

Article de synthèse publié dans le cadre de l'obtention du Prix de thèse  
Gérard Beltrando 2025

## Géoprospective et modélisation climatique de la végétation urbaine dans une perspective d'adaptation aux fortes chaleurs

Mélissa Poupelin<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup> TEAM, Cerema, Nancy, France

<sup>2</sup> Laboratoire ThéMA, Université Bourgogne Europe, UMR 6049, CNRS, Dijon, France

<sup>3</sup> Centre de recherches de climatologie, Laboratoire Biogéosciences, UMR 6282 CNRS, Université Bourgogne Europe, Dijon, France

Auteure de correspondance : [poupelinmelissa.pro@gmail.com](mailto:poupelinmelissa.pro@gmail.com)

**Mots-clés** : végétation urbaine, adaptation, géoprospective, modélisation climatique, îlot de chaleur urbain, stress thermique, public/privé.

### Résumé de la thèse

L'adaptation des villes aux fortes chaleurs est un enjeu majeur de l'aménagement du territoire. En raison de leur taille, morphologie et densité, les villes tendent à être des espaces plus chauds que les zones périurbaines qui les entourent (Rosenzweig *et al.*, 2018), créant un phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU ; Oke, 1982). Un des leviers d'action possibles consiste à végétaliser les villes via des îlots de fraîcheur ou des trames vertes. La question de l'emplacement, de la densité, du type de végétation et du potentiel de rafraîchissement qu'elle offre peuvent être des freins à sa mise en place car ces aménagements, souvent coûteux, nécessitent de repenser l'espace urbain et les pratiques d'aménagement. L'étude de l'impact de la végétalisation des villes à l'échelle métropolitaine sur la température de l'air et le confort thermique est identifié par la littérature comme un enjeu de recherche à la fois en modélisation du climat urbain et en aménagement du territoire (Bowler *et al.*, 2010 ; Knight *et al.*, 2021). Au croisement de plusieurs champs disciplinaires scientifiques (climatologie, aménagement du territoire, géomatique) et des questionnements opérationnels, la thèse se saisit des

outils et méthodes issues de ces disciplines pour formuler une méthodologie de co-construction et de modélisation de scénarios de végétalisation réalistes. Dans l'optique d'élaborer des outils d'aide à la décision, ce travail utilise Dijon Métropole comme cas d'étude et s'intègre dans un programme de recherche-action impliquant les agents métropolitains (RESPONSE H2020).

La première partie de la thèse présente la problématique, le positionnement méthodologique et le terrain d'étude à travers un exercice d'état de l'art. Jusqu'alors, les recherches portaient essentiellement sur la capacité de rafraîchissement de la végétation « haute », située dans l'espace public. Les parcs publics sont donc des objets particulièrement étudiés dans la littérature, en revanche, la végétation basse (buissons, pelouses) et la végétation privée sont moins souvent abordées alors qu'elles constituent des surfaces non négligeables des espaces urbains (Riboulot-Chetrit, 2015). De même, la co-construction et le transfert des connaissances en matière d'adaptation aux fortes chaleurs dans les pratiques d'aménagement du territoire constitue un vrai sujet pour les géographes et climatologues (Knight *et al.*, 2021). La thèse répond à cet état de l'art en proposant une

méthodologie permettant de co-construire des scénarios de végétalisation réalistes. La simulation de ces scénarios à l'aide d'un outil de modélisation climatique permet dans un second temps d'étudier l'impact de l'ajout de différents types de végétation (basse ou haute) à l'échelle métropolitaine en fonction des types d'espaces urbains (privé ou public). L'arc méthodologique ainsi constitué s'articule en trois étapes : 1) la validation d'une simulation de référence ; 2) la création de scénarios de végétation ; 3) la simulation climatique adossée. La première étape étudie la sensibilité et la justesse du modèle climatique à la végétation urbaine et permet d'obtenir une simulation de « référence » qui servira de témoin dans la suite du processus expérimental. La seconde étape démontre que les outils de géomatiques combinés au cadre géoprospectif permettent de traduire un processus de recherche-action en scénarios réalistes à échelle locale. La troisième étape vient vérifier que des scénarios réalistes à macro-échelle permettent effectivement d'étudier le potentiel d'adaptation offert par la végétation urbaine.

