

COMMENT ET POUR QUI CARTOGRAPHIER L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN (ICU) ?

Yves RICHARD¹, Julien CRÉTAT¹, Julita DUDEK¹, Nadège MARTINY¹, Julien PERGAUD¹, Benjamin POHL¹, Mélissa POUPELIN^{1,2}, Mario REGA¹, Daniel JOLY², Damien ROY², Thomas THÉVENIN^{2,4}, Justin EMERY³, Ludovic GRANJON⁴, Suzie BESSET⁵, Oanez CODET-HACHE⁵, Marie-Françoise DODET⁵, David FAU⁵, Anne VOLATIER⁵

¹ Centre de Recherches de Climatologie, UMR 6282 Biogéosciences, CNRS/Univ Bourgogne Franche-Comté

² UMR 6049 ThéMA, CNRS/Univ Bourgogne Franche-Comté

³ AVENUES EA 7284, Univ. de technologie de Compiègne

⁴ MSH de Dijon, UAR 3516 CNRS-UBFC uB

⁵ Dijon Métropole

Résumé : Le réseau MUSTARDijon offre la possibilité de procéder à une cartographie fine des températures horaires sur Dijon Métropole. La méthode proposée ici repose sur des régressions linéaires multiples mobilisant deux familles de prédicteurs : des descripteurs du relief et des descripteurs de l'occupation du sol. L'application porte sur la canicule de l'été 2020 (6-9 août). Deux configurations sont comparées. L'une, en mode recherche, laisse la possibilité aux descripteurs de varier dynamiquement en fonction de leur pertinence statistique, l'autre, en mode opérationnel, impose les 5 mêmes descripteurs en entrée. En termes de performance statistique ou de structure spatiale, l'impact de la méthode n'est pas négligeable.

Mots-Clés : Cartographie ; Géostatistique ; Îlot de Chaleur Urbain ; Dijon-Métropole.

Introduction

La cartographie de la température de l'air à haute résolution spatio-temporelle est essentielle dans les environnements urbains, en particulier pour identifier les zones fréquemment caractérisées par des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains (ICU et IFU). Ces cartes sont nécessaires aux politiques urbaines visant à améliorer le confort thermique (Buttstädt et al., 2011). Avec 67 stations de mesure de la température de l'air, le réseau Measuring Urban Systems Temperature of Air Round Dijon (MUSTARDijon ; Richard et al., 2018), offre la possibilité de procéder à une cartographie fine des températures horaires sur Dijon Métropole. Dans le cadre du projet européen RESPONSE, une méthode statistique d'interpolation de la température a été développée en partenariat entre universitaires et Dijon-Métropole. Les finalités sont 1/ de mieux comprendre le rôle respectif du relief et de l'occupation du sol sur le champ de température le long des cycles annuel et diurne, 2/ de développer une interface accessible à tous les acteurs et habitants du territoire permettant de visualiser à toute heure une carte de température en temps quasi-réel et 3/ d'accompagner l'action des décideurs pour atténuer l'ICU et favoriser des IFU.

1. Données et méthode

1.1. Données

Les températures horaires sont issues du réseau MUSTARDijon conçu pour capturer les conditions thermiques méso-échelle (Oke, 1984) sur les diverses communes, quartiers et catégories d'utilisation du sol de Dijon Métropole (Fig. 1). Les mesures de température sont effectuées toutes les heures à 3 m au-dessus du sol depuis le 6 juin 2014 (de Lapparent et al., 2015). Le réseau s'est progressivement densifié, passant de 50 stations en 2014 à 67 en 2022 (Fig. 1). L'application porte sur la canicule d'août 2020, les périodes caniculaires étant propices au développement d'ICU, d'IFU, et génératrices de risques sanitaires (Richard et al., 2021).

