

Le prix AAM Patrick Brochet 2024 a été remis à Léa Corneille le 17 janvier 2024 par Jean-Louis Champeaux, président de l'AAM et Jean Pailleux*, alors président du jury de l'AAM. Cette cérémonie, qui avait pris place lors du déroulement de l'*Atelier de modélisation*, dans l'amphithéâtre de Météo-France de la Météopole à Toulouse, a fait l'objet d'un compte rendu dans le précédent *arc en ciel* (N° 202, page 28). Le lecteur trouvera ci-après le texte du mémoire primé de Léa Corneille.

* C'est maintenant Jean-François Mahfouf qui assure la présidence de ce jury de l'AAM.

Prix AAM Patrick Brochet 2024

Évaluation du modèle climatique AROME couplé au modèle urbain TEB sur la région parisienne : entre dynamiques urbaines et impacts climatiques

Léa Corneille

INPT-ENM et CNRM Toulouse

Résumé

L'Île-de-France a connu de multiples évolutions au cours des dernières décennies. Les villes se sont étalées et ces transformations du territoire ne sont pas représentées par le modèle de climat régional à haute résolution AROME. De plus, la région parisienne est fortement exposée aux aléas météorologiques, en particulier les fortes chaleurs.

Cette étude s'intéresse à la sensibilité du modèle AROME à l'occupation du sol et à la vulnérabilité des territoires aux aléas. La comparaison de deux simulations, l'une basée sur la carte d'occupation des sols par défaut datée de 1992 et l'autre actualisée avec des données de 2018, montre une accentuation d'un biais chaud en température avec les données de surface plus récentes. Les populations logées en hypercentre et dans l'agglomération de Paris sont les plus touchées par les fortes températures et leurs impacts.

Introduction

La région parisienne, avec ses 12 millions d'habitants et ses nombreuses zones urbaines, est particulièrement vulnérable aux aléas climatiques : les canicules vécues durant l'été 2022 en témoignent. Ces fortes chaleurs entraînent des conséquences sanitaires importantes, dont une augmentation du stress thermique, de la morbidité et de la mortalité (Hanna and Tait, 2015). Identifier les territoires les plus vulnérables constitue donc un enjeu majeur en termes d'adaptation au changement climatique et d'aménagement du territoire. Un des objectifs de ce travail est de mener un premier diagnostic des impacts liés aux températures élevées en Île-de-France afin de capter leur variabilité spatiale au sein de la région. L'année 2022, particulièrement chaude, constitue la période idéale pour cette analyse.

Il est nécessaire de disposer de données en température à une résolution assez fine. Cette étude s'appuie donc sur des simulations réalisées avec AROME, le modèle régional de climat à haute-résolution (2.5 km) développé au CNRM à partir de son homologue opérationnel destiné à la prévision numérique du temps. Cependant, la configuration de la dernière version du modèle reste perfectible, en particulier au niveau des aires urbaines. En effet, la description de l'occupation du sol est prescrite à partir de données datant de 1992, sous la forme d'une carte fixe : elle n'évolue pas au cours de la simulation climatique et n'a, jusqu'à présent, pas été réactualisée. Elle ne prend donc pas en compte l'expansion des villes, ni les dynamiques à venir. Ainsi, cette étude vise à mettre à jour la carte d'occupation du sol à l'aide de données plus récentes afin de tester la sensibilité du modèle aux modifications des caractéristiques de surface et de pouvoir mener les études d'impacts sur une simulation décrivant de manière plus cohérente le territoire.

La première section présente le contexte de l'étude et met en avant les particularités du milieu urbain. Dans la deuxième, les données du modèle et des observations sont décrites. La troisième section expose l'analyse sur la sensibilité d'AROME à des modifications d'occupation du sol. Enfin la quatrième section dresse une synthèse sur les indicateurs d'impact modélisés.

Contexte de l'étude

Spécificités des villes

Les milieux urbains concentrent plus de la moitié de la population à l'échelle mondiale (ONU, 2018) et des activités économiques. Ils constituent en cela des territoires très attractifs et sont contraints à s'étendre pour pouvoir accueillir toujours plus de personnes. Cela donne lieu à une artificialisation massive des terres situées en périphérie, ce qui bouleverse, d'une part, la biodiversité, mais aussi les conditions atmosphériques.

