

CARTOGRAPHIER LE CLIMAT URBAIN POUR LA GESTION DU CONFORT D'ÉTÉ EN URBANISME : DE L'ANALYSE CLIMATIQUE ET LA SÉMIOLOGIE GRAPHIQUE AUX RECOMMANDATIONS

Julia HIDALGO¹, Najla TOUATI², Sinda HAOUES-JOUVE², Laurent JEGOU², Geneviève BRETAGNE³, Erwan BOCHER⁴, Valéry MASSON⁵, Arnaud MAYIS³, Renaud JOUGLA¹, Gwendall PETIT⁴, Robert SCHOETTER⁵, Collectif GEO-VISU⁶

¹ National Centre for Scientific Research (CNRS), Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST), Toulouse II University, Toulouse, France (julia.hidalgo@univ-tlse2.fr)

² Toulouse II University, Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST), Toulouse, France

³ Agence d'urbanisme de Toulouse (Aua/T), Toulouse, France

⁴ National Centre for Scientific Research (CNRS), Lab-Sticc, Vannes, France

⁵ CNRM/Météo-France, Toulouse, France

⁶ Françoise Bahoken (IFSTTAR AME, Nantes, France), Anne-Christine Bronner (SAGE, Université de Strasbourg), Grégoire Lecampion, Julie Pierson et Olivier Pissoat (PASSAGES, CNRS/Université de Bordeaux, Bordeaux, France)

Résumé : Cette présentation propose une contribution méthodologique pour la production de diagnostics microclimatiques urbains avec un souci d'adaptation au cadre juridique, scientifique et praxéologique français. Des cartes d'analyse climatique du niveau de stress thermique diurne, des îlots de chaleur urbains nocturnes et des vents ont été effectués pour Toulouse. Sur la base de ce diagnostic climatique, des données socio-économiques et des cartes stratégiques identifiées par les experts urbains locaux sont élaborées sous forme de croquis-schéma des secteurs à enjeux, en fonction de leur comportement microclimatique, qui nécessiteront une attention particulière en matière d'urbanisme.

Mots-Clés : îlot de chaleur urbain, urbanisme, cartographie appliquée, cartes climatiques urbaines

Abstract: Mapping the urban climate for summer comfort management in urban planning: from climate analysis and graphic semiology to recommendations. This presentation proposes a methodological contribution for the production of urban microclimatic diagnoses with a concern for adaptation to the French legal, scientific and praxeological framework. Climate analysis maps of diurnal heat stress level, nocturnal urban heat islands and winds were carried out for Toulouse. On the basis of this climate diagnosis, socio-economic data and strategic maps identified by local urban experts are drawn up in the form of sketch-diagrams of the sectors at stake, according to their microclimatic behavior, which will require particular attention in terms of town planning.

Keywords: Urban Heat Island urbanism, applied cartography, urban climate maps.

Introduction

En France, bien que relativement en retard par rapport aux pays pionniers dans la cartographie climatique comme l'Allemagne, Israël ou le Japon, depuis les dernières évolutions réglementaires, la lutte contre le changement climatique et l'adaptation à celui-ci deviennent des objectifs explicites des Plans Locaux d'Urbanisme (PLU)¹.

A l'échelle nationale, le développement de méthodes et de techniques permettant un traitement rigoureux des questions microclimatiques dans le cadre d'un exercice d'urbanisme est très récent et le contenu relatif au microclimat urbain reste souvent très peu fourni. Bien que l'on cite souvent les problèmes liés à la hausse générale des températures, à l'augmentation ou à la baisse de l'intensité des précipitations

¹ En premier lieu, la loi Grenelle II portant engagement national sur l'environnement du 12 juillet 2010, puis la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte n° 2015-992 du 17 août 2015.

et à la récurrence du phénomène de l'îlot de chaleur urbain, aucune approche quantitative et/ou spatialisée n'a été systématiquement définie.

