

MODÉLISATION CLIMATIQUE RÉGIONALE À HAUTE RÉOLUTION POUR L'ÉTUDE DU CLIMAT URBAIN : ÉVALUATION DU MODÈLE CNRM-AROME SUR 12 VILLES FRANÇAISES

Yohanna MICHAU ¹, Aude LEMONSU ¹, Philippe LUCAS-PICHER ^{1,2}, Cécile CAILLAUD ¹, Antoinette ALIAS ¹

¹ CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, France, yohanna.michau@meteo.fr

² Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère, Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada

Résumé : Les villes sont le siège d'un microclimat spécifique dont l'évolution, couplée aux changements globaux, pourrait notamment exacerber les problématiques déjà existantes de stress thermique des populations urbaines. Ces évolutions restent mal connues car les effets urbains sont peu pris en compte par les modèles de climat actuels. Cette étude analyse le climat urbain simulé sur une échelle de temps climatologique pour 12 villes situées en France métropolitaine. Pour cela, le modèle régional de climat à convection profonde résolue (CP-RCM, Convection-Permitting Regional Climate Model) CNRM-AROME couplé à TEB a été utilisé à 2.5 km de résolution horizontale afin d'évaluer l'habileté du modèle à reproduire des champs atmosphériques et à simuler l'îlot de chaleur urbain nocturne (ICUN). Le modèle présente certains biais systématiques sur les forçages atmosphériques comme le rayonnement solaire incident et les précipitations, qui peuvent engendrer des biais sur les températures en surface. Néanmoins, CNRM-AROME simule de manière réaliste la variabilité saisonnière et les intensités minimales et maximales de l'ICUN sur la plupart des villes, et pourrait donc être appliqué désormais en climat futur.

Mots-Clés : Modélisation climatique à haute résolution, Climat urbain, Îlot de chaleur.

Abstract : **High-resolution regional climate modelling for urban climate studies: evaluation of the CNRM-AROME model on 12 French cities** - Cities have a specific microclimate whose evolution, coupled with global changes, involves several uncertainties. In particular, it could exacerbate problems of thermal stress of urban populations. These evolutions are little known because the urban effects are poorly taken into account by the current climate models. This study analyzes the urban climate simulated by a model on 12 cities located in metropolitan France. For this purpose, the Convection-permitting Regional Climate Model (CP-RCM) CNRM-AROME coupled to TEB was used at 2.5 km resolution to evaluate the model's ability to reproduce atmospheric fields and to simulate the nighttime Urban Heat Island (UHIN). The model has a few systematic biases on atmospheric forcings such as incident solar radiation and precipitations, which can lead to biases on surface temperatures. However, CNRM-AROME realistically simulates seasonal variability and minimum and maximum intensities of the UHIN over most cities, and could be applied in future climate.

Keywords : High-resolution climate modelling, Urban climate, Heat island.

Introduction

La spécificité du domaine urbain provient de sa morphologie tridimensionnelle complexe et des matériaux artificiels qui le composent. Les constructions et infrastructures urbaines constituent des obstacles en surface qui perturbent d'une part les écoulements d'air et les échanges turbulents, et d'autre part l'interception du rayonnement incident et les interactions radiatives entre les différents éléments de l'environnement urbain (Oke et al. 2017). Ces processus donnent naissance à un microclimat spécifique au domaine urbain, caractérisé notamment par l'apparition d'îlots de Chaleur Urbain (ICU). Le climat urbain diffère selon les caractéristiques des villes (taille, densité urbaine, caractéristiques architecturales, population etc.), les contextes géographiques et les conditions atmosphériques. Son évolution dans le temps est conditionnée par de multiples facteurs sociétaux, économiques et environnementaux (croissance démographique, modification de la ville et du bâti, changements du mode de vie et d'usage de l'énergie, etc.) et est incertaine sous l'effet du changement climatique. L'étude combinée du climat urbain local et des effets régionaux liés au changement climatique requiert des outils de modélisation adaptés permettant le

couplage des processus. Les modèles régionaux de climat à convection profonde résolue (CP-RCM, Convection-Permitting Regional Climate Model) sont particulièrement intéressants pour simuler les zones urbaines (Shu et al., 2021), car leur haute résolution leur permet de simuler explicitement plusieurs phénomènes de petites échelles comme les ICU. Dans ce cas, en raison des particularités de l'environnement urbain, la simulation du climat urbain dépend du couplage du modèle atmosphérique avec un modèle de canopée urbaine (UCM, Urban Canopy Model) comme le Town Energy Balance (TEB) (Masson, 2000).

