



HAL
open science

Modèle de données urbain pour l'étude de la surchauffe des quartiers

Simon Martinez, Emmanuel Bozonnet, Manon Rendu, Boris Brangeon

► **To cite this version:**

Simon Martinez, Emmanuel Bozonnet, Manon Rendu, Boris Brangeon. Modèle de données urbain pour l'étude de la surchauffe des quartiers. IBPSA France 2024, May 2024, La Rochelle - Ile d'Oléron, France. hal-04599209

HAL Id: hal-04599209

<https://hal.science/hal-04599209v1>

Submitted on 3 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modèle de données urbain pour l'étude de la surchauffe des quartiers

Simon Martinez*^{1,2,3,4}, Emmanuel Bozonnet^{1,2,4}, Manon Rendu^{3,4}, Boris Brangeon^{3,4}

¹ IRSTV FR CNRS 2448

1 rue de la Noë, 44321 Nantes Cedex 3,

² LaSIE UMR CNRS 7356

Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1,

³ Plateforme TIPEE

8 Rue Isabelle Autissier, 17140 Lagord

* simon.martinez@plateforme-tipee.com

⁴ RUPEE Lab

RESUME. Dans un contexte de réchauffement climatique, les solutions d'atténuation de la surchauffe urbaine semblent identifiées (revêtement à fort albédo, morphologie urbaine permettant la ventilation naturelle, végétation pour les apports d'ombrages et d'humidité, ...), mais il est encore difficile pour les acteurs opérationnels du territoire de s'approprier ces solutions et donc, de concevoir les nouveaux quartiers ou les opérations de rénovation. Nous avons développé une plateforme logicielle qui intègre les principaux paramètres nécessaires à l'évaluation des solutions, et qui sont gérés automatiquement dans un modèle de données urbain. Ce modèle de données permet d'agréger des données géoréférencées à l'échelle du quartier, de produire des indicateurs simples, et de préparer les données d'entrée de simulations de thermique du quartier. Le cas d'étude présenté ici illustre l'utilisation de ce modèle pour la température moyenne radiante, les ombrages et le vent dans la zone urbaine. Les cartographies détaillées ainsi produites se révèlent très utiles pour l'adaptation des quartiers face aux surchauffes.

MOTS-CLÉS : surchauffe urbaine, maquette numérique de quartier, confort thermique extérieur

ABSTRACT. In a global warming context, solutions for mitigating urban overheating have been identified, such as high-albedo surfaces, urban morphology that allows for natural ventilation, and vegetation to provide shade and humidity. However, it remains challenging for stakeholders to adopt these solutions and incorporate them into the design of new neighborhoods or renovation operations. A software platform has been developed to integrate the necessary parameters for evaluating solutions, which are automatically managed in an urban data model. This model can aggregate geo-referenced data on a neighborhood scale, produce simple indicators, and prepare input data for thermal simulations of the neighborhood. The presented case study illustrates the use of this model for mean radiant temperature, shading, and wind in the urban area. The detailed maps produced are useful for adapting neighborhoods to overheating.

KEYWORDS: Urban overheating, digital neighborhood model, outdoor thermal comfort

1. INTRODUCTION

Nous présentons dans cet article notre développement d'un Modèle de Données Urbain (MDU) pour collecter, traiter et stocker les données nécessaires à la réalisation des simulations microclimatiques à l'échelle d'un quartier. En effet, le manque de disponibilité et de fiabilité de la donnée (comme la géométrie urbaine, nature des surfaces, usages des espaces urbains, les conditions climatiques)

représente l'une des principales limites des outils d'évaluation des aménagements urbains (Goy, Maréchal, et Finn 2020). Aussi, les multiples obstacles rencontrés pour préparer les données d'entrées d'un modèle de microclimat (Bechtel et al. 2015) complexifient la réalisation d'études paramétriques nécessaires pour l'optimisation de l'aménagement d'un quartier vis-à-vis de la surchauffe urbaine. De plus, ces données étant utilisées par plusieurs autres acteurs de l'aménagement urbain, la mutualisation de leur collecte et leur stockage au sein d'une base de données commune sont pertinents pour assurer la cohérence des études multithématiques et faciliter le croisement des résultats.