En observant ce qui se passe dans des pays ayant déjà mené des études de climatologie urbaine appliquée, il est possible d'identifier un point commun : l'utilisation systématique des approches cartographiques permettant de spatialiser l'information climatique à l'échelle du territoire concerné. En effet, depuis près de trois décennies, des chercheurs en climatologie urbaine se sont lancés (souvent en partenariat avec les acteurs de l'urbanisme) dans l'élaboration de cartographies climatiques permettant d'enrichir le volet environnemental du diagnostic territorial et de guider, avec d'autres éléments, le processus de planification. Bien qu'apparues sous différentes appellations en fonction des pays et des échelles mobilisées, ces initiatives tendent aujourd'hui à converger autour de la dénomination générique de cartes climatiques urbaines (*Urban Climatic Map (UC-Map)*) (Ng and Ren, 2015). Le travail présenté ici s'inspire de cette série de travaux internationaux et poursuit deux objectifs principaux : adapter ce cadre méthodologique aux contextes juridique, scientifique et praxéologique français et explorer de nouvelles méthodes de représentation des données climatiques à des fins opérationnelles.

1. Description générale de l'approche cartographique

Les cartes climatiques représentent à la fois un outil de diagnostic microclimatique (carte d'analyse climatique de l'environnement urbain (*UC-AnMap*)) du territoire et un outil de traduction réglementaire des enjeux identifiés (la carte de recommandations pour l'aménagement urbain (*UC-ReMap*)). Les grandes lignes du contenu de ces cartes ont tendance à se normaliser à l'international en dépit d'un nécessaire ajustement aux contextes climatique, culturel, économique et urbain locaux. Plusieurs choix méthodologiques ont été effectués lors de ce travail : le premier choix consistait à se concentrer sur l'enjeu de la hausse des températures. Le deuxième choix consistait à proposer des outils pour améliorer la mise en œuvre de politiques locales de gestion du climat urbain dans une démarche méthodologique générique applicable à l'échelle nationale. L'accès à des données atmosphériques à haute résolution spatiale étant rare dans les villes françaises, le projet ANR-MApUCE (qui a créé une base de données urbaines, architecturales et climatiques pour une cinquantaine de villes) représente un vrai saut quantitatif du point de vue de la disponibilité des données sur la description de la ville et du climat urbain. Ceci permet de proposer des méthodologies génériques (du point de vue des outils techniques) pour l'obtention de cartes climatiques qui serviront à alimenter l'étape de diagnostic d'un document d'urbanisme. Dans le cadre de cette étude, les cartes d'analyse s'appuient sur des données de modélisation numérique du climat présentées dans la section suivante mais d'autres types de données, comme celles provenant des réseaux de mesures urbains, peuvent également être mobilisées si elles sont disponibles.

2. Présentation du terrain et des données

La métropole toulousaine se trouve dans le sud-ouest de la France, et compte une population de plus de 750 000 habitants et se compose de 37 communes pour une surface de 118 km² (environ 16 km du nord au sud et 12 km d'ouest en est). La densité de population est d'environ 1 600 habitants/km², faisant de la métropole toulousaine l'une des plus étendues de France. Toulouse est considérée comme l'une des métropoles les plus agréables et attractives de France. Cependant, la population de la métropole a augmenté de façon significative, avec plus de 8 000 nouveaux habitants par an au cours des vingt dernières années. La topographie de cette zone est relativement douce, allant de 102 m à 273 m d'altitude et est principalement influencée par les vallées tributaires de la Garonne. Du fait de sa situation éloignée de l'océan et de son terrain plat, le rafraîchissement apporté par les brises marines et des vallées est très limité. Toulouse bénéficie d'un climat océanique dégradé, ce qui signifie qu'il présente un contraste saisonnier marqué. En été, il y a habituellement de grandes variations de température quotidiennes accompagnées de vents chauds orientés nord-ouest ou sud-ouest. Même si la température quotidienne varie généralement entre 15 °C le matin et 30 °C l'après-midi, des périodes de fortes chaleurs avec des températures diurnes 40 °C peuvent être atteintes. Les données décrivant la surface urbaine proviennent de la base de données MApUCE alimentée grâce à l'automatisation des indicateurs décrivant le tissu urbain et l'occupation du sol (Bocher *et al.*, 2018).