Quatre catégories de prédicteurs potentiels sont utilisées pour interpoler les températures horaires : des surfaces de tendance, la topographie, des descripteurs urbains et de végétation (Tableau 1 ; colonne de gauche). Les surfaces de tendance incluent les coordonnées géographiques et la distance au centre-ville. Cette dernière est connue pour affecter les températures en milieu urbain (Edmondson et al., 2016) et est calculée comme la distance euclidienne entre chaque station et le centre-ville (Place de la Libération représentée avec une croix arrière dans la Fig. 1). Le Modèle Numérique de Terrain (MNT), de résolution 50m, de l'Institut Géographique National (IGN) est utilisé pour extraire l'altitude du pixel de 50 m contenant chaque station (Tableau 1). Pour tenir compte des effets de la topographie locale sur les vents le long du cycle diurne, le MNT est également utilisé pour dériver l'ampleur des bosses et des vallées (Joly et al., 2012). Ces deux descripteurs sont moyennés pour les 7 pixels de 50 m les plus proches de chaque station afin de lisser les structures bruyantes (Tableau 1).

Les descripteurs urbains et de végétation sont dérivés d'un produit hybride associant la BD TOPO (IGN) et l'image satellite Pléiade du 29 mai 2021. Ces descripteurs ont été calculés dans une zone tampon de 300 m de rayon autour de chaque station (Tableau 1). Ils comprennent la fraction de surface couverte par les bâtiments et les surfaces artificielles (bâtiments + infrastructures de transport) et les trois catégories de végétation suivantes : les forêts et l'eau, les grandes cultures et la végétation basse. La fraction de surface totale couverte par les surfaces artificielles et les trois catégories de végétation est de 100 %. La relation spatiale entre la température et chaque catégorie urbaine et végétale reste quasi-constante quelle que soit la taille de la zone tampon (rayon de 150 m à 600 m, tous les 50 m). La relation est cependant plus faible pour les zones tampon de plus petite taille (50 m et 100 m), ce qui est cohérent avec le fait que les capteurs mesurent la température méso-échelle (Emery et al., 2021).