**La seconde partie de la thèse** décrit les données et méthodes utilisées pour obtenir la simulation de référence proche des observations qui servira de témoin aux résultats de modélisation des scénarios. Pour simuler l'impact des scénarios à l'échelle métropolitaine, il est nécessaire de disposer d'un outil de modélisation climatique adapté en termes d'échelles, de résolution et de paramètres de sortie. Le modèle de simulation atmosphérique Mésoscale-NH (Lac *et al.*, 2018) développé par le LAERO et le CNRM, couplé à la plateforme de modélisation des surfaces continentales SURFEX (Masson *et al.*, 2013) est idéal, car il intègre la modélisation des strates hautes et basses de végétation urbaine dans son modèle de canopée urbaine TEB (Masson *et al.*, 2002 ; Lemonsu *et al.*, 2012). Il est possible de l'utiliser pour simuler des métropoles selon une résolution de 150 mètres et de lui fournir des bases de données d'occupation du sol produites dans un SIG, ce qui permet d'obtenir des résultats de modélisation à l'échelle du quartier, tout en intégrant des scénarios à échelle locale (Bernard *et al.*, 2022).

La constitution d'une simulation de référence réaliste nécessite de décrire fidèlement l'occupation

du sol. Pour cela, il faut des bases de données d'occupation du sol précises et réalistes. La BD TOPO de l'IGN fournit des données précises sur l'emplacement, la taille et la forme des bâtiments et des surfaces hydrographiques. En revanche, l'étude de la description de la végétation par les bases de données libres d'accès confirme un constat général émanant de la littérature, comme quoi celles-ci ne suffisent pas à décrire la végétation urbaine à l'échelle locale (Foissard, 2015 ; Knight *et al.*, 2021). Végétation basse et végétation privée en sont absentes, les arbres de rue ne sont pas renseignés s'ils sont isolés. Dès lors, une réflexion sur le lien entre disponibilité des données et objets de la recherche est émise, concluant qu'il est nécessaire de produire une base de données de végétation urbaine à fine échelle. A l'issue de ce travail, une étude de sensibilité du modèle à une meilleure description de la végétation urbaine est menée (Poupelin *et al.*, 2022).

Une base de données de végétation urbaine à fine résolution est ainsi élaborée à partir d'images satellites très haute résolution traitées avec un indice de télédétection de la végétation (MSAVI), et de données radars (Poupelin *et al.*, 2022 ; Diallo-Dudek *et al.*, 2023), ce qui permet de renseigner 3,55 fois plus d'espaces végétalisés qu'avec l'utilisation de la BD TOPO (IGN) seule. La validation d'une simulation de référence consiste à vérifier si les résultats sont proches des températures de l'air mesurées sur le territoire. Depuis 2014, Dijon Métropole est dotée d'un réseau d'observation de température de l'air (MUSTARDijon) installé par les chercheurs en climatologie locaux conjointement avec la métropole (Richard *et al.*, 2020 ; Jegou *et al.*, 2024) qui couvre toute l'agglomération avec 92 stations installées en 2020. La densité de ce réseau permet d'avoir des observations au pas de temps horaire selon une grande variété de types d'espaces de la ville. La validation passe par une étude de sensibilité qui confirme l'importance d'utiliser des bases de données qui décrivent finement la végétation dans les simulations du climat urbain. En effet, sur la période de canicule simulée (du 6 au 13 août 2020), les résultats montrent que l'utilisation de la base de données de végétation permet de réduire le biais moyen journalier aux observations de 1,65°C à 0,84°C. Ces travaux rejoignent également

la littérature scientifique quant à l'intérêt de la végétation basse pour rafraîchir la température de l'air nocturne et celui de la végétation haute pour améliorer le confort thermique diurne (Dimoudi et Nikolopoulou, 2003 ; Bowler *et al.*, 2010; Knight *et al.*, 2021). Les tests réalisés avec des versions précédentes de TEB ne donnaient pas ces résultats, cela permet donc de valider son utilisation pour la simulation de scénarios de végétalisation à fine échelle. Les méthodes et données nécessaires à l'obtention de cette référence tendent à être accessibles sur tous les territoires, ce qui en fait une méthode généralisable, à condition de disposer de données d'observation sur la période étudiée.