Deux catégories d'information climatique ont été mobilisées pour décrire le climat de l'agglomération toulousaine. La première catégorie fait référence à la caractérisation des situations météorologiques (amplitude thermique journalière, vent prédominant, précipitation, etc.) auxquelles sont confrontés les Toulousains (Hidalgo et Jougla, 2018). La deuxième catégorie fait référence aux données spatialisées de microclimat issues de simulations numériques (Kwok *et al.*, 2019). L'information atmosphérique accessible à travers les simulations numériques est très riche en termes de quantité de variables, disponibilité de pas de temps et niveaux verticaux. C'est au cours de réunions d'équipe qu'ont été choisis les champs pour créer les cartes d'analyse.

- **Informations atmosphériques (trois types) :**

- Le niveau de stress thermique diurne, caractérisé selon l'indicateur *Universal Thermal Climate Index (UTCI)*² car il affecte fortement le confort des citoyens et rend incontournable le recours à la climatisation dans de nombreux secteurs d'activité.
- L'influence de la ville sur la température de l'air nocturne, caractérisée par l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU). Elle affecte la capacité des bâtiments à se refroidir pendant les heures de repos nocturne et donc la santé des habitants.
- Les conditions aérauliques, direction et intensité du vent, permettent d'identifier les zones favorables à la ventilation naturelle et celles qui présentent un déficit de ventilation.

- **Niveaux verticaux (deux types) :**

Pour l'analyse thermique (stress thermique diurne et température de l'air nocturne), la moyenne pondérée des variables météorologiques à 2 m au-dessus du sol a été utilisée sur l'ensemble des tuiles SURFEX. Pour l'analyse aéraulique, sont utilisées les données issues du premier niveau du modèle atmosphérique MESO-NH situé à 10 m au-dessus du bâti.

- **Situations météorologiques (trois types) :**

En été (juin-juillet-août), les jours appartenant à l'une des trois situations météorologiques, types de temps sensibles (TTS), propices à la formation de l'ICU où aux fortes chaleurs (TTS 7, 8 et 9, Hidalgo and Jougla, 2018) et le jour J+1 sont isolés. Les paramètres thermiques et climatiques pour la nuit sont issus des résultats du modèle allant du jour J au jour J+1 car il est admis que ces paramètres sont principalement définis par les conditions météorologiques du jour en question. Plusieurs post-traitements statistiques ont été appliqués pour faire ressortir les zones de la ville qui présentent un comportement microclimatique différencié. Le choix a été fait de calculer, pour un type de temps donné et une tranche horaire, le niveau le plus fréquent par pixel afin d'identifier les zones particulièrement sensibles aux aléas climatiques. Ici, on s'intéresse aux effets thermiques et aérauliques. Ces zones sont ici appelées *zones de persistance*.

3. Exemple via les Cartes climatiques nocturnes pour Toulouse

3.1 Cartes d'Analyse thermique la nuit

Dans la situation météorologique la plus favorable à la formation d'un îlot de chaleur urbain (TTS 9), l'impact de l'urbanisation sur la température de l'air nocturne dans le centre-ville de Toulouse dépasse 3 °C pour une bonne partie de cette zone (octogone et faubourgs) (Figure 1).