En effet, les villes se différencient des zones naturelles en premier lieu par une imperméabilisation des sols qui perturbe le cycle hydrologique en favorisant le ruissellement de l'eau. Artificialiser les terres implique l'utilisation de matériaux aux propriétés thermo-radiatives bien différentes de celles des milieux naturels, notamment la diffusivité thermique qui confère aux villes la capacité d'emmagasiner plus de chaleur que la végétation. La structure-même des bâtiments, de par leur tridimensionnalité, induit de forts changements d'écoulement de l'air (Richards et al., 2002) et provoque des inter-réflexions du rayonnement, ce qui affecte le bilan radiatif. Enfin, les milieux urbains concentrent des activités anthropiques soutenues qui émettent localement beaucoup de polluants, de chaleur et d'humidité.

Modélisation couplée AROME et TEB

Toutes ces caractéristiques nécessitent une représentation fine des villes dans les modèles de climat, rendue possible par le modèle de canopée urbaine TEB (Masson, 2000), développé au CNRM. Celui-ci fonctionne sur le principe de canyon urbain, introduit par Nunez and Oke (1977). Dans chaque maille du domaine, cette représentation simplifiée décrit les couverts urbains par un canyon moyen : deux bâtiments aux mêmes caractéristiques placés de part et d'autre d'une rue. Cela permet de considérer les principaux processus en jeu dans l'établissement d'un climat urbain.

Ce modèle urbain est couplé au modèle de climat AROME, c'est-à-dire que les interactions entre le climat au sein du canyon urbain et le climat régional (à l'échelle de la maille du modèle AROME) sont prises en compte, comme illustré par la Fig. 1.

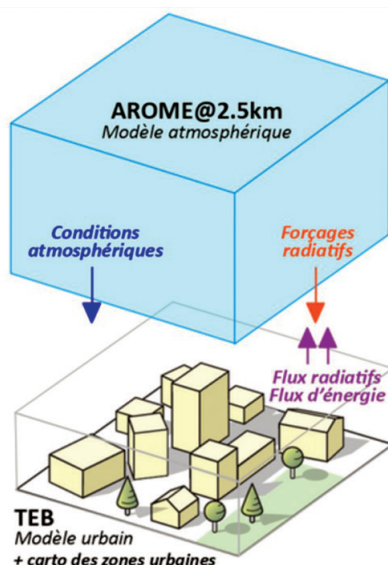


Figure 1: Illustration du couplage du modèle de climat régional AROME et le modèle urbain TEB

Données de surface prescrites à AROME

Concernant l'occupation du sol, le modèle de climat AROME se réfère à la base de données ECOCLIMAP I (Champeaux et al. 2005), à une résolution de 1 km, et qui est générée à partir de données satellitaires CORINE Land Cover datant de 1992. Plusieurs classes d'occupation du sol sont référencées dans ECOCLIMAP, dont 11 relatives au milieu urbain. Chacune d'entre elles correspond à des valeurs de paramètres de surface spécifiques qui sont prises en compte par les modèles de surface (TEB pour les villes). La carte ECOCLIMAP est projetée sur la grille de simulation AROME, dont la résolution est plus grossière (2.5 km) et ces paramètres de surface sont moyennés sur la maille AROME selon les classes qui l'occupent.

Données et configuration du modèle

Données issues du modèle

Le domaine géographique choisi pour effectuer les simulations du modèle couvre le nord de la France afin d'englober notre domaine d'étude : la région Île-de-France. Bien que notre période d'analyse ne s'étende que sur l'année 2022, il est nécessaire de lancer les simulations dès janvier 2020 afin que le modèle puisse s'équilibrer et ne pas fournir des données trop dépendantes des conditions initiales.

Données d'observation

Pour évaluer les performances du modèle AROME, nous avons utilisé les données de plusieurs stations d'Île-de-France. D'une part, les stations pérennes intégrées au réseau opérationnel de Météo-France fournissent des données au pas de temps de 6 min. Au nombre de cinquante, elles sont dispersées sur toute la région Île-de-France, aussi bien au sein des villes, que dans des champs ou des aéroports. On compte également 22 stations légères installées sur des lampadaires à partir du 15 juillet dans le cadre de la campagne de mesure PANAME 2022¹. Celles-ci sont réparties en plein cœur de Paris.

Sensibilité des simulations à l'occupation du sol

Méthode

Une nouvelle carte d'occupation du sol, basée sur des données de 2018, donc plus représentative des milieux urbains actuels, est produite en utilisant les données CORINE Land Cover les plus récentes.