2. DESCRIPTION DU MODELE DE DONNEES

Nos développements ont été réalisés en langage Python, regroupés dans un package *PyMDU* pour **Python-Modèle de Données Urbain**, et détaillés dans cette partie.

2.1. COLLECTE DES DONNEES, RECUPERATION VIA DES API OPEN-SOURCE

L'objectif de cette opération est d'automatiser l'interrogation des API open-source pour collecter les données à partir de bases de données variées. Par exemple, pour l'interrogation de la base BDTOPO (BD TOPO® 2024) sur les bâtiments (base de données qui décrit les éléments du territoire et ses infrastructures, notamment ses bâtiments), nous utilisons une requête de cette forme :

https://data.geopf.fr/wfs/ows?SERVICE=WFS&VERSION=2.0.0&REQUEST=GetFeature&TYPENAME=BDTOPO_V3:batiment&SRSNAME=EPSG:4326&BBOX=-1.1527,46.18163,-1.13989,46.18699,EPSSG:4326&STARTINDEX=0&COUNT=10000&outputFormat=application/json&SERVICE=WFS

Cette requête, exécutée avec un navigateur Web, permet de télécharger un fichier json sur les serveurs de l'IGN (Services Géoplateforme 2024) avec les données géométriques des bâtiments du quartier. Dans l'exemple précédent, les éléments surlignés en gris sont précisés :

- `BDTOPO_V3:batiment` : la clé de la base de données IGN (clés consultables ici : https://geoservices.ign.fr/documentation/services/tableau_ressources) ;
- `-1.1527,46.18163,-1.13989,46.18699` : l'empreinte du quartier par les coordonnées en latitude et longitude ;
- `EPSG:4326` : le système de coordonnées (ici Lambert-93).

Nous rappelons dans le Tableau 1 l'ensemble des données qu'il est possible d'obtenir avec une méthodologie similaire (toutes provenant de bases de données de l'IGN).

Type de donnée	Source	Lien vers la documentation
Bâtiments	BD TOPO® V3 bâtiment	https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2021-07/DC_BDTOPO_3-0.pdf
Relief	Modèle numérique de terrain RGE Alti	https://geoservices.ign.fr/rgealti
Zone d'eau	BD TOPO® V3 plan d'eau	https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2021-07/DC_BDTOPO_3-0.pdf
Routes	BD TOPO® V3 tronçon de route	https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2021-07/DC_BDTOPO_3-0.pdf
Cadastre	Parcellaire Express (PCI) parcelle	https://geoservices.ign.fr/parcellaire-express-pci#:~:text=Parcellaire%20Express%20(PCI)%20fournit%20l,au%20parcellaire%20cadastral%20du%20PCI.

Tableau 1 : principales sources et lien d'accès de données librement accessibles

Les deux dernières lignes sont grisées car elles sont traitées par le modèle de données sans être directement utilisées pour la modélisation microclimatique. Elles peuvent être utilisées lors de la mise en contexte de la simulation, pour un diagnostic de site par exemple.

2.2. TRAITEMENT DES DONNEES GEOREFERENCEES

Une fois les données collectées, elles sont reprojctées et homogénéisées. Le système de coordonnées EPSG:4326 n'est pas idéal, et il est préférable de travailler en mètres pour des calculs géométriques. Les données sont donc reprojctées dans le système de coordonnées EPSG:2154 à l'aide du package Python *GeoPandas* qui utilise les développements de la librairie *GDAL* (Rouault et al. 2024). Également, les données sont projetées sur des cellules de 1 m × 1 m.

2.2.1. Utilisation de développements IA pour la couverture du sol

Les données d'occupation du sol et de végétalisation en zone urbaine sont relativement mal renseignées, ce qui exige de les renseigner manuellement. Nous utilisons donc les développements récents du traitement d'images satellites pour automatiser et simplifier la description sous forme d'ensembles, tels que dans l'exemple de la Figure 1, comme base de travail avant complétion manuelle à partir de vues satellite ou de plans de projets.