Dans cette étude, le CP-RCM CNRM-AROME couplé à TEB a été utilisé à 2.5 km de résolution sur un domaine qui couvre la France sur la période 2000-2018. Ce domaine est idéal pour étudier le climat urbain d'un ensemble de villes de France métropolitaine. Ainsi, 12 grandes et moyennes villes ont été sélectionnées dans 4 zones climatiques : le climat continental (Dijon, Nancy et Strasbourg), le climat méditerranéen (Montpellier, Nice et Nîmes), le climat océanique (Bordeaux, Lille, Nantes et Rennes) et le climat semi-océanique (Paris et Toulouse).

L'objectif est (1) d'évaluer la performance globale du modèle afin d'avoir un premier aperçu des capacités de CNRM-AROME à reproduire les champs atmosphériques et, sans doute, mieux comprendre les résultats obtenus dans les analyses suivantes, et (2) d'évaluer la capacité du modèle à simuler les ICU nocturnes (ICUN) par rapport aux observations.

1. Matériels et méthodes

1.1. Configuration des simulations climatiques

CNRM-AROME est un modèle non-hydrostatique à résolution kilométrique développé par Météo-France pour la prévision numérique du temps (Seity et al., 2011). Il est maintenant utilisé en mode climat à 2.5 km de résolution horizontale (Caillaud et al., 2021). Dans le cadre de cette étude, CNRM-AROME a été utilisé sur le domaine Nord-Ouest de l'Europe comptant 720 × 900 points de grille. L'atmosphère est discrétisée selon 60 niveaux verticaux, ces derniers étant plus concentrés près de la surface. Les simulations ont été produites pour la période allant du 01 janvier 2000 au 31 décembre 2018 (après 2 ans de spin-up) en suivant une configuration dite d'évaluation. Le modèle est forcé à ses frontières latérales par le modèle de climat régional CNRM-ALADIN de résolution horizontale 12.5 km, lui-même contraint par les réanalyses globales ERA-Interim de résolution horizontale 80 km.

CNRM-AROME est couplé à la plateforme SURFEX (Masson et al., 2013) pour la modélisation des surfaces continentales et leurs interactions avec l'atmosphère. Chaque point de grille du domaine de simulation est décrit comme la combinaison de quatre types de couverts : les surfaces naturelles continentales, les zones urbaines, les eaux continentales (lacs, fleuves...) et les eaux océaniques (mer ou océan). Les échanges entre la surface et l'atmosphère de chaque type de couverts sont calculés indépendamment par différents modèles (dont TEB, Masson (2000) et ISBA 3-L, Boone et al., 1999). La description de la surface s'appuie sur la base de données globale d'occupation et d'usage des sols ECOCLIMAP I (Champeaux et al. 2003).

1.2. Longues séries d'observations météorologiques

Le produit ANASTASIA est un jeu de données sur grille de température minimale (TN) et maximale (TX) à résolution horizontale kilométrique sur la France métropolitaine (Besson et al., 2019) couvrant la période 1947-2016. Les données quotidiennes sont déterminées à l'aide d'une méthode de régression-krigeage (Hengl et al., 2007) combinant des TN et TX journalières enregistrées par les stations du réseau Météo-France et une climatologie mensuelle.

COMEPHORE est un jeu de données composé par la fusion des observations des radars de précipitation et des mesures des pluviomètres du réseau météorologique français. Il fournit des précipitations cumulées horaires sur grille à une résolution horizontale de 1 km pour la période 1997-2018.

Les données de stations du réseau GEBA (Global Energy Balance Archive) produites par l'ETH Zurich en Suisse (Wild et al., 2017) et les stations de surface du réseau Météo-France fournissent de longues séries temporelles du rayonnement solaire entrant mensuel provenant de stations à la surface de la Terre.

Enfin les données météorologiques du réseau opérationnel de Météo-France ont été utilisées pour compléter l'évaluation des simulations CNRM-AROME. Pour chaque ville étudiée, deux (ou trois) stations ont été sélectionnées afin de disposer systématiquement de deux longues séries de températures quotidiennes, l'une dans la ville (station urbaine) et l'autre dans l'environnement naturel proche (station rurale). Cette méthodologie vise à évaluer l'îlot de chaleur urbain, c'est-à-dire la différence de température entre la ville et la campagne, sur une échelle de temps climatologique.