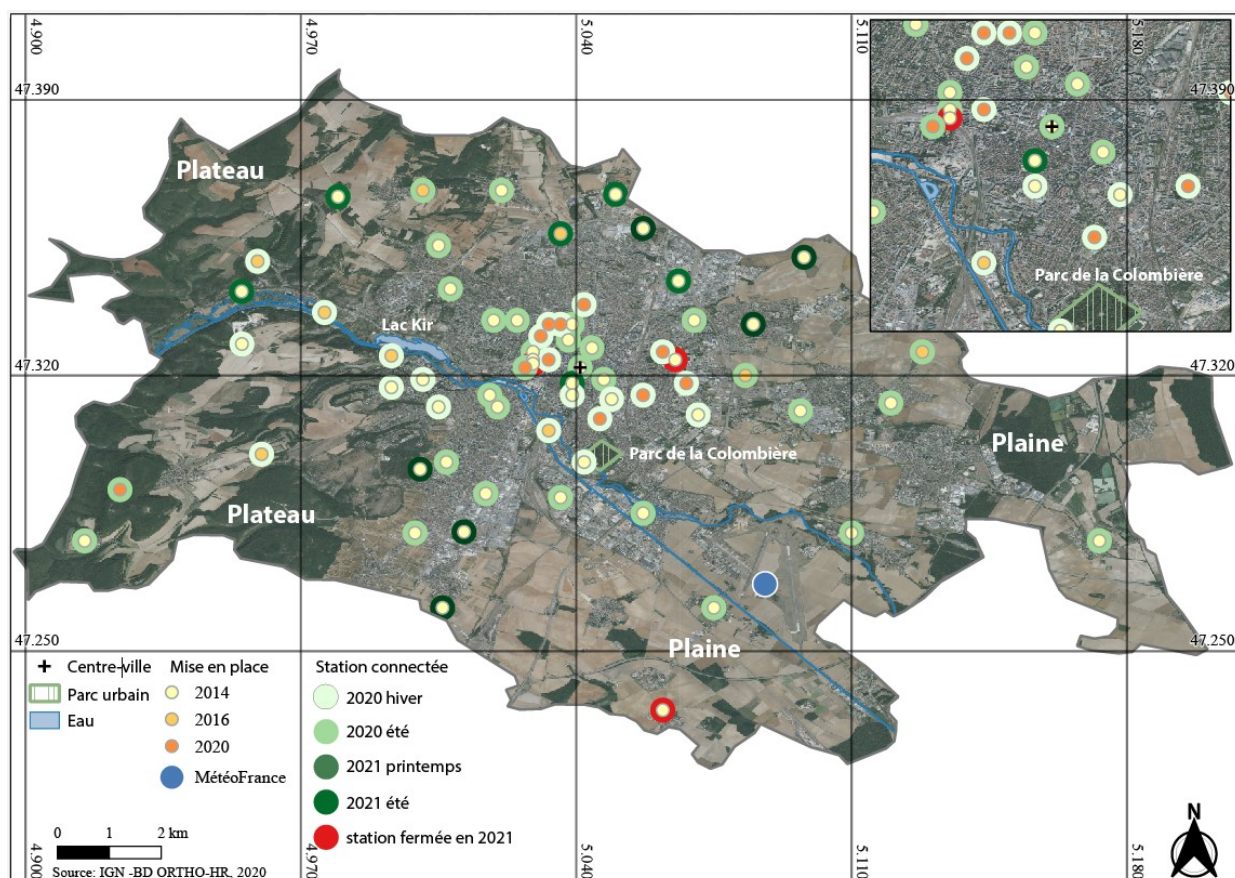


figure1. Localisation des stations du réseau MUSTARDijon (2014 à 2021). Cadre en haut à droite : zoom sur le centre-ville. Petit cercle de couleur chaude : date de déploiement. Grand cercle de couleur froide : passage de la récupération manuelle à la récupération automatique des données. Grand cercle rouge : station fermée. Grand cercle bleu : station de Météo-France utilisée pour identifier et caractériser la période de canicule.

1.2. Méthode

Par construction, plus la surface est minérale, moins il y a de végétation et inversement. De même, des colinéarités existent entre la topographie et l'occupation des sols du fait de l'intervention humaine. Un seuil de corrélation de $|0,6|$ a été choisi pour identifier les colinéarités les plus problématiques (Craney and Surlés, 2002). Des seuils proches, par exemple de $|0,6|$ donnent des résultats très proches (non montré). La longitude et les surfaces artificielles ont été exclues car ces deux descripteurs étaient significativement corrélés avec de nombreux autres. Deux modèles sont construits sur cette base, l'un dédié à la recherche (solution 1), l'autre à la vulgarisation scientifique (solution 2). Dans les deux cas, un modèle par heure est construit. Pour la solution 1, chaque modèle utilise 5 prédicteurs maximum parmi les 7 candidats suivants : latitude, altitude ou ampleur des bosses, ampleur des vallées, distance au centre-ville ou fraction de bâtiments, fraction d'eau + forêt, principales cultures et végétation basse. Pour la solution 2, chaque modèle utilise 5 prédicteurs imposés : altitude, distance au centre-ville, fraction d'eau + forêt, principales cultures et végétation basse. Ces 5 prédicteurs ont été retenus car étant les plus fréquemment sélectionnés en solution recherche.

Prédicteurs Potentiels		Construction du modèle sur le réseau MUSTARDijon	Application du modèle sur une grille de mailles 100m x 100m
Coordonnées géographiques	Longitude (°)	Station MUSTARDijon	Centre de chaque maille
	Latitude (°)		
Topographie	<i>Altitude (m)</i>	Pixel de 50m le plus proche	
	ou ampleur des bosses (m)	Moyenne des 7 pixels de 50m les plus proches	
	Ampleur des vallées (m)		
	<i>Distance au centre-ville (m)</i>	Station MUSTARDijon	Centre de chaque maille
Urbain	ou Bâti (%)	Zone tampon de 300m de rayon autour de chaque station MUSTARDijon	Maille
	Surface artificialisée (%)		
Végétation	<i>Forêt + Eau (%)</i>		
	<i>Grande culture (%)</i>		
	<i>Végétation basse (%)</i>		