Deux simulations ont été effectuées : l'une avec la carte de 1992 (celle utilisée par défaut dans AROME) et l'autre avec la nouvelle carte de 2018. Pour quantifier les modifications induites de ce changement d'occupation du sol, les simulations climatiques ont été comparées. Pour cela, chaque station d'observation disponible est associée au point de grille AROME le plus proche. Puis, une classification des stations selon trois types d'environnement a été établie : zone agricole, forêt ou urbain, sur la base de la proportion de chacune de ces classes dans la maille du modèle correspondant à la station. Les écarts moyens entre le modèle et les observations (biais) sont ensuite calculés pour chaque simulation, avant d'être intercomparés.

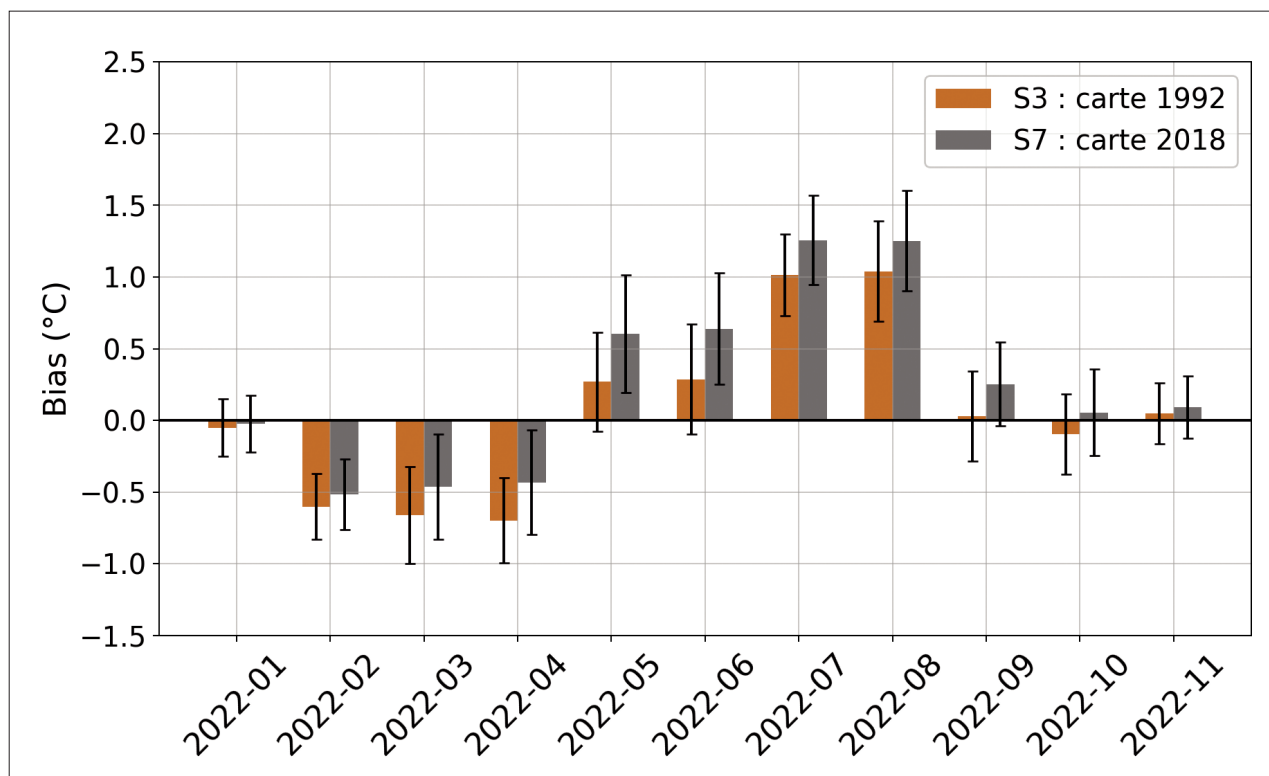


Figure 2: Biais en température entre la simulation S3 intégrant une carte d'occupation des sols de 1992 et la simulation S7 intégrant une carte de 2018.

<https://www.ipsl.fr/campagne/paname-2022/>

Comparaison des simulations

En s'intéressant d'abord à l'occupation des sols par les classes ECOCLIMAP urbaines, on peut noter que la fraction urbaine passe de 7 à 12% dans la région Île-de-France. La différence d'urbanisation est bien intégrée par le modèle AROME. On constate même une différence d'occupation du sol au niveau des mailles associées aux stations d'observation. Certaines, en périphérie, voient leur fraction urbanisée augmenter grandement (jusqu'à 60% de plus pour l'une d'entre elles).