2. Évaluation générale de CNRM-AROME

Le climat urbain, et en particulier l'ICU, évolue quotidiennement en fonction des conditions météorologiques locales (ensoleillement, vent, précipitation, etc.). La qualité de la simulation de l'ICU par CNRM-AROME dépend, entre autres facteurs, de sa capacité à simuler des conditions climatiques réalistes. La première étape de l'évaluation générale se concentre donc sur l'analyse de la précipitation, du rayonnement solaire incident et de la température, dont les résultats sont disponibles dans le Tableau 1.

Tableau 1. Biais moyens saisonniers calculés entre le modèle CNRM-AROME et la base de données COMEPHORE (pour les précipitations, **PR, en %**), les observations issues des stations GEBA ou Météo-France (pour le rayonnement solaire incident, **GLO, en %**), la base de données ANASTASIA (pour la température minimale et maximale, **TN et TX, en °C**) sur la période 2000-2018 pour PR et GLO ou 2000-2016 pour TN et TX.

Biais	DJF				MAM				JJA				SON			
	PR (%)	GLO (%)	TN (°C)	TX (°C)	PR (%)	GLO (%)	TN (°C)	TX (°C)	PR (%)	GLO (%)	TN (°C)	TX (°C)	PR (%)	GLO (%)	TN (°C)	TX (°C)
BORDEAUX	+20.3	+13.6	+0.9	-0.7	+31.0	+9.8	+0.8	-1.9	-30.7	+14.4	+2.3	+1.0	+7.6	+15.0	+1.6	0.0
LILLE	+32.9	+10.9	+0.3	-0.4	+54.7	+5.6	-0.2	-1.5	+1.1	+14.3	+0.2	+0.0	+11.8	+13.0	-0.1	-0.2
NANTES	+27.6	+6.7	+0.5	-0.7	+35.5	+3.9	-0.0	-2.0	-16.1	+12.7	+0.8	+0.5	+12.5	+12.2	+0.4	-0.4
RENNES	+26.2	+6.7	+0.2	-0.7	+43.6	+6.9	-0.1	-1.8	-10.3	+14.0	+0.4	+0.3	+14.4	+10.9	+0.1	-0.4
DIJON	+24.3	+30.7	+0.6	-0.4	+35.1	+12.5	+0.5	-1.8	-5.5	+16.3	+1.8	+0.6	+0.58	+21.8	+0.9	+0.3
NANCY	+24.4	+27.1	+0.8	-0.3	+46.1	+14.8	+0.7	-1.7	+4.4	+15.9	+1.7	+0.2	-1.4	+24.7	+0.8	+0.2
STRASBOURG	+63.5	+35.5	-0.0	-0.5	+72.9	+17.0	-0.1	-2.0	+22.3	+16.7	+1.3	-0.1	+21.4	+27.2	+0.5	0.0
MONTPELLIER	-11.3	+12.0	+2.6	-0.6	+15.0	+10.1	+1.9	-2.0	-44.0	+8.9	+3.3	-0.6	+1.8	+6.7	+2.4	-0.9
NICE	-1.7	+17.7	+3.6	+0.2	+18.8	+11.2	+2.5	-1.2	-21.6	+6.3	+3.5	-0.6	+0.1	+10.6	+3.3	-0.1
NÎMES	-12.1	+11.5	+1.4	-0.8	+13.6	+10.1	+1.2	-1.4	-45.5	+9.1	+3.1	+1.0	-2.0	+7.0	+1.6	-0.6
PARIS	+28.7	+22.8	+0.5	-0.6	+52.8	+6.0	+0.2	-1.8	+2.3	+15.0	+1.2	+0.1	+10.7	+17.0	+0.5	-0.1
TOULOUSE	+21.7	+13.7	+1.1	-0.6	+37.9	+9.3	+0.3	-1.8	-20.8	+16.1	+1.8	+1.8	+14.8	+18.4	+1.0	-0.0