**La troisième partie de la thèse** articule la co-construction et l'analyse des simulations des scénarios. Les questions d'adaptation aux fortes chaleurs sont au cœur des relations entre chercheurs et aménageurs du territoire dijonnais depuis les années 2010 (Richard *et al.*, 2022 ; Jegou *et al.*, 2024). Le processus de co-construction de scénarios de végétation urbaine s'inscrit dans un projet de recherche-action mené sur le territoire dijonnais de 2020 à 2024 (H2020 RESPONSE) qui offre un cadre idéal pour co-construire des scénarios. Pour co-construire et modéliser des scénarios d'aménagement du territoire, le cadre théorique proposé est celui de la géoprospective (Houet, 2023). Il permet en effet d'encadrer une démarche de co-construction de scénarios géoprospectifs en proposant deux démarches, l'une normative, l'autre exploratoire.

- **Le scénario normatif ou « scénario Objectif Degré »** tend à atteindre un futur souhaité :

*Une ville couverte pour moitié de végétation permet-elle de réduire la température de l'air d'au moins 1°C ?*

Il a été défini avec les agents métropolitains qu'il tendrait à couvrir la moitié de la ville de végétation basse et le quart de la ville de végétation haute pour vérifier si cela suffit à diminuer en moyenne de 1°C la température de l'air. Une attention est également portée à l'impact sur le stress thermique. Ces objectifs de végétalisation ont été définis conformément aux résultats de modélisation obtenus dans le cadre de la validation de la simulation de référence qui ont montré l'impact de rafraîchissement nocturne de la végétation basse (conformément à la littérature scientifique).

- **Le scénario exploratoire ou « scénario Vert »** (Poupelin *et al.*, 2025a) tend à interroger le résultat produit par une expérience, à savoir :

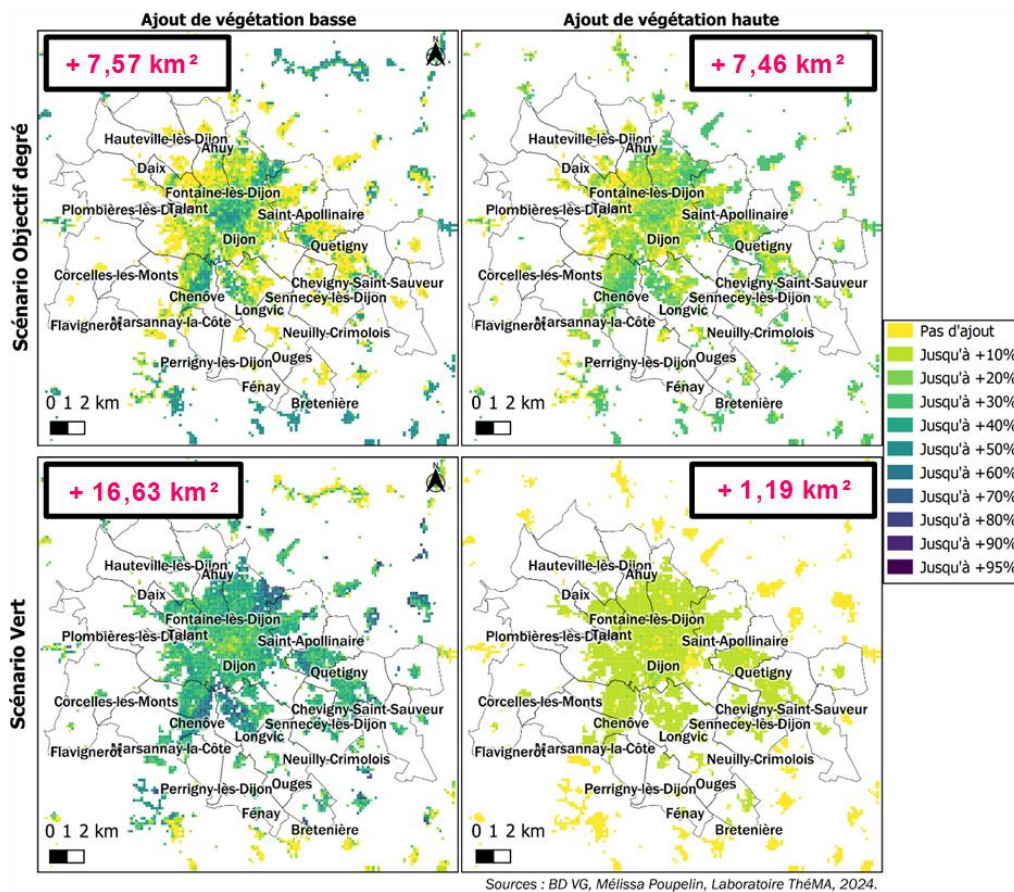
*Quel rafraîchissement est procuré par la végétalisation maximale de la ville ?*