Tableau 1. Prédicteurs potentiels utilisés comme variables indépendantes pour expliquer la distribution spatiale de la température horaire mesurée par le réseau MUSTARDijon et l'interpoler sur une grille de 100 m x 100 m. Les prédicteurs en gras sont proposés pour la solution recherche, ceux en italique sont imposés pour la solution opérationnelle.

2. Résultats

2.1. Des cartes pour qui ? Des cartes pour quoi ?

Dans une perspective de recherche, la solution 1 vise à analyser dans quelle mesure les prédicteurs mobilisés pour construire les régressions varient le long des cycles diurne et annuel. Sur les 57571 modèles construits pour la période 2014-2020, 36% sont alimentés par 5 prédicteurs, 29% par 4 prédicteurs, 22% par 3 prédicteurs, 11% par 2 prédicteurs et 2% par 1 prédicteur. La valeur modale des R^2 dépasse 0,9 avec 4-5 prédicteurs, tandis qu'elle tombe à 0,6 avec 2-3 prédicteurs et à 0,2 avec 1 prédicteur (Fig. 2). Ce protocole fait que deux modèles successifs sont indépendants l'un de l'autre. Ils peuvent être construits avec des prédicteurs de nature différente et dont le nombre varie de 1 à 5. Une des conséquences est que deux cartes successives peuvent présenter des structures spatiales très variables et sont ainsi susceptibles de perturber l'utilisateur. Dans une perspective de vulgarisation, le second protocole impose 5 prédicteurs fixes dans le temps ce afin de produire des informations théoriquement plus stables et homogènes. Le produit ainsi livré devrait être plus facile à appréhender pour un utilisateur lambda. La contrepartie est double, d'une part les performances sont dégradées (Fig. 2), d'autre part les déterminants ne peuvent être analysés avec autant de finesse.