La Fig. 2 montre les biais en température pour les stations en zone rurale, censées être les plus affectées par la nouvelle carte d'occupation du sol. On constate une augmentation du biais jusqu'à +0.3 °C en période estivale entre la simulation avec la carte de 2018 et celle avec la carte de 1992. Bien que la représentation des villes soit plus réaliste avec la carte de 2018, on peut voir que cela n'implique pas une réduction systématique du biais en température, mais a l'effet contraire, c'est-à-dire une accentuation du biais chaud estival d'AROME. Les mêmes tendances sont observées sur les autres types de stations (forêt et urbain). Cela s'explique par le fait que la fraction artificialisée est globalement plus forte sur les mailles des stations, ce qui favorise l'effet de surchauffe initié par les villes. On peut en conclure que le modèle AROME semble assez sensible à l'occupation du sol.

L'occupation des sols étant décrite de façon plus réaliste par la carte de 2018, elle peut être choisie pour l'étude des impacts, à condition de garder en tête que la dégradation des performances d'AROME est due à l'accentuation d'un biais chaud estival pré-existant dans ce modèle.

Diagnostic des impacts urbains

Méthode et choix des indicateurs d'impact

Pour étudier les impacts climatiques, deux niveaux d'analyse sont proposés. D'une part, les données des simulations sont projetées à l'échelle des IRIS (Ilôts Regroupés pour l'Information Statistique) qui forment un découpage à l'échelle infracommunale élaboré par l'INSEE pour l'acquisition de données sociodémographiques (notamment sur la population) ; l'Île-de-France en compte environ 5600. D'autre part, six zones territoriales sont définies, à l'échelle de la région, par l'agence d'urbanisme de Paris (Institut Paris Région), allant de l'hypercentre aux communes rurales (voir Fig. 3).

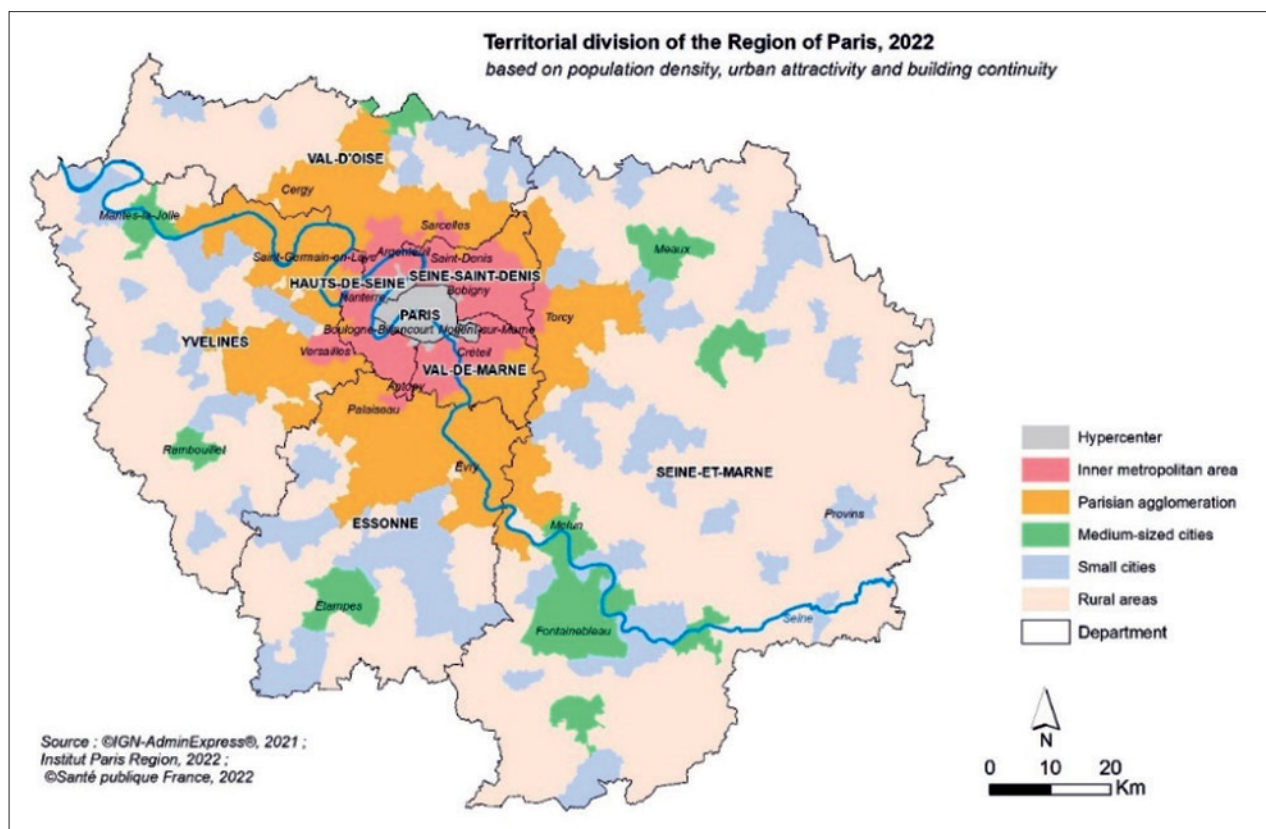


Figure 3 : Division territoriale de la région parisienne élaborée par l'Institut Paris Région à partir de la densité de population, l'attractivité urbaine et la continuité du bâti.