Par végétalisation « maximale », on entend tous les espaces qui peuvent être végétalisés en respectant les documents de planification locaux (PLUi-HD de Dijon Métropole) et les circulations de voiture et de piétons. Avec le logiciel Qgis, les surfaces potentiellement végétalisables (herbe) sont identifiées sur les voiries, trottoirs et emplacements de parking publics. Un passage minimum pour les voitures et les piétons est conservé. Les zones d'activité industrielles et commerciales sont également concernées. Au-dessus de l'herbe, des arbres sont répartis automatiquement lorsque la largeur de la voirie est suffisante, à raison d'un arbre tous les 15 mètres. Dans les jardins privés, le règlement du PLUi-HD de Dijon Métropole (2019) concernant les quotas de surfaces éco-construites et de pleine terre est appliqué à la lettre (actuellement non obligatoire sauf si travaux effectués sur une parcelle). Un script Python pour Qgis est développé et mis à disposition pour réitérer l'expérience sur d'autres territoires (Poupelin *et al.*, 2025b). Le jeu de données produit est également accessible sur DataUBFC (Poupelin *et al.*, 2024).

Les scénarios ainsi créés diffèrent en termes de densité et de types de végétation ajoutés (haute, basse) dans les différents espaces de la métropole : centre-ville, faubourgs, zones d'activités commerciales et industrielles (Figure 1). À l'échelle de Dijon Métropole, le scénario *Objectif Degré* ajoute respectivement 7,57 km<sup>2</sup> et 7,46 km<sup>2</sup> de végétation basse et haute. Le scénario *Vert* ajoute de la végétation de façon moins homogène, avec 16,63 km<sup>2</sup> de végétation basse et « seulement » 1,19 km<sup>2</sup> de végétation haute. La différence entre les deux scénarios s'explique par le fait que les possibilités d'ajout de végétation haute dans l'espace public sont restreintes, et que l'ajout de végétation haute dans les jardins privés n'est pas poussé au maximum dans ce scénario. Ces résultats ouvrent donc d'autres perspectives de recherche et la possibilité de formuler des scénarios alternatifs pour étudier l'impact de la végétation haute. Le scénario *Vert* augmente la végétation basse de Dijon de

80 %, ce qui fait que certains quartiers sont végétalisés jusqu'à 90 % (au nord-est et au sud, voir Figure 1, scénario Vert, bas). Dans le cadre de la démarche de co-construction, ce scénario a été