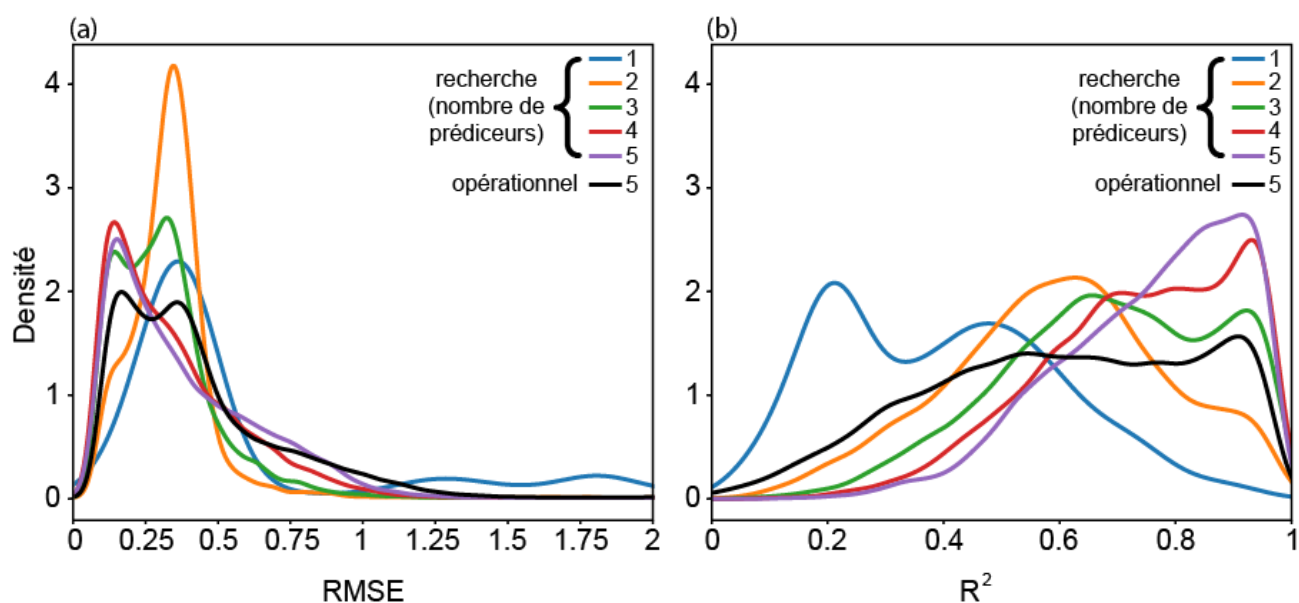


figure 2. Fonction de densité de probabilité de (a) l'intensité et (b) des erreurs spatiales des modèles alimentés par 1 à 5 prédicteurs en mode recherche et 5 prédicteurs en mode opérationnel (2014-2020). La root-mean-square error (RMSE) est une mesure de l'intensité des erreurs calculée en Leave One Out Cross Validation (LOOCV). Le coefficient de détermination ajusté (R^2 -Adj) est une mesure de la performance spatiale.

2.2. Interpolations en mode recherche / opérationnel : illustration

Les deux méthodes ont été appliquées du 6 juin 2014 au 31 décembre 2020. L'illustration porte sur un champ extrait de la canicule de l'été 2020, le 31 juillet à 23h (Fig. 3). En solution recherche, les prédicteurs sélectionnés sont, par ordre décroissant de variance expliquée dans le modèle : latitude, altitude, ampleur des vallées, fraction de l'espace en forêt et en eau et fraction de l'espace en grandes cultures (Fig. 3a et c). En solution opérationnelle, la distance au centre-ville et la fraction de l'espace en végétation basse remplacent la latitude et l'ampleur des vallées (Fig. 3. b et d). Entre la solution recherche (gauche) et la solution opérationnelle (droite), les structures spatiales sont comparables au 1er ordre avec des températures dépassant les 20°C (Fig. 3 b et d), à l'exception des plateaux à l'ouest (Fig. 1). Dans le détail, les différences induites par la solution ne sont toutefois pas négligeables. Le gradient thermique nord-sud de la solution recherche est remplacé par un gradient périphérie-centre dans la solution opérationnelle. Cela a peu d'impact sur la température en cœur d'agglomération, mais induit un écart pouvant atteindre 1°C en périphérie du domaine, zone non primordiale dans le cadre du projet RESPONSE.

Les performances sont sensiblement dégradées en solution opérationnelle. La RMSE passe de 0.68°C à 0.84°C et le R^2 chute de $0,62$ à $0,39$. Outre la dégradation de la performance, très variable d'une heure à l'autre (non montré), la solution *a priori* envisagée en mode opérationnel limite la compréhension de l'opérateur et de l'utilisateur quant au rôle des déterminants sur les températures le long des cycles annuel et diurne. Seule la solution recherche permet en effet d'analyser ce rôle en termes de fréquence d'apparition des déterminants (Fig. 4). L'altitude est le prédicteur qui est le plus souvent sélectionné, quasi indépendamment de la saison ou de l'heure. En revanche son signe (non montré) change fréquemment. Toutes heures confondues, les inversions de températures représentent 24% des cas, la nuit elles sont plus fréquentes, en particulier en été (non montré). Viennent ensuite la latitude, l'ampleur des vallées et la distance au centre-ville, tous les trois préférentiellement sélectionnés la nuit. L'ampleur des bosses et le bâti interviennent plutôt en journée. Enfin, la contribution de la végétation est le plus fréquemment nocturne et varie selon la saison : végétation basse en saison froide (automne et hiver), grandes cultures au printemps et en début d'été, forêt et eau en été. Ce dernier point est cohérent avec le fait que les grandes cultures (blé, orge, colza) sont moissonnées entre la fin juin et le début juillet. Lors des canicules, qui le plus fréquemment interviennent en juillet et août, ce sont les forêts et les surfaces en eau qui peuvent contribuer à rafraîchir les nuits. Selon les deux solutions, l'effet rafraîchissant du parc de la Colombière (33ha) et du lac Kir (37 ha ; Fig. 1) est visible.