Plusieurs indicateurs d'impacts sont calculés durant la période estivale (juin - juillet - août), tous basés sur les températures quotidiennes minimale (TN) et maximale (TX), puisque l'humain y est particulièrement sensible. Ainsi, on peut s'intéresser aux nuits tropicales, qui correspondent aux jours durant lesquels la température minimale excède un seuil unique de 20 °C. Il y a également l'indice canicule, défini par Santé Publique France et Météo-France pour les alertes canicule. Cet indice est basé sur deux indices biométéorologiques, correspondant respectivement à la moyenne glissante des TN et TX sur 3 jours (de J à J+3). Deux seuils, l'un pour l'indice biométéorologique minimal et l'autre pour le maximal, sont définis pour chaque département d'Île-de-France. Lorsque ces deux seuils sont franchis simultanément le jour J, on considère qu'il y a un épisode de canicule sur toute l'étendue de la moyenne glissante, soit du jour J au jour J+3.

Exposition de la population

La Fig. 4 présente tout d'abord l'exposition directe de la population aux TN et TX en période estivale. Il ressort que l'hypercentre, correspondant à Paris intramuros, est la zone qui endure en moyenne les plus fortes TN et TX. En seconde position, la couronne d'agglomération, correspondant à la petite couronne de Paris, est exposée à des TN et TX presque 1 °C moins fortes en moyenne qu'en hypercentre, mais tout de même élevées par rapport au reste de la région. A elles deux, ces deux zones concentrent plus de la moitié de la population totale d'Île-de-France. Ensuite, on retrouve la couronne d'agglomération (i.e l'agglomération parisienne au-delà de la petite couronne) et les villes moyennes dont la différence est moins nette, surtout pour les TX moyennes. On note une distribution plus étendue que sur les autres zones, en raison des contrastes géographiques. Enfin, les territoires les moins touchés sont les petites villes et les communes rurales, avec une médiane de température entre 2 et 3 °C plus faible qu'en hypercentre.