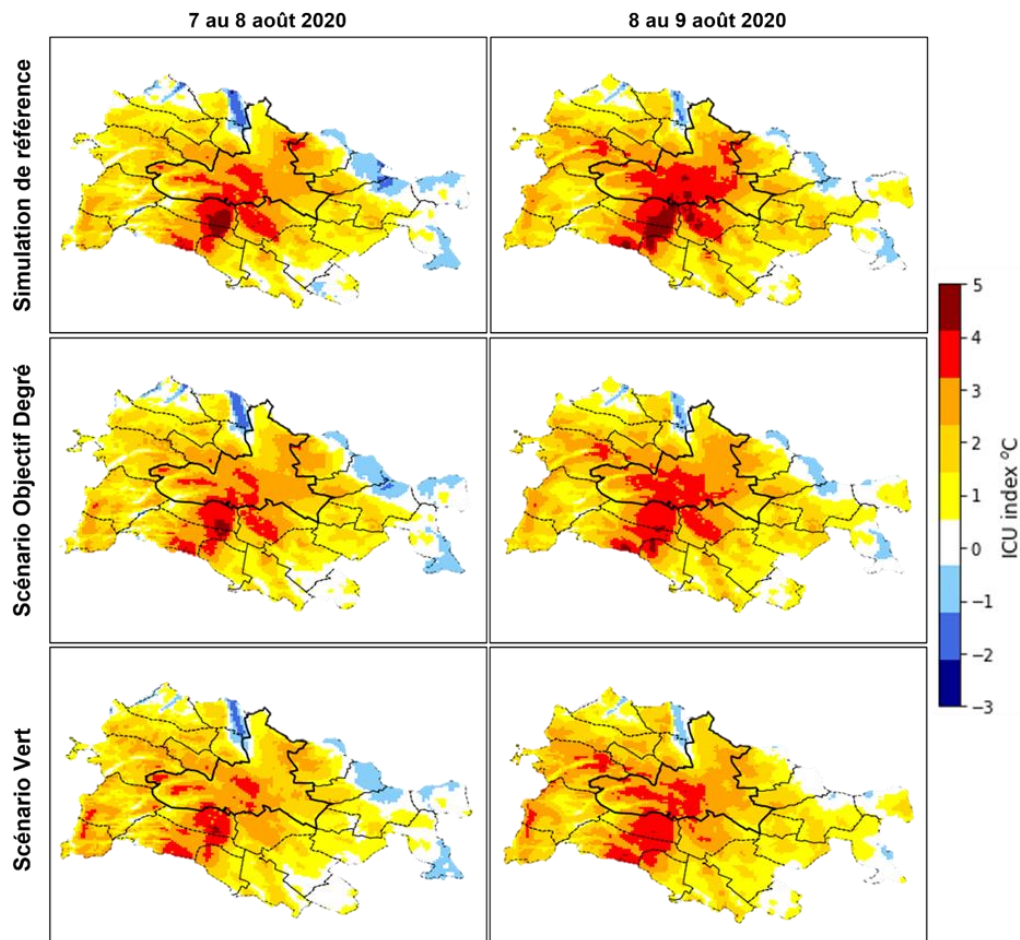
particulièrement discuté et observé car il ouvre des perspectives d'aménagement de surfaces désimperméabilisées, un enjeu très actuel en marge de l'objectif Zéro Artificialisation Nette (ZAN).



**Figure 1.** Ajouts de végétation dans les scénarios à l'échelle de la grille de simulation TEB, en pourcentage de maille (mailles non urbanisées en blanc). *Vegetation additions in the scenarios at the TEB simulation grid scale, expressed as a percentage of the grid cell (non-urban grid cells shown in white).*

Une fois construits, les scénarios sont modélisés avec Méso-NH couplé à TEB/SURFEX selon les mêmes conditions que la simulation de référence décrite ci-dessus. La comparaison de ces résultats à la simulation de référence montre que le scénario *Vert* rafraîchit la température de l'air jusqu'à  $-1^{\circ}\text{C}$  en moyenne sur tout le territoire et la période de simulation, tandis que le scénario *Objectif Degré* a peu d'impact sur la température de l'air mais se caractérise en revanche par une diminution de l'UTCI jusqu'à  $-2,5^{\circ}\text{C}$  en journée. Ces résultats sont cohérents, ils soulignent l'impact de la végétation haute le jour (grâce à l'ombre procurée) et de la végétation basse la nuit (grâce à la désimperméabilisation). La méthodologie a pour intérêt de permettre d'étudier l'impact de la végétation haute et basse sur les températures de la

