sur l'ensemble de la carte.

## Conclusion

La méthode de downscaling statistique, validée par l'observation, a permis de considérablement améliorer la représentation cartographique des deux modèles climatiques régionaux ALADIN-Climat et REGCM4. De larges pixels de 12 km de côté la résolution spatiale des cartes est passée à 1 m pour la ville de Nice.

Les tendances sont très claires et significatives puisque les deux modèles climatiques régionaux vont dans le même sens et anticipent une même intensité d'évolution. La réalisation du RCP 2.6 signifierait que le climat évoluerait quelque peu encore dans les décennies à venir mais que la hausse des températures serait très limitée. En revanche si le monde suit les RCP 4.5 ou 8.5 alors le climat urbain de Nice s'en verrait profondément affecté. Plus le temps passera et plus l'été semblera long avec un glissement des profils thermiques estivaux vers le printemps et vers l'automne : les températures de juillet 1986-2005 s'observeront bientôt en juin puis en mai ; celles d'août 1986-2005 déborderont sur septembre puis octobre. Quant aux cœurs d'été de 2081-2100 dans le RCP 8.5, ils seront comparables au climat actuellement observé dans l'intérieur des terres sur la rive sud de la mer Méditerranée.

L'une des principales conséquences de cette évolution sera la forte dégradation du confort thermique estival, des impacts sanitaires forts engendrés par des vagues de chaleur sont à redouter : l'aménagement du territoire via notamment une politique volontariste portant sur l'isolation thermique des bâtiments doit être menée afin de protéger la population. Autre question inquiétante, celle de l'eau et de sa disponibilité : en dépit des incertitudes fortes pesant sur la modélisation des précipitations, il serait illusoire de compter sur leur augmentation durant l'été alors même que les températures progresseront ; l'évaporation sera donc plus forte et les besoins en eau s'accroîtront : comment espérer refroidir les espaces urbanisés avec l'aménagement d'espaces verts qui en absence d'eau ne pourront assurer le mécanisme d'évapotranspiration, véritable climatiseur naturel ?

**Remerciements** : Nous remercions l'ESGF (Earth System Grid Federation) pour la mise à disposition des sorties des modèles climatiques régionaux ALADIN 6.3 et REGCM 4.6

## Bibliographie

- Alonso L. et Renard F., 2020: A Comparative Study of the Physiological and Socio-Economic Vulnerabilities to Heat Waves of the Population of the Metropolis of Lyon (France) in a Climate Change Context. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **17**(3):1004.
- Barbosa H. et Dubreuil V., 2020 : L'utilisation des transects mobiles et des données satellitaires pour caractériser les îlots de chaleur urbains dans l'agglomération rennaise (Bretagne, France). *Actes du XXXIIIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes.
- Besancenot J-P., 2002 : Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines. *Environnement, Risques et Santé*, **1**, 229-40.
- Bobb, Jennifer F., Roger D. Peng, Michelle L. Bell, and Dominici F., 2014: Heat-Related Mortality and Adaptation to Heat in the United States. *Environmental Health Perspectives* **122**(8):811–16.
- Bocher E., Petit G., Bernard J. et Palominos S., 2018: A geoprocessing framework to compute urban indicators: The MApUCE tools chain. *Urban Climate* **24** (2020) 153-174 <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.01.008>
- Carrega P., 2017 : Évolution mensuelle du climat à Nice-aéroport (France) en 70 ans : idées reçues, embûches et faits établis. *Bulletin de la Société Géographique de Liège* **68** (2017/1) : pp 49-68.
- Chapman S., James E. M. Watson, Salazar A., Thatcher M., and Clive A. McAlpine. 2017: The Impact of Urbanization and Climate Change on Urban Temperatures: A Systematic Review. *Landscape Ecology* **32**(10):1921–35.
- Gardes T., Schoetter R., Hidalgo J., Long N., Marquès E. et Masson V., 2020: Statistical prediction of the nocturnal urban heat island intensity based on urban morphology and geographical factors – An investigation on numerical model results for a large ensemble of French cities. *Science of the Total Environment* **737** (2020) 139253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139253>
- Hémon D. et Jouglé E. 2003 : Surmortalité liée à la canicule d'août 2003. *Rapport au ministère de la santé*. INSERM. Rapport d'étape, 25 septembre 2003.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Kukla, G., J. Gavin, and T. R. Karl. 1986: Urban Warming. *Journal of Climate and Applied Meteorology* **25**(9):1265–70.
- Martin N., 2020 : Cartographies climatiques à fine résolution spatiale sur le territoire de la métropole Nice Côte d'Azur de 1986-2005 à 2081-2100. *Rapport pour l'élaboration du Plan Climat-Air-Énergie Territorial*, 43 p.
- Martin N., 2018 : Variabilité spatiale des températures maximales à Nice entre mai et septembre 2015, *Actes du XXXIe colloque de l'AIC*, Nice juillet 2018, pp 26-31.
- Martin N., Carrega P. et ADNES C., 2013 : Downscaling à fine résolution spatiale des températures actuelles et futures par modélisation statistique des sorties ALADIN-Climat sur les Alpes-Maritimes (France), *Climatologie* **10**, pp 51-72.

- Masson V. et al., 2020: City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges. *Urban Climate* **31** 100536. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100536>
- Masson V., Lemonsu A., Hidalgo J. et Voogt J., 2020 : Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources* **45**:441-44. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623>
- Meehl, Gerald A., and Tebaldi C., 2004: More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science* **305**(5686):994–97.
- Oke, T. 1973: City Size and the Urban Heat Island. *Atmospheric Environment (1967)* **7**:769–79.
- Oke, T. R. 1978: Boundary Layer Climates, Londres, *Géographie physique et Quaternaire* **32**(3):290–91.
- Oke, T. R. 1981: Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations. *Journal of Climatology* **1**(3):237–54.
- Richard Y., Emery J., Dudek J., Pergaud J., Chateau-Smith C., Zito S., Rega M., Vairet T., Castel T., Thévenin T., and Pohl B. 2018: How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Climate* **26**:258–74.
- Sun, Yanwei, Chao Gao, Jialin Li, Run Wang, and Jian Liu. 2019: Quantifying the Effects of Urban Form on Land Surface Temperature in Subtropical High-Density Urban Areas Using Machine Learning. *Remote Sensing* **11**(8):959.
- Weston, K. J. 1988: Boundary Layer Climates. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **114**(484):1568–1568.