Figure 1 : illustration de l'identification de l'occupation du sol
projet CoSIA (IGNcommunication 2023)

Dans cet exemple trois types d'occupation du sol sont identifiées : en rose les bâtiments, en gris les surfaces imperméables, en vert clair la pelouse, et en vert foncé les zones arborées par des essences feuillues.

2.2.2. Les données météorologiques

L'objectif étant l'étude de l'aménagement des espaces extérieurs, les données météorologiques essentielles sont l'ensoleillement, la température et l'humidité de l'air, et le vent.

Les données climatiques moyennes (année type *TMY*) sont disponibles au niveau mondial pour des stations météo en général en dehors des centres urbains (Climate.onebuilding.org, ENSIMS EPW Map Tool, EPW Map). Pour prendre en compte l'effet îlot de chaleur urbain sur les propriétés de l'air, nous utilisons code de calcul Urban Weather Generator *UWG* (Ladybug-tools/uwg 2024). Les données précédemment collectées doivent être prétraitées (densité urbaine, hauteur moyenne des bâtiments, ratio de surface verticale/surface horizontale, pourcentage de couverture végétale) pour être utilisées en entrée du modèle *UWG*. Pour réaliser ces opérations de préparation des données, les travaux du projet Geoclimate (Orbisgis/geoclimate 2024) sont utilisés.

Pour des cas d'étude français, un nombre important de données météo est fourni par Meteo-France (<https://meteo.data.gouv.fr/>). Ainsi, il est possible d'obtenir des données météorologiques très localisées. Une fois ces données converties au format epw, les mêmes opérations sont réalisées pour obtenir un fichier météo urbain.

2.3. LE STOCKAGE DES DONNEES EN *POSTGIS*

L'ensemble de ces données est stocké sous la forme d'une base de données *PostgreSQL* avec l'extension *PostGIS* facilitant la manipulation des données géospatiales. Les avantages d'utilisation de ce type de base de données sont nombreux :

- **Intégrité** : propriétés générales de toutes les bases de données relationnelles, à savoir, les propriétés ACID (Atomicité, Cohérence, Isolement et Durabilité) assurant ainsi l'intégrité de la base de données en vérifiant la validité des transactions,

- **Organisation des données** : e relations attributaires et spatiales entre les tables facilitant les requêtes (opérations rapides notamment sur les données géoréférencées),

- **Mutualisation** : les bases de données *PostGIS* sont facilement partageables entre utilisateurs.

2.4. SYNTHESE DES OPERATIONS

La Figure 2 présente les étapes clés de l'ensemble des opérations pour la modélisation microclimatique décrite précédemment.

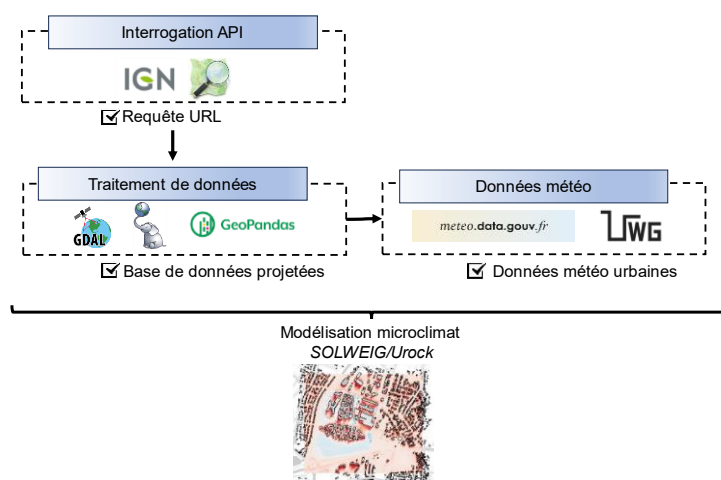


Figure 2 : vue d'ensemble des opérations du MDU pour la modélisation microclimatique

Les données géoréférencées via des API et traitées en interne, ainsi que les données météo urbaines à l'échelle de la ville calculées ici, sont utilisées comme décrites dans la suite (outils *SOLWEIG* et *Urock*) pour calculer la température ressentie à l'échelle urbaine du quartier étudié en détails.