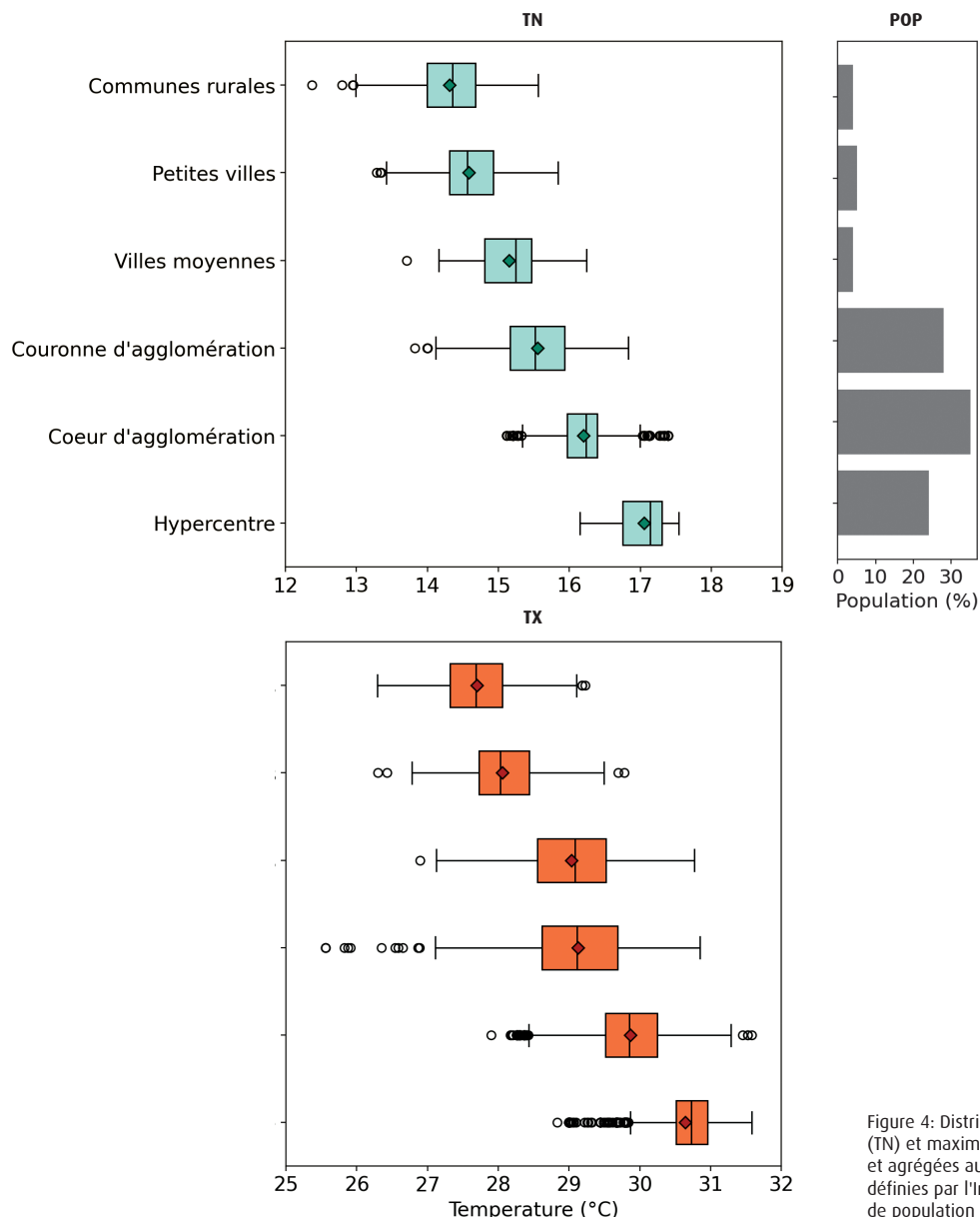


Figure 4: Distribution des températures minimales (TN) et maximales (TX) moyennées sur l'été 2022 et agrégées au niveau des zones territoriales définies par l'Institut Paris Région, avec la fraction de population associée.