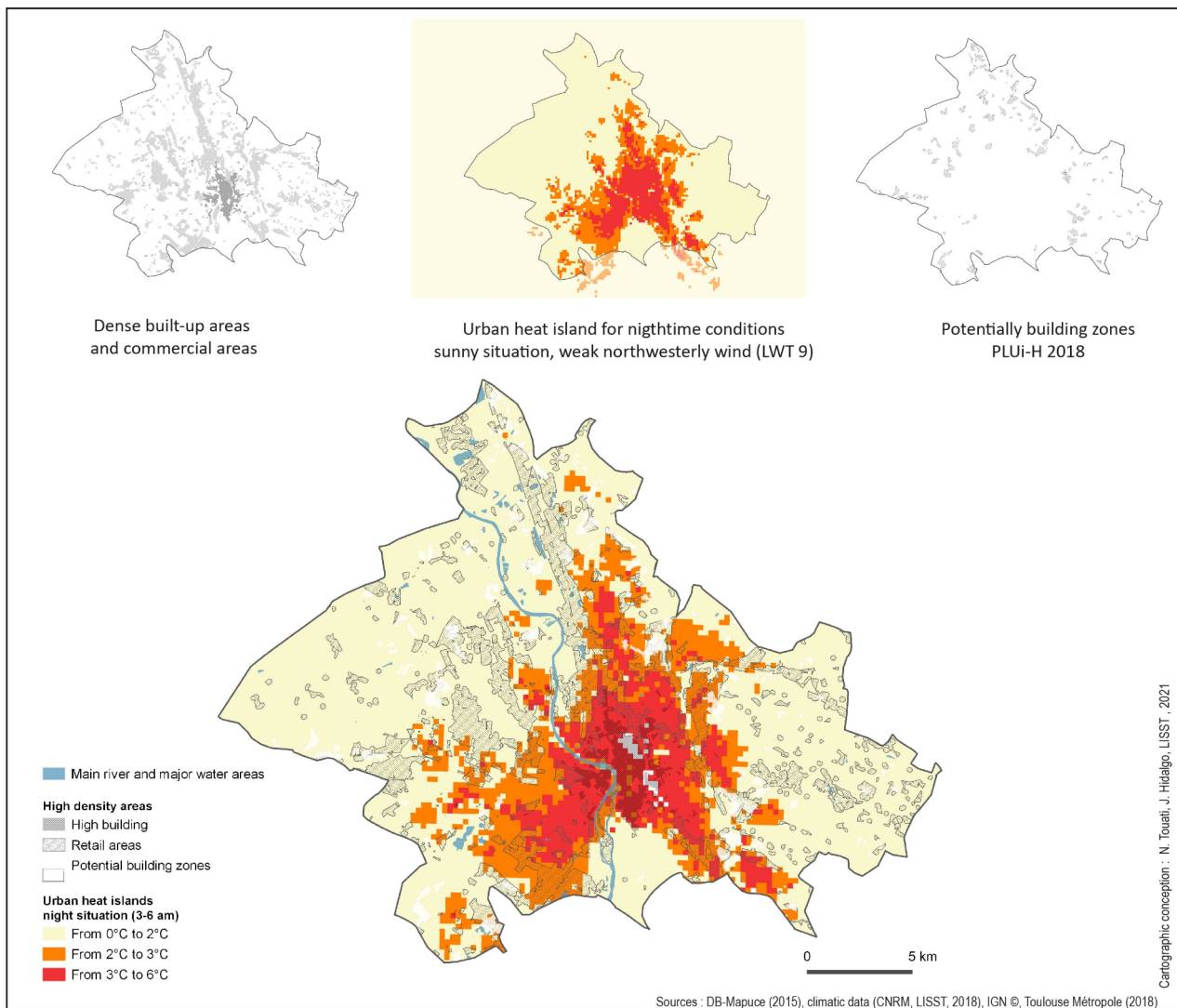
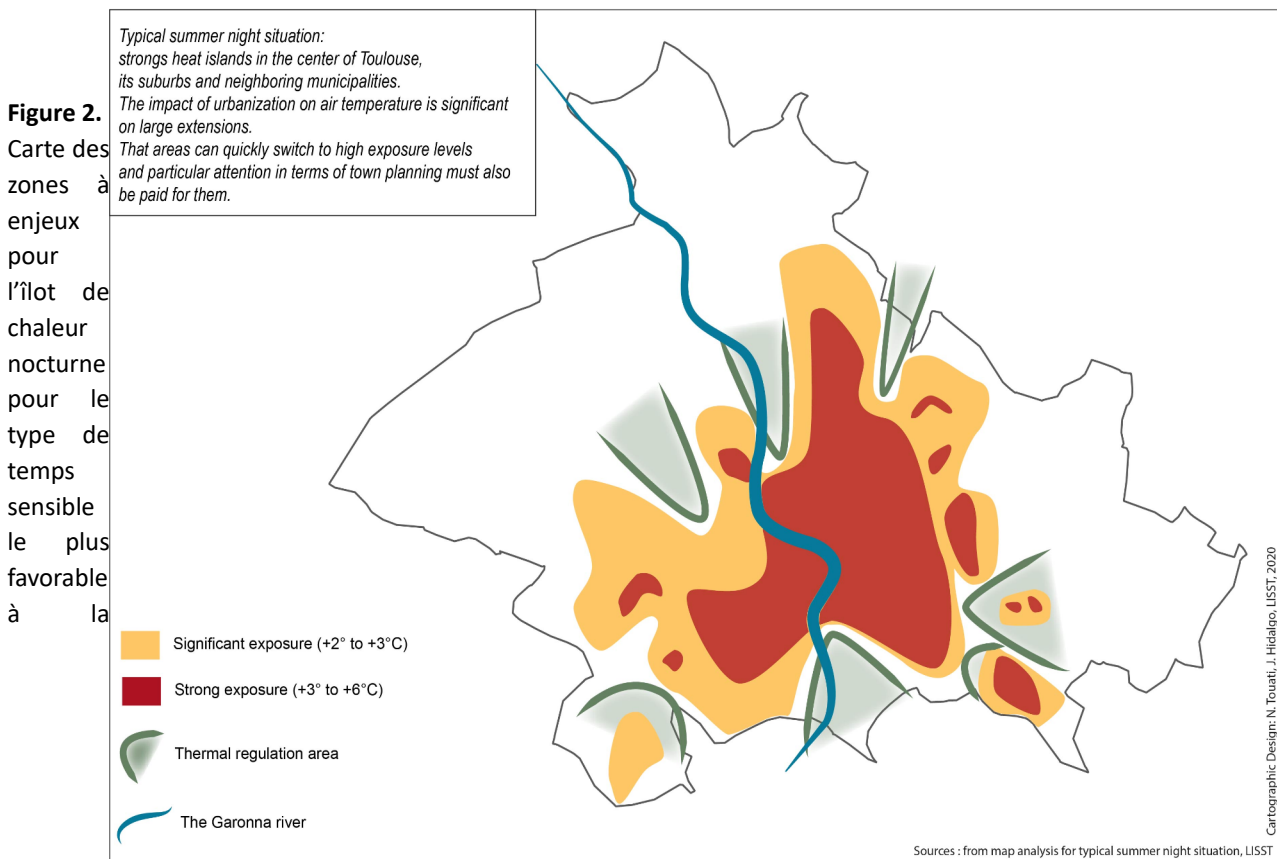


