

## **Estimation des températures de l'air en milieu urbain par couplage données simulées / mesures locales / modèles physiques et apprentissage statistique**

Une des conséquences du réchauffement climatique est de provoquer des vagues de chaleur d'amplitude telle qu'elles ont un impact sur la santé des personnes. Ce phénomène, appelé îlot de chaleur urbain, correspond à un réchauffement plus important des centres villes par rapport à leur périphérie. Un tel comportement dépend très fortement de la morphologie urbaine (types de bâtiments, organisation spatiale, présence de la végétation, ...). Le rôle de l'aménagement de l'espace urbain est donc un point clé pour comprendre et limiter l'incidence de l'urbanisation sur le bien-être et la santé de la population. Dans ce contexte, il est nécessaire d'appréhender l'impact de cet aménagement sur la température de l'air et le confort des citadins au travers de l'analyse des interactions entre les paramètres physiques du microclimat et les transformations urbaines.

Les mesures de température de l'air réalisées de façon routinière dans les agglomérations sont des mesures ponctuelles, représentatives que très localement. Afin d'étudier la relation entre la morphologie urbaine et la température de l'air, il est nécessaire de spatialiser cette information. Depuis plusieurs années, différentes approches ont été proposées. Certaines études ont cherché à estimer des liens statistiques entre la typologie urbaine et les relevés de températures de l'air issus de capteurs locaux disséminés en des endroits variés de la ville (e.g. Foissard et al, 2013 ou Fan et al, 2017). Une fois les liens statistiques établis, les valeurs de températures de l'air mesurées ponctuellement peuvent être spatialisées. Bien qu'efficaces, de telles approches ne prennent pas en considération les lois physiques qui régissent ces phénomènes et fournissent parfois des résultats sans cohérence physique. Par ailleurs, les modèles de régression utilisés reposent souvent sur des hypothèses non compatibles (ex. linéaires) avec les phénomènes observés. D'autres études ont conduit au développement différentes approches de modélisation microclimatique, se différenciant par les phénomènes et échelles abordés. Parmi ces modèles, on citera le modèle Solweig (Lindberg et al, 2008) devenu UMEP (Lindberg et al, 2018) qui travaille à l'échelle de l'agglomération et estime les différentes composantes radiatives ainsi que la température de l'air en tout point de la scène. A l'échelle du quartier, SOLENE-microclimat, développé au laboratoire CEREMA depuis plusieurs années (Musy et al, 2015; Malys et al, 2016), modélise de façon explicite la géométrie de la surface urbaine à une résolution métrique. Il simule, à partir des propriétés physiques de la scène et des conditions météorologiques, le comportement thermo-radiatif d'un espace urbain et estime la température de l'air pour la zone traitée. Au cours du temps, les modèles microclimatiques urbains se sont perfectionnés afin de prendre en compte de plus en plus de types d'éléments urbains tels que la végétation, les bâtiments et les différents types de sols au travers de calculs physiques complexes. Les simulations peuvent donc être très coûteuses en ressources informatiques. De plus, les données nécessaires aux simulations (propriétés physiques des matériaux, forçage radiatifs...) ne sont pas toujours disponibles.

Dans cette thèse, nous proposons d'aborder le problème de quantification de l'impact des transformations urbaines en termes de température de l'air/indice de confort en couplant des observations issues de stations de mesures au sol avec des simulations issues de modèles physiques, tels que ceux mentionnés précédemment, pour dériver des relations « adaptées » aux sites observés. Ces relations, qui prendront en entrée des paramètres liés à la morphologie de la ville (végétation, densité de bâtiments, ...) et aux conditions atmosphériques, pourront ensuite être utilisées pour simuler l'impact d'un nouvel aménagement, d'une restructuration d'un quartier, ou tout autre modification du paysage urbain sur la température de l'air et les indices de confort. Pour construire ces relations, les outils méthodologiques sur lesquels nous nous

appuierons reposeront sur des réseaux de neurones profonds dans lesquels des contraintes physiques seront appliquées (Raissi, 2018). En effet, le phénomène des températures respecte des principes physiques qui sont à l'heure actuelle négligés dans les approches statistiques.