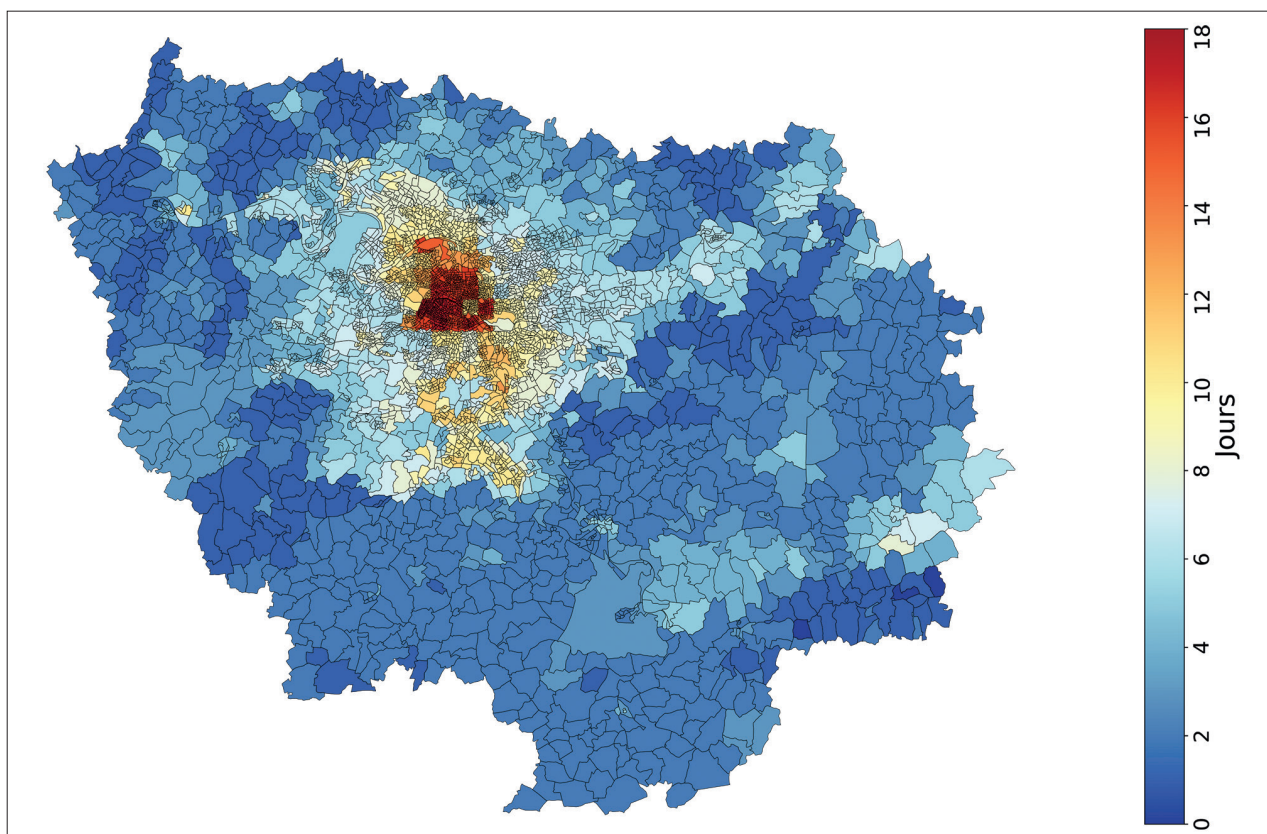


Figure 5 : Carte du nombre de nuits tropicales sur l'été 2022.

La Fig. 5 met en évidence une exposition aux nuits tropicales au niveau des IRIS avec une très grande disparité spatiale. Alors que l'équivalent de presque trois semaines de nuits tropicales est simulé en hypercentre de Paris sur la période estivale, certains IRIS ne comptabilisent que peu (voire pas) de nuits tropicales. L'agglomération parisienne pâtit elle aussi d'un nombre assez élevé de nuits tropicales (entre 4 et 14 jours).

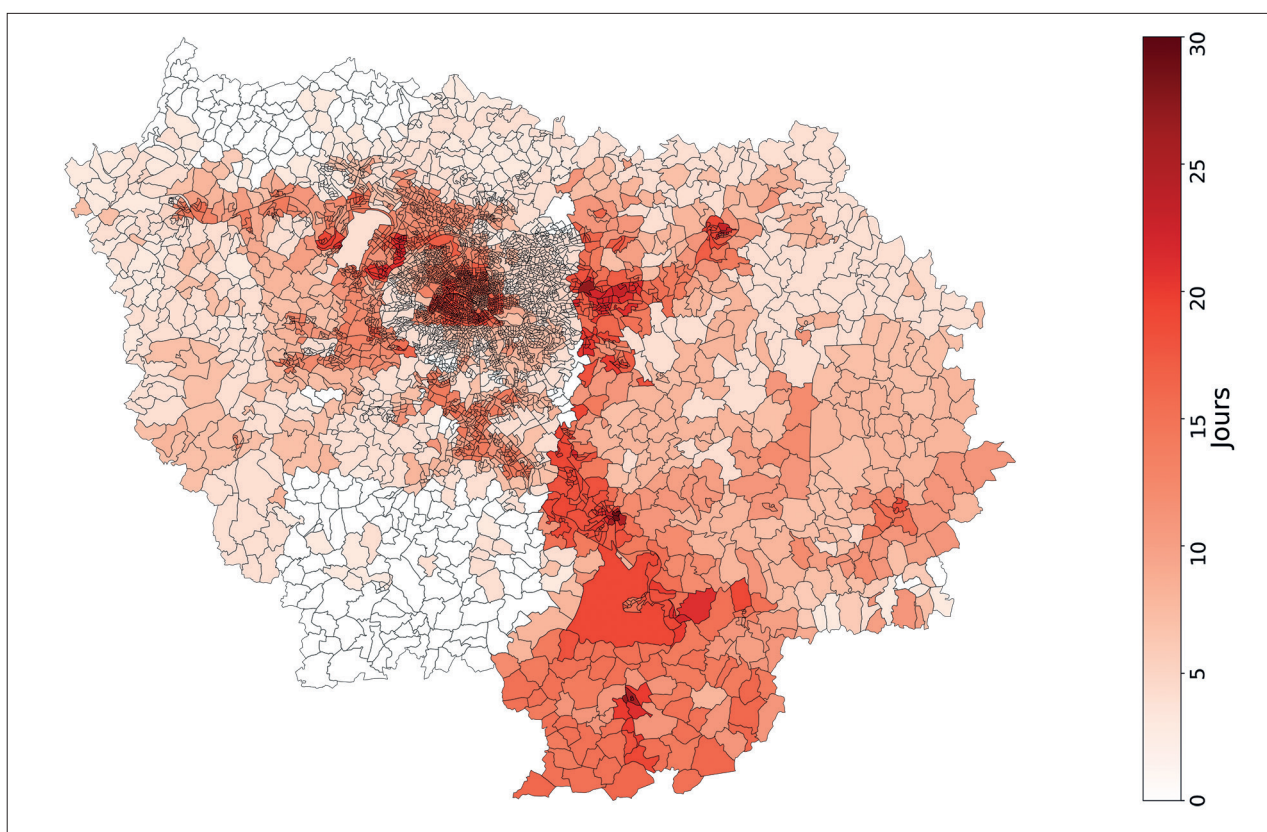


Figure 6: Carte du nombre de canicules sur l'été 2022.