Les scores sur la précipitation (PR) soulignent la variabilité saisonnière et géographique du modèle. De manière générale, pour les villes océaniques, semi-océaniques et continentales, la précipitation est surestimée par CNRM-AROME en DJF (hiver, de +20 à +33 %), MAM (printemps, de +31 à +56 %) et SON (automne, de +15 % maximum), tandis qu'elle est sous-estimée en JJA (été, de -21 % maximum). Les ordres de grandeur donnés ici n'incluent pas les résultats de Strasbourg, qui montrent des performances locales particulièrement dégradées avec une surestimation de la précipitation tout au long de l'année de +21 à +73 %. Pour les villes méditerranéennes qui connaissent une climatologie régionale particulière en matière de précipitation, CNRM-AROME présente des performances différentes avec une tendance à sous-estimer les précipitations déjà faibles. En DJF et surtout en JJA, un déficit de précipitations est constaté (jusqu'à -45 % pour Nîmes en JJA). À noter que Bordeaux et Toulouse, situées dans la moitié sud de la France, présentent des résultats similaires avec respectivement -30.7 et -20.8 % en JJA. Enfin, sur la zone méditerranéennes, les précipitations simulées sont très proches de celles observées en SON. Elles restent surestimées en MAM comme sur le reste des villes, mais avec des biais beaucoup plus faibles (supérieurs à +20 %).

CNRM-AROME surestime le rayonnement solaire incident pour toutes les saisons et dans l'ensemble des villes. Les biais les plus importants sont calculés pour les villes continentales (Dijon, Nancy et Strasbourg). Le rayonnement solaire incident est fortement surestimé par le modèle en DJF (de +27 à +36 %) et en SON (de +22 à +27 %), et plus modérément en MAM et JJA (de +13 à +17 %). Pour les villes océaniques, les biais varient de +4 à +15 %, de +6 à +23% pour les villes semi-océaniques et de +6 à +18 % pour les villes méditerranéennes.

Le modèle CNRM-AROME reproduit un TN saisonnier réaliste dans les villes du nord-ouest, en particulier en MAM et SON. À Lille et à Rennes, les biais moyens sont inférieurs à $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ à toutes les saisons. Le modèle fonctionne bien pour Nantes et Paris, sauf en JJA. Il surestime la TN dans les autres villes à toutes les saisons, mais avec une variabilité géographique. Les villes situées sur la diagonale Strasbourg-Toulouse ont des biais inférieurs à 1°C en DJF, MAM, SON, et des biais plus élevés en JJA (entre $+1.3$ et $+1.8^{\circ}\text{C}$). Les biais sont maximaux pour Bordeaux, Montpellier, Nice et Nîmes (supérieurs à $+0.5^{\circ}\text{C}$ pour toutes les saisons). Cette surestimation des TN simulées par CNRM-AROME est particulièrement forte en été où les biais dépassent 3°C dans les villes méditerranéennes. En ce qui concerne les TX, les villes du sud comme Bordeaux, Dijon, Nîmes, et Toulouse, présentent des biais forts en été (entre $+0.6$ et $+1.8^{\circ}\text{C}$). Autrement, le modèle CNRM-AROME a tendance à sous-estimer les TX pour les autres saisons. Ces biais froids sont très faibles en SON, un peu plus forts en hiver (inférieurs à -1°C pour toutes les villes) et en MAM (entre -1.2 et -2°C).

3. Modélisation des îlots de chaleur urbains

Cette étape vise à évaluer la capacité du modèle à simuler spécifiquement le climat urbain pour chaque ville. Une attention particulière est accordée à l'ICU nocturne (ICUN), dont l'intensité est fortement déterminée à la fois par les particularités de la ville elle-même (taille, densité de construction, matériaux, etc.) et par les conditions atmosphériques du jour précédent.

La Figure 1 montre les moyennes mensuelles des ICUN calculées à partir des 19 années de données.