L'objectif de la thèse sera donc de mettre en place une approche simple permettant d'évaluer l'impact d'une transformation urbaine sur la température de l'air ou les indices de confort au travers de relations entre morphologie de la ville, conditions atmosphériques et température de surface/indice de confort. Plusieurs étapes sont ainsi envisagées :

- (1) Dans un premier temps, il s'agira de définir des configurations types pour réaliser les simulations numériques nécessaires à la construction d'une base d'apprentissage. Pour cela, nous partirons de la classification LCZ (Local Climate Zones) proposée par (Stewart & Oke, 2012), couramment utilisée en climatologie urbaine dans le cadre d'approches diagnostics. Les 17 LCZ (10 urbaines + 7 rurales) présentent une structure et un climat homogènes et sont caractérisées par des indicateurs décrivant la morphologie des rues et des bâtiments, la nature et l'occupation du sol, le niveau d'activité anthropique ainsi que les propriétés thermiques des surfaces et des matériaux. Au préalable, il sera nécessaire d'évaluer la représentativité de cette classification pour des villes européennes et l'adapter si besoin. Il est essentiel pour la suite de l'étude de vérifier que nos choix sont significatifs et suffisamment « différenciants » d'un point de vu confort. Pour cela, des simulations numériques ainsi que des tests de sensibilités seront réalisés grâce aux modèles physiques, tels que SOLENE-Microclimat ou UMEP, permettant de produire des températures d'air et les variables nécessaires au calcul des indices de confort. Les résultats obtenus pourront être évalués grâce aux données collectées lors de la campagne AI4GEO (Toulouse 2021).
- (2) Une fois la classification LCZ validée, ou adaptée, les différentes configurations seront utilisées pour établir un lien entre les paramètres morphologiques et la température de l'air/indices de confort à l'aide d'une méthode d'apprentissage. Les paramètres morphologiques nécessaires seront dérivés des indicateurs géomorphologiques de la littérature, dont ceux décrivant des classes LCZ, mais également d'images de télédétection et de données auxiliaires pour chaque configuration. Ensuite, les températures de l'air générées lors des simulations serviront de base d'apprentissage pour le réseau de neurones. Afin de limiter le nombre d'entrées et simplifier l'utilisation et l'opérationnalité de la méthode développée, une « ablation study » sera conduite afin de définir quelles entrées sont réellement nécessaires au réseau de neurones. Pour la validation, les résultats obtenus avec le réseau de neurones seront comparés avec celui simulé par SOLENE-Microclimat pour une même configuration.
- (3) Pour finir, si le réseau de neurone fournit des résultats satisfaisants, il sera appliqué pour quelques scénarios de prédiction.

## Références :

(Fan et al, 2017) Fan, C., Rey, S. J., & Myint, S. W. (2017). Spatially filtered ridge regression (SFRR): A regression framework to understanding impacts of land cover patterns on urban climate. *Transactions in GIS*, 21(5), 862-879.

(Foissard et al, 2013) Foissard, X., Quénol, H., & Dubreuil, V. (2013). Analyse et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'agglomération rennaise. *Actes du 26e colloque de l'AIC, Cotonou, Bénin*. 2013.

(Lindberg et al, 2008) Lindberg, F., Holmer, B., & Thorsson, S. (2008). SOLWEIG 1.0 -- Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*, 52(7), 697-713.

(Lindberg et al, 2018) Lindberg, F., Grimmond, C., et al. (2018). Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling & Software*, 99, 70-87.

(Malys et al, 2016) Malys, L., Musy, M., & Inard, C. (2016). Direct and Indirect Impacts of Vegetation on Building Comfort: A Comparative Study of Lawns, Green Walls and Green Roofs. *Energies*, 9(1), 32.

(Musy et al, 2015) Musy, M., Malys, L., Morille, B., & Inard, C. (2015). The use of SOLENE-microclimat model to assess adaptation strategies at the district scale. *Urban Climate*, 14, 213-223.

(Raissi, 2018) Raissi, M. (2018). Deep hidden physics models: Deep learning of nonlinear partial differential equations. *The Journal of Machine Learning Research*, 19(1), 932-955.

(Stewart & Oke, 2012) Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.

### **Contexte de la thèse :**

- La thèse sera réalisée au sein de la société kormap (<http://www.kormap.com>) à Rennes, en collaboration avec le laboratoire LETG-Rennes (Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique, <http://letg.cnrs.fr/>) et l'ONERA de Toulouse (équipe DOTA : <https://www.onera.fr/fr/dota>) où des missions seront effectuées. Le contrat sera de type CIFRE (Conventions industrielles de formation par la recherche), la rémunération sera à voir en fonction du candidat.

### **Profil du (de la) candidat(e) souhaité(e) :**

- Master en sciences environnementales / physique / sciences des données
- Fort goût pour l'interdisciplinarité et pour la programmation

### **Pour candidater :**

- Envoyer un CV et une lettre de motivation à
  - o Antoine Lefebvre : [antoine.lefebvre@kormap.com](mailto:antoine.lefebvre@kormap.com)
  - o Thomas Corpetti : [thomas.corpetti@univ-rennes2.fr](mailto:thomas.corpetti@univ-rennes2.fr)
  - o Laure Roupioz : [Laure.Roupioz@onera.fr](mailto:Laure.Roupioz@onera.fr)
  - o Xavier Briottet : [Xavier.Briottet@onera.fr](mailto:Xavier.Briottet@onera.fr)
- Date limite de candidature : 31 mai 2020