métropole à l'échelle hectométrique (150 m). Elle montre donc que le scénario *Vert*, bien qu'il végétalise peu le centre-ville, permet d'y réduire l'ICU de façon plus conséquente que dans le scénario *Objectif Degré*, qui végétalise bien plus le centre-ville (Figure 2). Ces résultats montrent que la végétalisation des quartiers périphériques aux centres-villes, dans l'espace public comme privé, peut être stratégique pour réduire l'ICU des quartiers adjacents tels que l'hyper-centre, plus difficilement végétalisable. Ces espaces centraux gagnent à être végétalisés, notamment pour améliorer les conditions de confort thermique en journée. La méthodologie développée pose ainsi les bases d'une approche géoprospective d'aide à la décision généralisable à d'autres territoires.



**Figure 2.** Carte des îlots de chaleur urbains simulés avec TEB/SURFEX sur le territoire de Dijon Métropole. Les ICU sont calculés par rapport à une référence rurale fixe située à l'est de la métropole selon la formule  $(T^{\circ}\text{C ville}) - (T^{\circ}\text{C référence rurale})$ . Map of urban heat islands simulated with TEB/SURFEX in the Dijon Métropole area. UHI are calculated in relation to a fixed rural reference located to the east of the metropolitan area using the formula  $(\text{city temperature}) - (\text{rural reference temperature})$ .

## Références

- Bernard É., Munck C. de, Lemonsu A., 2022. Detailed mapping and modeling of urban vegetation: What are the benefits for microclimatic simulations with Town Energy Balance (TEB) at neighborhood scale? *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 61, 1159-1178. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-21-0134.1>
- Bowler D. E., Buyung-Ali L., Knight T. M., Pullin A. S., 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97, 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Diallo-Dudek J., Vairet T., Richard Y., Thevenin T., Martiny N., Pergaud J., Roy D., Bernard J., Bocher E., Rega M., Poupelin M., Dubois P., Cléau-André H., 2023. Cartographier la végétation et les Local Climate Zone dans six agglomérations de Bourgogne-Franche-Comté - Article de synthèse publié à l'issue d'une présentation orale lors de la table ronde organisée le 12 mai 2022 à Dijon. *Climatologie*, 20, 2. <https://doi.org/10.1051/climat/202320002>
- Dimoudi A., Nikolopoulou M., 2003. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings, Special issue on urban research*, 35, 69-76. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00081-6)
- Foissard X., 2015. L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise (thèse de doctorat), Université Rennes 2.
- Houet T., 2023. Géoprospective. In: Conservation de la biodiversité et état de référence : la nostalgie de la nature à l'ère de l'Anthropocène, ISTE, 129-139.
- Jégou A., Martiny N., Richard Y. et Thévenin T., 2024. La métropole sous observation environnementale. Autrement. <https://www.autrement.com/la-metropole-sous-observation-environnementale/9782080438720>
- Knight T., Price S., Bowler D., Hookway A., King S., Konno K., Richter R. L., 2021. How effective is 'greening' of urban areas in reducing human exposure to ground-level ozone concentrations, UV exposure and the 'urban heat island effect'? An updated systematic review. *Environ. Evid.*, 10, 12. <https://doi.org/10.1186/s13750-021-00226-y>