3. SIMULATIONS MICROCLIMATIQUES – SOLAIRE ET AERAULIQUE URBAINE

Pour caractériser la température ressentie dans les espaces extérieurs, nous avons opté ici pour l'indicateur *UTCI*. Cet indicateur très couramment utilisé prend en compte l'ensemble des facteurs microclimatiques, ainsi que les données des occupants, tel que la vêtue, et les données météo simulées précédemment à l'échelle de la ville, avec en particulier la température d'air qui augmente avec l'îlot de

chaleur urbain (calcul *UWG* précédent). Localement, nous réalisons alors des cartographies détaillées de confort à l'aide de l'évaluation des variations dans le quartier lui-même de la température radiante moyenne, de l'ensoleillement et de la vitesse de vent en chaque point.

3.1. LA TEMPERATURE RADIANTE MOYENNE

Le calcul de la température radiante moyenne est réalisé en utilisant le code *SOLWEIG*, développé par l'université de Göteborg (Lindberg, Holmer, et Thorsson 2008). Le code *SOLWEIG* détermine la température moyenne radiante (T_{MR}) d'après la méthode de Höppe (1992). T_{MR} est déterminée en estimant les flux de solaires et thermiques reçus par un corps humain en fonction des facteurs de formes avec la scène.

La modélisation peut être réalisée via un plugin *UMEP* de *QGIS*. Pour réaliser une modélisation, il est nécessaire de réunir les données d'entrée suivantes :

- *DSM.tif* : Digital Surface Model, i.e. fichier raster 2D des surfaces des bâtiments
- *DEM.tif* : Digital Elevation Model ou modèle numérique de terrain
- *CDSM.tif* : Canopy Digital Surface Model, fichier raster 2D de la végétation (partie haute)
- *TDSM.tif* : Tree Digital Surface Model, fichier raster 2D de la végétation (partie basse)
- *landcover.tif* : fichier raster de l'occupation du sol
- *svfs.zip* : Facteur de forme des bâtiments, selon les 4 directions cardinales
- *Height.tif* : fichier raster de la hauteur des murs/bâtiments
- *Aspect.tif* : orientation des murs en degrés (0° pour un mur face au Nord)
- *MeteoFile.txt* : fichier météorologique au format texte

Parmi les données d'entrée précédentes : *DEM.tif* et *MeteoFile.txt* sont directement issus des données API et de post-traitements internes de *PyMDU*. Le fichier *landcover.tif* est issu du traitement des données d'occupation du sol de *CoSIA*, en accord avec les possibilités du code *SOLWEIG* (7 typologies de sol disponibles dans la version utilisée). Une table de correspondance a donc été établie entre les données *COSIA* et les données *SOLWEIG*. Les autres fichiers sont générés par des développements liés au projet *UMEP*, et orchestrés par *PyMDU*.

3.2. LES OMBRES

Les ombrages sont déterminés à partir des mêmes données d'entrée que celle de la température moyenne radiante. Plus spécifiquement, ils sont calculés à partir du modèle numérique terrain et des modèles numériques de surface en utilisant l'algorithme « Shadow casting » développé par Ratti et Richens (1999).

3.3. LE VENT DANS LE QUARTIER D'ETUDE

Le calcul du vent dans la zone urbaine s'appuie sur les développements récents du code open-source *Urock* (Bernard, Lindberg, et Oswald 2023). Il s'agit de la traduction en Python de la méthodologie proposée initialement par Röckle et déjà implémenté dans le logiciel *QUIC-URB* (Pardyjak et Brown 2003). La détermination des vitesses de vent s'effectue en deux étapes. Dans un

premier temps, la forme des zones d'influence derrière les obstacles (bâtiments, arbres) est déterminée sur la base de corrélations établies en soufflerie. Dans un second temps, les flux d'air sont équilibrés dans le but d'assurer la conservation de la masse en modifiant le champ de vitesse initial. Les développements de *PyMDU* permettent de relier le code de calcul *Urock* au fichier météo afin de calculer le vent dans la zone urbaine à chaque pas de temps du fichier météo.