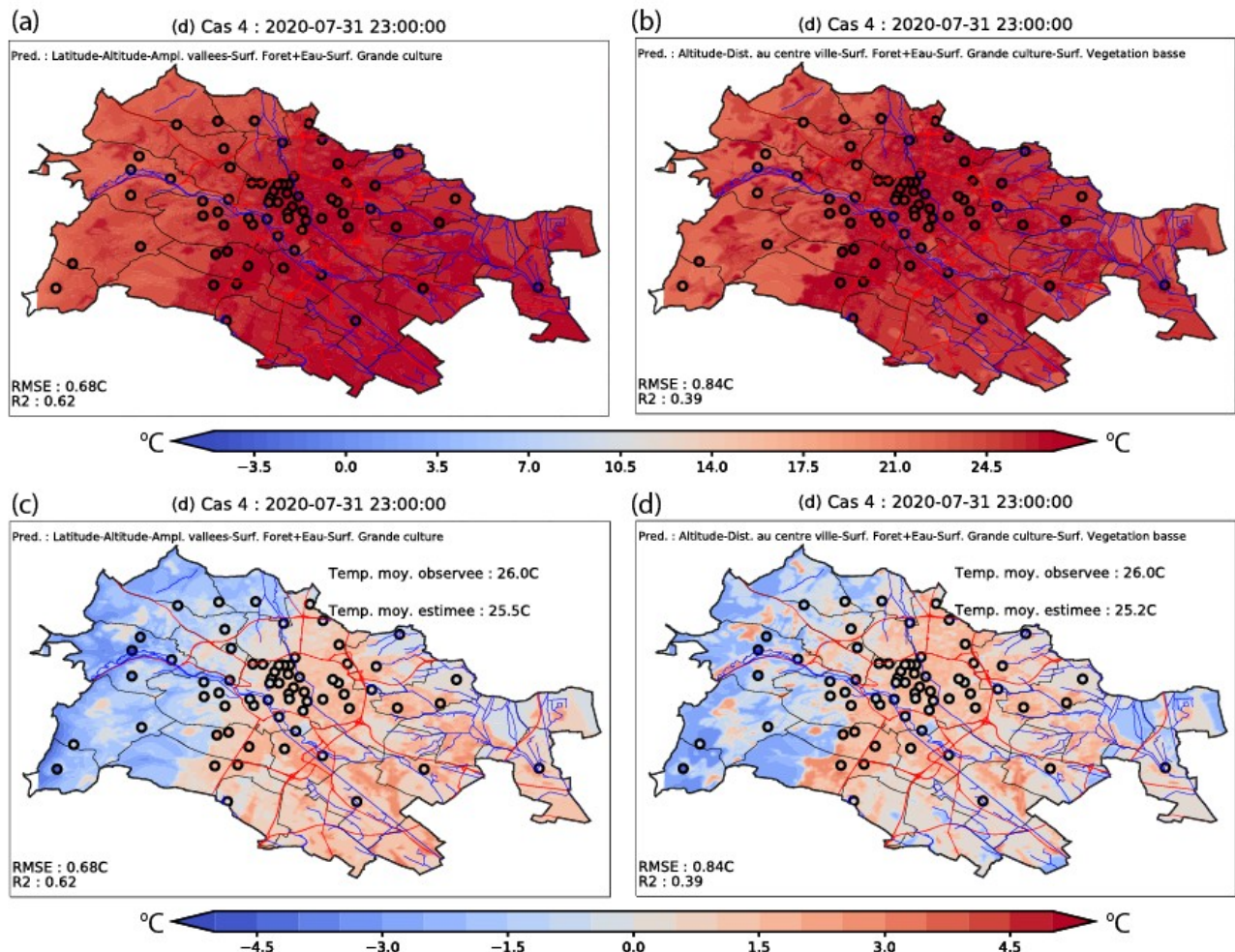


figure 3. Thermographie du 31 juillet 2020 à 23h obtenue par régression linéaire multiple. (a) et (c) Solution recherche. (b) et (d) Solution opérationnelle. (a) et (b) Température brute. (c) et (d) Écart à la moyenne spatiale de la température calculée sur Dijon Métropole.

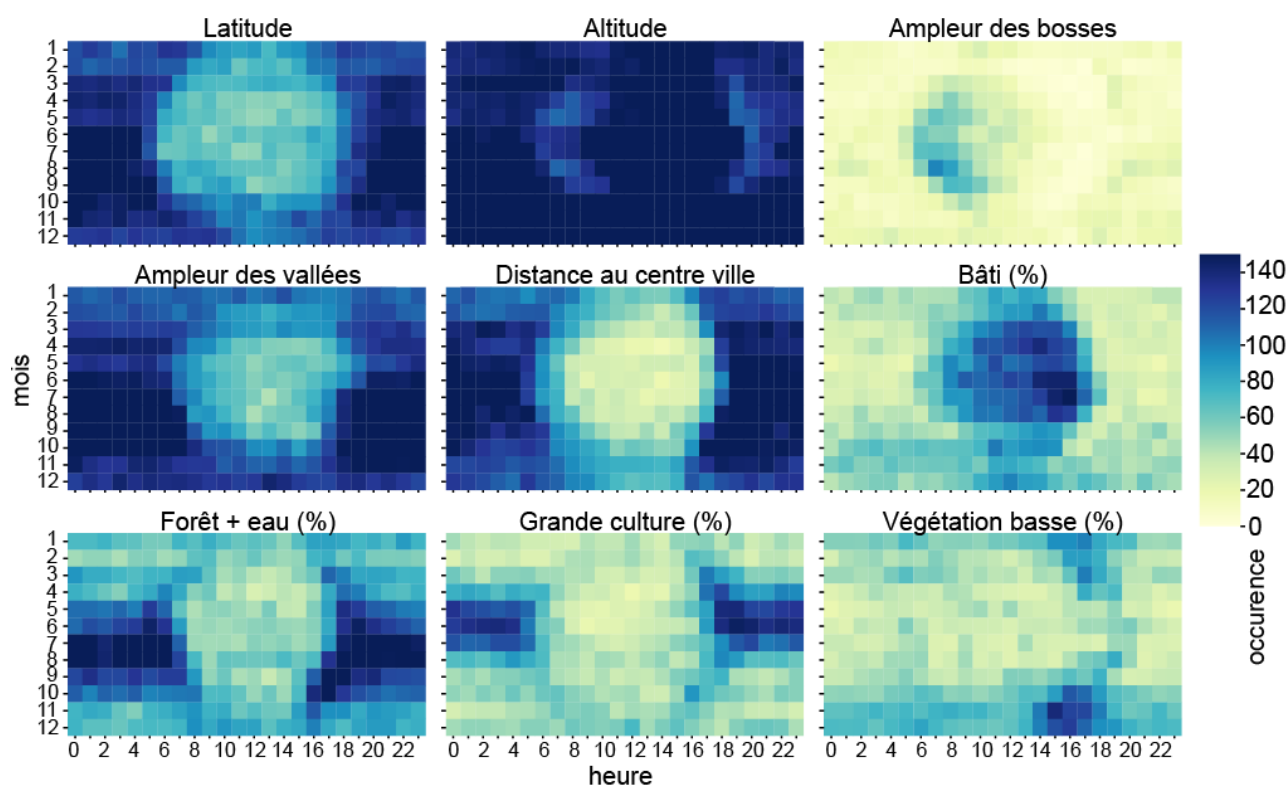


figure 4. Solution recherche : occurrence d'entrée des prédicteurs selon le mois et l'heure (2014-2020).