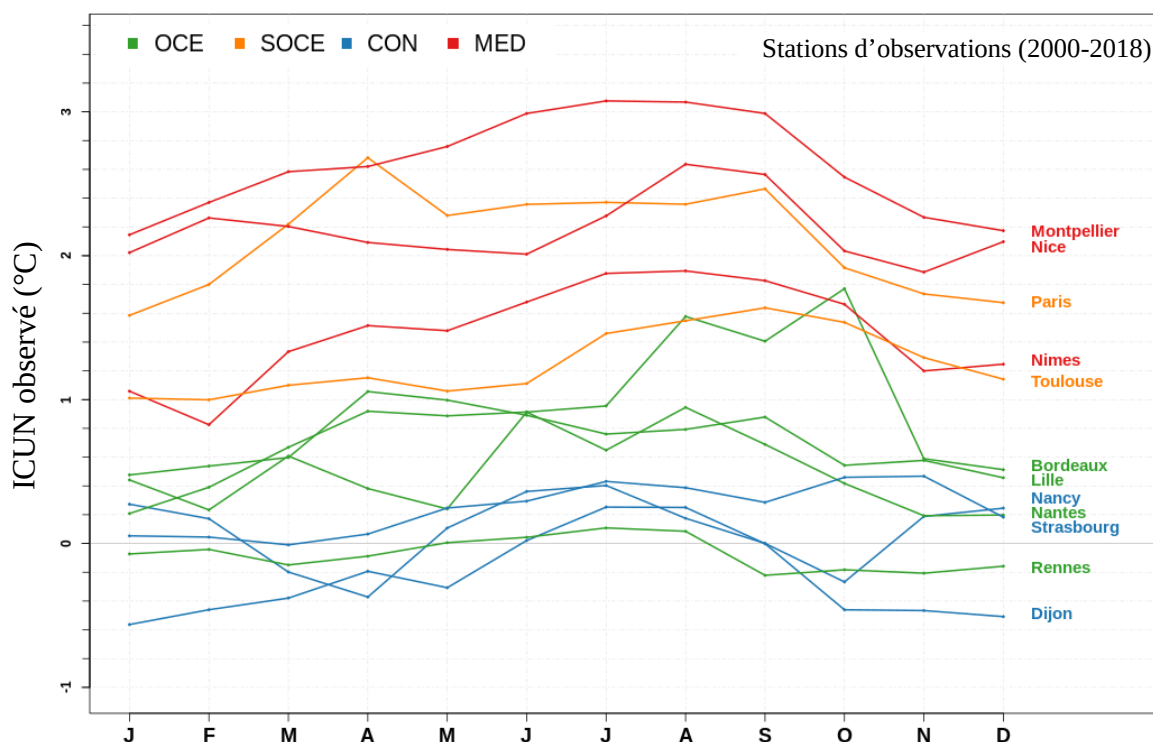


Figure 1. ICU nocturnes (en $^{\circ}\text{C}$) sur la période 2000-2018 provenant des stations météorologiques rurales et urbaines. Les couleurs définissent chaque zone climatique : vert pour OCEANIQUE, orange pour SEMI-OCEANIQUE, bleu pour CONTINENTAL et rouge pour MÉDITERRANÉEN.

Une dispersion des intensités des ICUN d'environ 3°C est constatée entre les 12 villes étudiées, de -1°C à $+2.2^{\circ}\text{C}$ pour les ICUN d'hiver et de 0 à $+3.1^{\circ}\text{C}$ pour les ICUN d'été. Le cycle annuel diffère d'une ville à l'autre, mais présente des intensités maximales entre avril et septembre et minimales entre décembre et janvier. Les similitudes entre les ICUN de certaines villes sont soulignées en relation avec les zones climatiques auxquelles elles appartiennent.

Les villes méditerranéennes présentent les ICUN les plus fortes peu importe la saison, mais avec une variabilité saisonnière se traduisant par des intensités maximales d'ICUN en JJA ($+3.0$, $+2.6$, $+1.8^{\circ}\text{C}$ pour

Montpellier, Nice et Nîmes respectivement) et minimales en DJF (autour de +1 et +2°C). Les villes océaniques (Lille, Nantes et Rennes) présentent des ICUN très comparables, avec à la fois de faibles intensités et une variabilité saisonnière. Les intensités sont autour de 0°C à Rennes et autour de +0.7°C pour Lille et Nantes sans jamais dépasser +1°C. Bordeaux, également classée en tant que ville océanique présente des ICUN sensiblement différents, principalement dues à des valeurs plus élevées entre août et octobre (jusqu'à +1.7°C en octobre). Les villes continentales de Dijon, Nancy et Strasbourg ont les ICUN les plus faibles, variant entre -0.5 et +0.5°C tout au long de l'année. Dans les deux villes semi-océaniques (Paris et Toulouse), les intensités et les variabilités saisonnières des ICUN sont comparables à celles des villes méditerranéennes.

La Figure 2 montre les moyennes mensuelles des ICUN simulés par CNRM-AROME sur la période d'étude.