- Lac C., Chaboureaud J.-P., Masson V., Pinty J.-P., Tulet P., Escobar J., Leriche M., Barthe C., Aouizerats B., Augros C., Aumond P., Auguste F., Bechtold P., Berthet S., Bielli S., Bosseur F., Caumont O., Cohard J.-M., Colin J., Couvreux F., Cuxart J., Delautier G., Dauhut T., Ducrocq V., Filippi J.-B., Gazen D., Geoffroy O., Gheusi F., Honnert R., Lafore J.-P., Lebeaupin Brossier C., Libois Q., Lunet T., Mari C., Maric T., Mascart P., Mogé M., Molinié G., Nuissier O., Pantillon F., Peyrillé P., Pergaud J., Perraud E., Pianezze J., Redelsperger J.-L., Ricard D., Richard E., Riette S., Rodier Q., Schoetter R., Seyfried L., Stein J., Suhre K., Taufour M., Thouron O., Turner S., Verrelle A., Vié B., Visentin F., Vionnet V., Wautelet P., 2018. Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geosci. Model Dev.*, 11, 1929-1969. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1929-2018>
- Lemonsu A., Masson V., Shashua-Bar L., Erell E., Pearlmutter D., 2012. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geosci. Model Dev.*, 5, 1377-1393. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1377-2012>
- Masson V., Grimmond C. S. B., Oke T.R., 2002. Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities. *Journal of Applied Meteorology*, 41, 16.
- Masson V., Le Moigne P., Martin E., Faroux S., Alias A., Alkama R., Belamari S., Barbu A., Boone A., Bouyssel F., Brousseau P., Brun E., Calvet J.-C., Carrer D., Decharme B., Delire C., Donier S., Essauouini K., Gibelin A.-L., Giordani H., Habets F., Jidane M., Kerdraon G., Kourzeneva E., Lafaysse M., Lafont S., Lebeaupin Brossier C., Lemonsu A., Mahfouf J.-F., Marguinaud P., Mokhtari M., Morin S., Pigeon G., Salgado R., Seity Y., Taillefer F., Tanguy G., Tulet P., Vincendon B., Vionnet V., Voldoire A., 2013. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, 6, 929-960. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-929-2013>
- Oke T. R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. Royal Met. Soc.*, 108, 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Poupelin M., Granjon L., Huteau G., Thevenin T., Pergaud J., Richard Y., Pohl B., 2025a. Co-designing geopropective private and public urban greening scenarios: a data-driven workflow for planning decisions and research. *Urban Forestry & Urban Greening*, 129021. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.129021>
- Poupelin M., Granjon L., Pergaud J., 2025b. Urban greening scenarios application. GitLab, <https://gitlab.in2p3.fr/JulienPergaud/urban-greening-scenarios-application>
- Poupelin M., Pergaud J., Granjon L., Richard Y., Thevenin T., 2024. Scénario de végétalisation - Dijon Métropole. <https://doi.org/10.25666/DATAUBFC-2025-07-04>
- Poupelin M., Pergaud J., Thevenin T., Richard Y., Créat J., Dudek J., Martiny N., 2022. Impacts d'une meilleure description de la végétation urbaine sur des simulations du climat urbain avec Surfex-TEB. 35<sup>ème</sup> colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Toulouse, France, 136-142.
- Riboulot-Chetrit M., 2015. Les jardins privés : de nouveaux espaces clés pour la gestion de la biodiversité dans les agglomérations? *Articulo - Journal of Urban Research*. <https://doi.org/10.4000/articulo.2696>
- Richard Y., Créat J., Diallo-Dudek J., Martiny N., Pergaud J., Pohl B., Poupelin M., Rega M., Joly D., Roy D., Thévenin T., Emery J., Granjon L., Besset S., Codet-Hache O., Dodet M.-F., Fau D., Volatier A., 2022. Comment et pour qui cartographier l'îlot de chaleur urbain (ICU) ? 35<sup>ème</sup> Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), <https://u-bourgogne.hal.science/hal-03853192>
- Richard Y., Martiny N., Jégou A., 2020. De Mustard à Qaémleó : la construction d'un observatoire environnemental participatif. In: Semaine DATA/SHS, MSH de Dijon, Dijon, France.
- Rosenzweig C., Solecki W., Romero-Lankao P., Mehrotra S., Dhakal S., Bowman T., Ibrahim S. A., 2018. Climate change and cities: Second assessment report of the urban climate change research network: Summary for city leaders, in: Rosenzweig C., Romero-Lankao P., Mehrotra S., Dhakal S., Ali Ibrahim S., Solecki W. D. (Éd.), Climate change and cities: Second assessment report of the urban climate change research network, Cambridge University Press, Cambridge, xvii-xlii. <https://doi.org/10.1017/9781316563878.007>

**Citation de l'article** : Poupelin M., 2025. Géopropective et modélisation climatique de la végétation urbaine dans une perspective d'adaptation aux fortes chaleurs. *Climatologie*, 23, 2.