3.4. LA TEMPERATURE RESENTIE (UTCI)

À partir des grandeurs calculées précédemment, des cartographies d'UTCI (Blazejczyk et al. 2012) sont établies. Pour cela, la librairie python *PythermalComfort* (Tartarini et Schiavon 2020) est utilisée. Pour chaque pixel, les calculs précédents permettent de déterminer l'UTCI local : la température et l'humidité d'air sont calculées par *UWG*, la température moyenne radiante par *SOLWEIG*, et le vent par *Urock*.

3.5. RESULTATS ET ANALYSES DU CONFORT EXTERIEURS

Pour notre cas d'étude (preuve de concept) du quartier Atlantech à Lagord (France), nous avons automatisé la génération de simulations microclimatiques, via notre MDU, pour trois mois de simulations au pas de temps horaire. La Figure 3 illustre, au pas de temps horaire, les cartographies d'UTCI (3a), d'ombrage (3b), de température moyenne radiante (T_{MRT}) (3c) et de vent (3d) obtenues pour une journée sur ces trois mois (uniquement le jour en période d'occupation des espaces extérieurs).

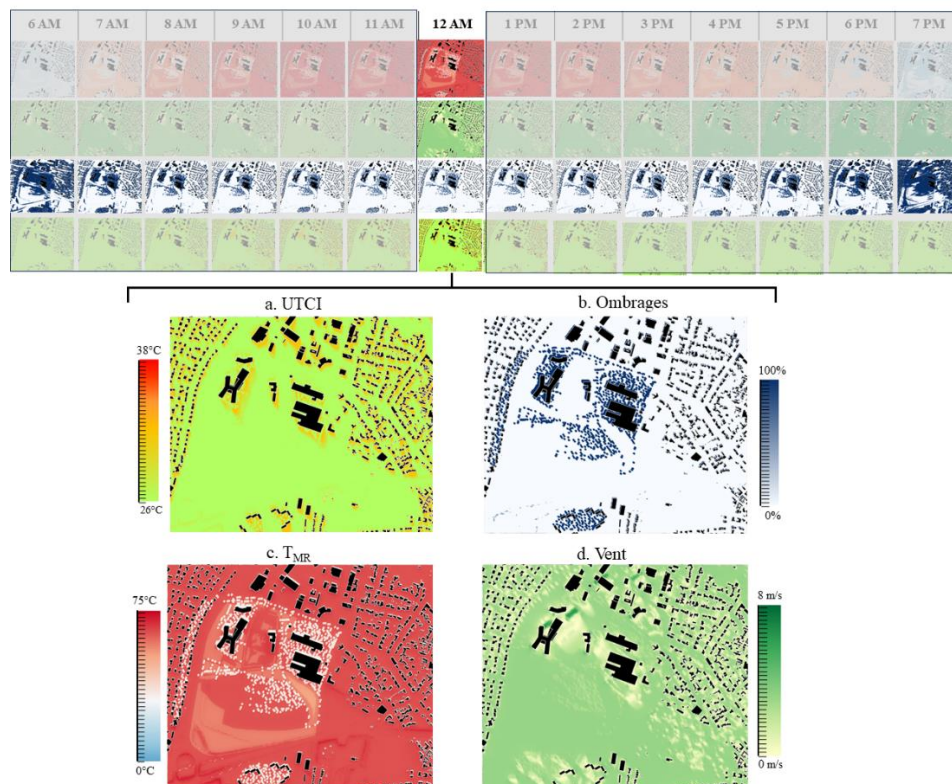


Figure 3 : cartographies des résultats microclimatiques, le 16 août

La Figure 3c, montre une nette diminution de la température moyenne radiante dans les zones ombragées. À midi, T_{MR} mesurée atteint environ 75°C en plein soleil, alors qu'elle vaut environ 30°C à

l'ombre (environ égale à la température de l'air). Sur la Figure 3b, les surfaces au sol ombragées sont représentées en noires. Pour l'ombrage généré par la végétation l'algorithme prend un facteur de transmission lumineuse (par défaut la transmission de la lumière à travers la végétation vaut 3%). Sur la Figure 3d, on observe une réduction de la vitesse du vent derrière les obstacles (arbres et bâtiments) qui dépend de la direction du vent (ici nord-nord-ouest). Pour notre cas d'étude, la température ressentie est la plus élevée dans les zones abritées du vent au soleil (UTCI = 38°C, correspondant à un stress thermique élevée). Cette température ressentie est nettement diminuée à l'ombre de la végétation, où elle avoisine la température d'air (environ 30°C).