Figure 1. Carte d'analyse de l'indicateur ICU à l'aide de simulations numériques du type de temps sensible le plus favorable à la formation de ce phénomène en été (TTS 9)

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain peut atteindre +6°C dans les zones à l'ouest du centre ancien (entre le boulevard Antoine Carnot et le boulevard de la Gare), principalement en raison de l'advection par le vent prédominant d'air chaud du centre ancien vers l'ouest. Cet effet est plus difficile à comprendre pour le grand public lorsque la carte n'est pas accompagnée de l'explication d'un expert en climatologie. Il a donc été décidé de créer une seule classe d'exposition allant de +3°C jusqu'à l'intensité maximale d'un ICU. L'intensité varie en fonction non seulement de la situation météorologique mais également de la couverture spatiale. Les zones exposées à un ICU nocturne supérieur à +3°C varient de ~30 km² avec un TTS 9 à ~10 km² et ~0 km² avec respectivement les TTS 8 et 7 (non montré dans ce résumé). L'exposition des communes de première couronne de Toulouse (Launaget, L'Union, Balma et Saint-Orens à l'est et Blagnac, Colomiers, Tournefeuille et Cugnaux à l'ouest) à des niveaux de température élevés est moins importante que dans la commune de Toulouse en termes de couverture spatiale. Cependant, l'impact de l'urbanisation sur la température de l'air n'est pas négligeable dans les zones étendues (en orange sur la Figure 2). Ces sont des zones qui peuvent rapidement basculer vers des niveaux d'exposition élevés. Dans cette étude, nous les appelons les *zones à basculement*, auxquelles une attention particulière doit être portée en matière d'urbanisme, notamment depuis qu'un grand nombre de nouvelles zones ont été ouvertes à l'urbanisation au nord, à l'est et au sud-est de la métropole.

3.2 Cartes des zones à enjeux la nuit

Grâce à cet ensemble de cartes d'analyse thématiques, il est possible de différencier les secteurs à enjeux en fonction de leur comportement microclimatique qui nécessiteront une attention particulière en matière d'urbanisme. Le choix a été fait de les représenter sous forme de croquis (Figure 2).



formation de ce phénomène en été (TTS 9).