Conclusion

Produire des cartes de température de l'air à résolution hectométrique reste un défi, surtout en milieu urbain en contexte topographique contrasté. Fort d'un réseau de stations (MUSTARDijon) particulièrement dense, 67 stations sur un territoire de 240 km², cet exercice est développé sur le territoire de Dijon Métropole. Partenaires universitaires et acteurs de la collectivité développent des méthodes combinant exigence et performance, critères requis dans le domaine de la recherche, mais aussi accessibilité, critère requis pour une utilisation par tous, acteurs et citoyens. En mobilisant plusieurs bases de données et des outils statistiques, 57571 modèles horaires ont été construits sur la période 2014-2020. L'analyse de cet ensemble va permettre d'effectuer des choix en termes de méthode à mobiliser dans une perspective d'opérationnalité, à savoir construire en temps réel un modèle chaque heure. L'exemple mobilisé dans cet article, une soirée caniculaire de l'été 2020, est emblématique des enjeux en termes sanitaires, stress thermique lorsque canicule et ICU se combinent, ainsi qu'en termes de performance des modèles. L'idée initiale de privilégier la performance et la souplesse du modèle en mode recherche, mais plutôt la simplicité et la stabilité en mode opérationnel, est éprouvée sur cet exemple. Si les solutions produisent des thermographies proches l'une de l'autre, la dégradation observée en mode opérationnel n'en est pas pour autant négligeable.

Remerciements : Les auteurs remercient Météo-France pour la mise à disposition des données de la station de Dijon Longvic (convention avec l'université de Bourgogne), l'ADEME, la Région Bourgogne-Franche-Comté et Dijon Métropole pour leur soutien.

Bibliographie

- Buttstädt M., Sachsen T., Ketzler G., Merbitz H., Schneider C., 2011: A new approach for highly resolved air temperature measurements in urban areas. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, **4**, 1001-1019.
- Craney T.A., Surlis J.G., 2002: Model-Dependent Variance Inflation Factor Cutoff Values. *Quality Engineering*, **14**, 391-403.
- De Lapparent B., Roux J., Richard Y., Pohl B., Bientz S., Codet-Hache O., Dumaitre F., Toussaint H., Tissot A.-C., Thévenin D., et al., 2015 : Mesures de la température et spatialisation de l'îlot de Chaleur Urbain à Dijon. *Actes de l'Association Internationale de Climatologie*, **28**, 257-262.
- Edmondson J.L., Stott I., Davies Z.G., Gaston K.J., Leake J.R., 2016: Soil surface temperatures reveal moderation of the urban heat island effect by trees and shrubs. *Scientific Reports*, **6**, 33708.
- Emery J., Pohl B., Crétaf J., Richard Y., Pergaud J., Rega M., Zito S., Dudek J., Vairet T., Joly D., Thévenin T., 2021: How local climate zones influence urban air temperature: Measurements by bicycle in Dijon, France. *Urban Climate*, **40**, 101017.
- Joly D., Bois B., Zaksek K., 2012: Rank-Ordering of Topographic Variables Correlated with Temperature. *Atmospheric and Climate Sciences*, **02**, 139-147.
- Oke T.R., 1984: Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. *Energy and Buildings*, **7**, 1-10.
- Richard Y., Emery J., Dudek J., Pergaud J., Chateau-Smith C., Zito S., Rega M., Vairet T., Castel T., Thévenin T., 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**, 258-274.
- Richard Y., Pohl B., Rega M., Pergaud J., Thevenin T., Emery J., Dudek J., Vairet T., Zito S., Chateau-Smith C., 2021: Is Urban Heat Island intensity higher during hot spells and heat waves (Dijon, France, 2014–2019)? *Urban Climate*, **35**, 100747.