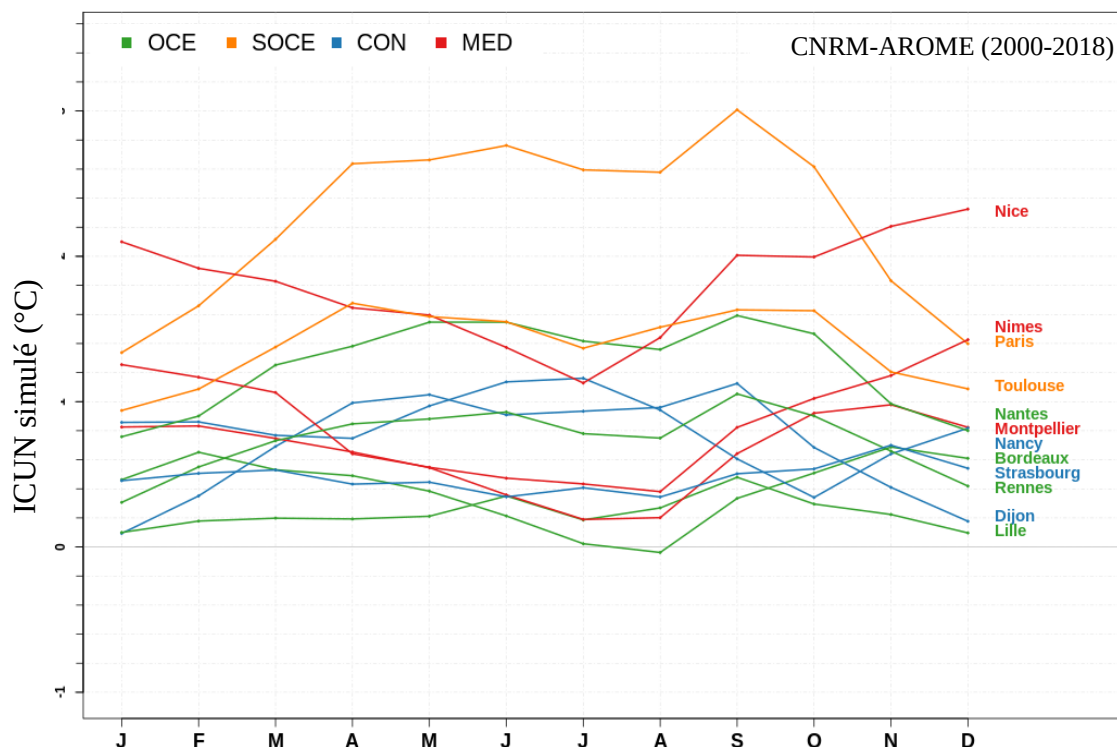


Figure 2. ICU nocturnes (en °C) sur la période 2000-2018 simulés par CNRM-AROME au point de grille correspondant aux stations de surface rurales et urbaines. Les couleurs définissent chaque zone climatique : vert pour OCEANIQUE, orange pour SEMI-OCEANIQUE, bleu pour CONTINENTAL et rouge pour MÉDITERRANÉEN.

CNRM-AROME simule des ICUN réalistes peu importe la saison pour les villes soumises au climat semi-océanique (Toulouse et Paris) avec des biais inférieurs à $\pm 0.5^\circ\text{C}$. À Dijon, Nancy et Strasbourg, le modèle surestime l'ICUN quelque soit la saison, même si la saisonnalité est justement reproduite. Ces résultats sont cohérents avec les éléments mis en avant dans l'évaluation générale. La surestimation des précipitations autour de ces villes peut engendrer un rafraîchissement trop important du milieu rural dans le modèle par l'évaporation des sols et la transpiration de la végétation. D'autre part, la surestimation du rayonnement solaire incident peut favoriser un réchauffement plus important en ville. À l'inverse pour les villes situées sur la côte méditerranéenne, CNRM-AROME sous-estime l'ICUN et présente en particulier un affaissement de son intensité en été. Cette région présente la particularité d'un déficit en précipitation en été combiné à une surestimation du rayonnement solaire incident. Ces éléments pourraient entraîner un assèchement important des sols autour des villes et ainsi expliquer l'affaiblissement de l'ICUN à cette période.

Conclusion

Les simulations du modèle CNRM-AROME réalisées à 2.5 km de résolution horizontale sur le Nord-Ouest de l'Europe pour la période de 2000 à 2018 ont permis de produire une analyse multi-villes originale du climat urbain en France métropolitaine. L'étude visait à évaluer la capacité du modèle à simuler les

particularités du climat urbain de plusieurs villes françaises dans des contextes climatiques et géographiques contrastés.