Le jeu de cartes créé et les recommandations spécifiques en matière d'urbanisme ont été regroupées dans un guide de recommandations édité par Toulouse Métropole à destination de ses services et des personnels en charge de la planification et de l'aménagement urbains intitulé « Prise en compte du climat dans la construction de la métropole de demain »³. Ce guide comprend cinq sections ; dans les deux premières, sont présentées plusieurs clés pour une compréhension théorique des problématiques climatiques aux niveaux local et mondial, ainsi qu'un diagnostic microclimatique du territoire. Dans la troisième section, des recommandations détaillées sont organisées par leviers d'actions (par exemple, végétalisation, ombrage, matériaux et surfaces urbains, gestion de l'eau) et suivant les secteurs géographiques présentés précédemment (centre historique, faubourgs, centres-villes des communes de première couronne de Toulouse, zones commerciales et d'activité et actions à l'échelle de la métropole). Les deux dernières sections présentent les outils de suivi-monitoring permettant d'étudier le climat urbain de Toulouse, notamment le réseau atmosphérique urbain (Dumas *et al.*, 2021), et une liste de quatorze questions en lien avec le microclimat urbain et préalables à tout projet d'aménagement ou de planification urbaine.

Discussion

La cartographie à visée opérationnelle est un champ mature pour un certain nombre d'enjeux environnementaux mais c'est un champ de recherche émergent pour les enjeux climatiques. Il existe en effet un standard de 2017 pour le Plan Local d'Urbanisme qui va fixer le modèle conceptuel, le catalogue de

³ <https://www.toulouse-metropole.fr/documents/10180/26954502/>

Guide_ICU_priseencompteclimaturbain+2021.pdf/d71ceaa2-8839-4c83-8669-cdc85545b675

données recommandées et la description des types énumérés pour un certain nombre de thèmes environnementaux. Dans le cadre de la production de la cartographie climatique, rien n'existe pour le moment. Dans le cadre du projet ANR-MAPUCE (2014-2019) nous avons testé différentes approches cartographiques. Plusieurs points peuvent être mis en avant quand nous nous interrogeons sur les conditions et limites de la répliquabilité des protocoles cartographiques développées : deux enquêtes effectuées auprès des agences d'urbanisme ont montré que l'absence ou l'insuffisance de compétences en interne combinée à un manque de formation sur les outils disponibles (notamment la base de données urbaine MAPUCE dont la visibilité reste limitée), rend difficile l'intégration de ces études et méthodes scientifiques qui ne sont pas encore suffisamment connues et encore moins systématisées du point de vue opérationnel. Par ailleurs, le processus de co-construction mis en œuvre à Toulouse souligne l'importance d'un interlocuteur, un « lien » entre les chercheurs et les équipes techniques, qui peut alimenter le sujet en permanence, au sein de la collectivité ou d'une structure partenaire (ici une agence d'urbanisme). Il est également nécessaire de créer de nouveaux profils professionnels ou d'étendre les missions et compétences actuelles des professionnels du climat dans les (grandes) collectivités territoriales ou les agences d'urbanisme.

Remerciement : Les auteurs tiennent à remercier les Directions de la Réglementation urbaine et de l'Environnement de Toulouse Métropole et tous les agents ayant participé aux ateliers de co-élaboration des recommandations. Nous remercions également Henry Ibitolu pour son travail exploratoire sur l'analyse du vent lors de son stage de Master MURCS. Ce projet de recherche a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche sous le numéro de subvention ANR-13-VBDU-004 et par le Labex SMS qui a financé les ateliers GEO-VISU.

Bibliographie

Bocher E., Petit G., Bernard J. and Palominos S. 2018: A geoprocessing framework to compute urban indicators: The MAPUCE tools chain. *Urban Climate*, Elsevier, **24**, pp.153-174.

[Hidalgo, J. and Jouglu, R.2018c: On the use of local weather types classification to improve climate understanding: An application on the urban climate of Toulouse. PLoS ONE 1312.](#)

Kwok Y.-T., R. Schoetter, K. Lau, J. Hidalgo, C. Ren, G. Pigeon and V. Masson 2019: How well does the Local Climate Zone scheme discern the thermal environment of Toulouse (France)? An analysis using numerical simulation data. *International Journal of Climatology*, published online, doi:10.1002/joc.6140

Ng E., & Ren C. (sous la direction de), 2015: *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning*. Routledge, 52p.