L'indice canicule, présenté en Fig. 6 sur la période estivale, lui aussi agrégé au niveau des IRIS, est plus délicat à analyser. En raison des seuils biométéorologiques distincts pour chaque département, certains semblent plus affectés. C'est le cas de la Seine-et-Marne, à l'est de la région, département pour lequel le plus de jours de canicule sont détectés, allant jusqu'à l'équivalent d'un mois pour certains IRIS. Or, seulement six jours de dépassement de seuil ont été réellement observés durant l'été 2022, d'après un bulletin de synthèse présenté par Santé Publique France. La première partie du stage sur l'évaluation des performances AROME (non présentée ici) a mis en évidence des biais mensuels positifs assez forts en température durant l'été (surtout en journée en zone urbaine) déjà identifiés par Lemonsu et al. (2023). Cela permet également d'expliquer l'attribution d'un nombre fort de canicules sur certains IRIS. Il est tout de même intéressant de constater que l'hypercentre est aussi une zone fortement exposée, avec environ l'équivalent de trois semaines durant lesquelles l'indice canicule est atteint.

Conclusions

L'objectif de cette étude était de tester la sensibilité du modèle de climat régional AROME à une occupation du sol plus réaliste. La carte d'occupation du sol ECOCLIMAP a ainsi été mise à jour à partir de données CORINE Land Cover de 2018. Une méthode de comparaison des données de sortie du modèle aux observations des stations a été mise en place afin d'étudier les biais de la simulation utilisant la carte ECOCLIMAP par défaut (1992) et celle actualisée (2018).

Une augmentation des biais en température a été identifiée avec la carte actualisée due aux mailles AROME plus artificialisées en 2018. La simulation à l'occupation du sol actualisée a permis de mener une première analyse d'exposition de la population parisienne aux fortes chaleurs à une échelle assez fine (IRIS) et agrégée (zones territoriales de l'Institut Paris Région). De manière générale, l'hypercentre et la petite couronne sont les territoires les plus touchés par des températures minimales et maximales élevées. De nombreuses personnes sont alors affectées par un nombre conséquent de nuits tropicales et de canicules d'après le modèle.

La sensibilité du modèle à l'occupation du sol ayant été mise en évidence, les perspectives de ce travail sont des simulations en climat futur intégrant des scénarios prospectifs d'expansion urbaine. Dans ce même cadre, les études d'impact seront reprises, probablement aux mêmes échelles d'analyse, mais avec l'élaboration de nouveaux indicateurs que l'on s'efforcera de « décontaminer » des effets du biais chaud d'AROME et des artefacts aux frontières de départements dus à des choix différents de « seuils canicules ».

Références

- Champeaux, J., V. Masson, and F. Chauvin, 2005: Ecoclimap: a global database of land surface parameters at 1 km resolution. *Meteorological Applications*, 12, 29–32, doi:10.1017/ s1350482705001519.
- Hanna, E. and P. Tait, 2015: Limitations to thermoregulation and acclimatization challenge human adaptation to global warming. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 8034–74, doi:10.3390/ijerph120708034.
- Lemonsu, A., C. Caillaud, A. Alias, S. Riette, Y. Seity, B. Le Roy, Y. Michau, and P. Lucas-Picher, 2023: What added value of CNRM-AROME convection-permitting regional climate model compared to CNRM-ALADIN regional climate model for urban climate studies ? Evaluation over Paris area (France). *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-022-06647-w.
- Masson, V., 2000: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94, 357–397, doi:10.1023/a:1002463829265.
- Nunez, M. and T. Oke, 1977: The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology*, 16, 11–19, doi: 10.1175/1520-0450.
- ONU, 2018: World urbanization prospects. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf>
- Richards, P., G. Mallinson, D. McMillan, and Y. Li, 2002: Pedestrian level wind speeds in downtown Auckland. *Wind and Structures*, 5, 151–164, doi:10.12989/was.2002. 5.2_3_4.151.