L'évaluation générale a porté sur la capacité de CNRM-AROME à simuler des conditions atmosphériques réalistes à proximité des villes, dont dépend l'ICUN. Les performances du modèle pour la simulation des précipitations sont variables géographiquement et saisonnièrement. Elles sont surestimées en DJF, en MAM et dans une moindre mesure en SON, sauf dans les villes méditerranéennes, et sous-estimées en JJA. Les analyses soulignent une surestimation systématique du rayonnement solaire incident, quelles que soient la saison et le contexte climatique. En réponse, CNRM-AROME tend à surestimer les températures minimales et à sous-estimer les températures maximales, bien que l'on constate des variations géographiques et saisonnières. Des biais positifs plus forts ont été trouvés en TN en JJA sur la côte Méditerranéenne, qui pourraient être expliqués à la fois par la surestimation du rayonnement entrant et la sous-estimation des précipitations.

La deuxième étape de l'évaluation s'est concentrée sur les aspects urbains, et particulièrement sur l'évaluation des ICUN simulés, d'un point de vue climatologique, par CNRM-AROME pour les 12 villes sélectionnées. Finalement, l'analyse a montré que le modèle simule des ICUN assez proches des observations, surtout à Paris et Toulouse. Les ICU nocturnes sont surestimés dans les villes continentales, sous-estimés sur le domaine océanique et également sur la côte Méditerranéenne. Le choix des stations utilisées pour l'analyse peut influencer les résultats obtenus et une méthode alternative est actuellement en cours d'évaluation. D'autre part, ces travaux seront prochainement étendus en mode scénario pour étudier l'évolution du climat urbain des villes françaises dans un contexte de changement climatique.

Bibliographie

- Besson F., Dubuisson B., Etchevers P., Gibelin A-L., Lassegues P., Schneider M. and Vincendon B., 2019 : Climate monitoring and heat and cold waves detection over France using a new spatialization of daily temperature extremes from 1947 to present. *Advances in Science and Research, Copernicus GmbH*, **16**, 149-156.
- Boone, A., Calvet J-C. and Noilhan J., 1999 : Inclusion of a third soil layer in a land surface scheme using the force-restore method, *Journal of Applied Meteorology*, vol. **38**, n o 11, doi : 10.1175/1520-0450(1999)038<1611, p. 1611-1630.
- Caillaud, C., Somot S., Alias A., Bernard-Bouissières I., Fumière Q., Laurantin O., Seity Y. and Ducrocq V., 2021 : Modelling mediterranean heavy precipitation events at climate scale, an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model , *Climate Dynamics*, vol. 56, no. **5-6**, doi :10.1007/s00382-020-05558-y, p. 1717-1752.
- Champeaux J. L., Masson V., and Chauvin F., 2005 : ECOCLIMAP, a global database of land surface parameters at 1 km resolution , *Meteorological Applications*, vol. 12, n o 1, doi : 10.1017/s1350482705001519, p. 29-32.
- Hengl T., Heuvelink G.B.M and Rossiter D.G., 2007 : About regression-kriging, from equations to case studies, *Comput. Geosci.*, 33, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.001>, p. 1301-1315.
- Masson V., 2000 : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 94, no. **3**, doi :10.1023/a :1002463829265, p. 357-397.
- Masson V., and coauthors, 2013 : The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes , *Geoscientific Model Development*, vol. 6, no. **4**, doi :10.5194/gmd-6-929-2013, p. 929-960.
- Oke T.R., 2017 : Urban climates. *Cambridge University Press*.
- Seity Y., Brousseau P., Malardel S., Hello G., Bénard P., Bouttier F., Lac C. and Masson V., 2011 : The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, vol. 139, no. **3**, doi :10.1175/2010mwr3425.1, p. 976-991.
- Shu C., Gaur A., Wang L., Bartko M., Laouadi A., Ji L. and Lacasse M., 2021 : Added value of convection permitting climate modelling in urban overheating assesments. *Building and Environment, Elsevier BV*, 207, 108415.
- Wild, M., A. Ohmura, C. Schär, G. Müller, D. Folini, M. Schwarz, M. Z. Hakuba et A. Sanchez- Lorenzo. 2017 : The global energy balance archive (GEBA) version 2017, a database for worldwide measured surface energy fluxes , *Earth System Science Data*, vol. 9, n o 2, doi : 10.5194/essd-9-601-2017, p. 601-613.