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La méthodologie proposée et illustrée ici tire parti de nombreuses bibliothèques et données accessibles, avec des développements pour automatiser la collecte et le traitement de données pour l'étude microclimatique. Un premier résultat avancé de ces développements est la génération automatique de cartographies des phénomènes qui permet de modéliser la température ressentie à l'échelle du quartier. On perçoit l'intérêt certain des décideurs pour ces outils, qui sont aussi un réel atout à des fins pédagogiques.

Cependant, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour exploiter pleinement ces cartographies. En effet, la dynamique sur de larges échelles d'espaces et de temps s'avère complexe, et pourrait mener à des analyses erronées. Sans indicateur simple d'agrégation de cette multitude de cartes produites automatiquement, il peut être difficile de tirer des conclusions pertinentes. Ainsi, des travaux sont en cours pour définir des indicateurs quantifiant la qualité thermique des quartiers urbains.

5. FINANCEMENT & REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée dans le cadre du plan France Relance « Préservation de l'Emploi R&D » (convention n° ANR-21-PRRD-0010-01) et dans le cadre du projet QAPE O SUD financé par l'ADEME (APR AQACIA, convention n° 21DAD0027).

Les auteurs remercient les contributeurs aux codes et aux bases de données open-source utilisés.

6. BIBLIOGRAPHIE

- BD TOPO® | Géoservices. Consulté le 13 février 2024. <https://geoservices.ign.fr/bdtopo>.
- Bernard, Jérémy, Fredrik Lindberg, et Sandro Oswald. 2023. "URock 2023a: an open-source GIS-based wind model for complex urban settings." **Geoscientific Model Development** 16 (20): 5703-27. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-5703-2023>.
- Bechtel, Benjamin, Paul J. Alexander, Jürgen Böhner, Jason Ching, Olaf Conrad, Johannes Feddema, Gerald Mills, Linda See, et Iain Stewart. 2015. « Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities ». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4 (1): 199-219. <https://doi.org/10.3390/ijgi4010199>.
- Blazejczyk, Krzysztof, Yoram Epstein, Gerd Jendritzky, Henning Staiger, et Birger Tinz. 2012. « Comparison of UTCI to Selected Thermal Indices ». *International Journal of Biometeorology* 56 (3): 515-35. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>.
- Climate.onebuilding.org. Consulté le 22 février 2024. <https://climate.onebuilding.org/>.
- ENSIMS EPW Map Tool. Consulté le 22 février 2024. <https://app.ensims.com/epw/>.
- EPW Map. Consulté le 22 février 2024. <https://www.ladybug.tools/epwmap/>.
- Höppe, P., 1992: Ein neues Verfahren zur Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur im Freien [A new method to determine the mean radiation temperature outdoors]. *Wetter und Leb.*, 44, 147–151

- Ladybug-tools/uwg. (2017) 2024. Python. Ladybug Tools. <https://github.com/ladybug-tools/uwg>.
- Lindberg, Fredrik, Björn Holmer, et Sofia Thorsson. 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. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>.
- Nassiopoulos, Alexandre, et Frédéric Bourquin. 2010. "Fast three-dimensional temperature reconstruction." **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering** 199 (49–52): 3169-78. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2010.06.022>.
- Orbisgis/geoclimate. (2019) 2024. Groovy. OrbisGIS. <https://github.com/orbisgis/geoclimate>.
- Ratti, Carlo, et Paul Richens. 1999. "Urban Texture Analysis with Image Processing Techniques." In **Computers in Building: Proceedings of the CAADfutures'99 Conference**, édité par Godfried Augenbroe et Charles Eastman, 49-64. Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5047-1_4.
- « BD TOPO® | Géoservices ». s. d. Consulté le 13 février 2024. <https://geoservices.ign.fr/bdtopo>.
- Bechtel, Benjamin, Paul J. Alexander, Jürgen Böhner, Jason Ching, Olaf Conrad, Johannes Feddema, Gerald Mills, Linda See, et Iain Stewart. 2015. « Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities ». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4 (1): 199-219. <https://doi.org/10.3390/ijgi4010199>.
- Bernard, Jérémy, Fredrik Lindberg, et Sandro Oswald. 2023. « URock 2023a: an open-source GIS-based wind model for complex urban settings ». *Geoscientific Model Development* 16 (20): 5703-27. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-5703-2023>.
- Blazejczyk, Krzysztof, Yoram Epstein, Gerd Jendritzky, Henning Staiger, et Birger Tinz. 2012. « Comparison of UTCI to Selected Thermal Indices ». *International Journal of Biometeorology* 56 (3): 515-35. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>.
- « climate.onebuilding.org ». s. d. Consulté le 22 février 2024. <https://climate.onebuilding.org/>.
- « ENSIMS EPW Map Tool ». s. d. Consulté le 22 février 2024. <https://app.ensims.com/epw/>.
- « EPW Map ». s. d. Consulté le 22 février 2024. <https://www.ladybug.tools/epwmap/>.
- Goy, Solène, François Maréchal, et Donal Finn. 2020. « Data for Urban Scale Building Energy Modelling: Assessing Impacts and Overcoming Availability Challenges ». *Energies* 13 (16): 4244. <https://doi.org/10.3390/en13164244>.
- IGNcommunication. 2023. *Découvrez CoSIA, la Couverture du Sol par Intelligence Artificielle*. <https://www.youtube.com/watch?v=kDFb8cTWa1s>.
- « ladybug-tools/uwg ». (2017) 2024. Python. Ladybug Tools. <https://github.com/ladybug-tools/uwg>.
- Lindberg, Fredrik, Björn Holmer, et Sofia Thorsson. 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. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>.
- « orbisgis/geoclimate ». (2019) 2024. Groovy. OrbisGIS. <https://github.com/orbisgis/geoclimate>.
- Pardyjak, Eric R., et Michael Brown. 2003. « QUIC-URB v1.1 - Theory and User's Guide ». Los Alamos National Laboratory. https://lanl.gov/projects/quic/open_files/QUICURB_UsersGuide.pdf.
- Ratti, Carlo, et Paul Richens. 1999. « Urban Texture Analysis with Image Processing Techniques ». In *Computers in Building: Proceedings of the CAADfutures'99 Conference. Proceedings of the Eighth International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures Held at Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA on June 7–8, 1999*, édité par Godfried Augenbroe et Charles Eastman, 49-64. Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5047-1_4.
- Rouault, Even, Frank Warmerdam, Kurt Schwehr, Andrey Kiselev, Howard Butler, Mateusz Łoskot, Tamas Szekeres, et al. 2024. « GDAL ». Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5884351>.
- « Services Géoplateforme | Géoservices ». s. d. Consulté le 13 février 2024. <https://geoservices.ign.fr/documentation/services/services-geoplateforme>.
- Tartarini, Federico, et Stefano Schiavon. 2020. « pythermalcomfort: A Python package for thermal comfort research ». *SoftwareX* 12 (juillet): 100578. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100578>.
- Rouault, Even, Frank Warmerdam, Kurt Schwehr, Andrey Kiselev, Howard Butler, Mateusz Łoskot, Tamas Szekeres, et al. 2024. "GDAL." **Zenodo**. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5884351>.
- Services Géoplateforme | Géoservices. Consulté le 13 février 2024. <https://geoservices.ign.fr/documentation/services/services-geoplateforme>
- Tartarini, Federico, et Stefano Schiavon. 2020. "pythermalcomfort: A Python package for thermal comfort research." **SoftwareX** 12 (juillet): 100578. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100578>.