



**Université de Toulouse**

**MASTER 2 GEOMATIQUE**

« **Sciences Géomatiques en environneMent et Aménagement** » (**SIGMA**)

<http://sigma.univ-toulouse.fr>

**MEMOIRE DE RECHERCHE**

**Caractérisation et co-visualisation du climat urbain et morphologie / Joint characterization and visualization of urban climate and morphology**



**RILEY Luke**



L'Institut national de l'information géographique et forestière

Mâîtres de stage : Paul Chapron, Sidonie Christophe, Jacques Gautier

Enseignant-référent : Laurent Jégou



Laboratoire de recherche LASTIG

**Septembre 2020**

## Sommaire

<b>Résumé</b>	<b>2</b>
<b>Remerciements</b>	<b>3</b>
<b>Première Partie : contexte, introduction et présentation du stage</b>	<b>4</b>
<b>Deuxième Partie : Analyses statistiques</b>	<b>21</b>
<b>Troisième Partie : Co-visualisation</b>	<b>41</b>
<b>Conclusion</b>	<b>52</b>
<b>Perspectives</b>	<b>53</b>
<b>Bilan personnel du stage</b>	<b>53</b>
<b>Annexes</b>	<b>54</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>72</b>
<b>Table de matières</b>	<b>75</b>
<b>Figures et tableaux</b>	<b>77</b>

## Résumé

Un réchauffement du climat global est prévu avant la fin du 21<sup>ème</sup> siècle ce qui va générer une augmentation des événements extrêmes dont les canicules. Ce changement engendra une intensification de températures locales en ville, un phénomène connu comme l'îlot de chaleur urbain (ICU) qui pourrait avoir des conséquences sanitaires dramatiques pour les habitants. De nombreux facteurs ont été identifiés comme la cause des ICUs dont la forme et les caractéristiques des constructions urbaines comme des bâtiments et des surfaces minéralisées, autrement appelés la morphologie urbaine. Stewart et Oke (2012) ont proposé le système des « *Local Climate Zones* » (LCZs) pour classifier cette morphologie et analyser son impact sur le climat local, qui a inspiré la création d'un maillage de classification urbain du projet de recherche français intitulé MApUCE. Météo France fourni des données de simulation du climat, les mailles de Meso-NH (*Mesoscale non-hydrostatic model*) (Lac et al., 2018) dont les données de TEB (*Town Energy Balance*) (Masson, 2000) permet simuler les températures locales dans des zones urbanisées.

L'objectif de cette étude est que la morphologie urbaine a un impact sur le climat local de Paris et que cet impact peut être mesuré à travers des mesures scalaires, autrement appelées des indicateurs morphologiques. Ensuite, une co-visualisation d'une sélection de ces indicateurs avec les températures locales sera proposée comme une aide à la décision pour les météorologues, des urbanistes et d'autres membres de la communauté scientifique.

Des résultats des analyses statistiques de cette étude ont démontré que la morphologie impacte le climat de manière très hétérogène, et un rendu visualisant des indicateurs en conjonction avec la température en 3D est proposé.

## Abstract

*Global temperatures are expected to rise significantly before the end of the 21<sup>st</sup> century, which is expected to increase weather extremes such as heatwaves. This climate change will most likely intensify local temperatures in cities, a phenomenon known as urban heat islands (UHI), which could have dramatic consequences for the health and wellbeing of city dwellers. Many factors have been identified as the cause of UHI, for example the shape and characteristics of urban constructions such as buildings and artificial surfaces, otherwise known as urban morphology. Stewart and Oke (2012) propose "Local Climate Zones" (LCZ), a system to classify urban morphology and analyse its impact on local climates, which in turn inspired the creation of grid layer for urban classification by French research project MApUCE. Météo-France, the French National Bureau of Meteorology has provided climate simulation data in the form of Meso-NH (Mesoscale non-hydrostatic model) mesh, from which TEB (Town Energy Balance) data enables the user to simulate local urban temperatures.*

*The main objective of this study is to demonstrate that urban morphology does have an impact on the local climate of Paris, and that this impact can be measured through scalar measures, also known as morphological indicators. As a consequence, a joint visualisation of a selection of these indicators with local temperatures will be offered as decision support for meteorologists, urban planners and other members of the scientific community.*

*The results from the statistical analysis of this study demonstrated that urban morphology does indeed have an impact on the local climate, but in a rather heterogeneous manner. A 3D visualisation of certain indicators along with local temperatures is thus proposed.*

## Remerciements

Je tiens à remercier Paul Chapron en premier, qui était mon encadrant principal pendant la durée de ce stage. Sans ses efforts ce stage n'aurait pas pu se dérouler dans de bonnes conditions. Il m'avait très bien encadré au début et m'a dirigé vers les bons domaines de recherche et m'a beaucoup aidé en mon apprentissage en R. De plus, un grand merci pour ses relectures et apports à ce mémoire.

Un grand merci également à Sidonie Christophe, qui m'a beaucoup appris à ce que c'est la géovisualisation, de bien structurer mes pensées et mes rendus, et aussi d'avoir très bien géré le fonctionnement de l'équipe GEOVIS pendant le confinement avec toutes ses idées et jeux de lecture des articles et présentations de bibliothèques de javascript.

Merci beaucoup aussi à Jacques Gautier pour ses retours sur mes visualisations et ses idées de pistes de recherche, et pour ses renseignements sur les données de Meso-NH.

Un grand merci à Laurant Jégou, mon tuteur de stage à l'Université de Toulouse Jean-Jaurès pour ses conseils très précis et intéressant, et pour sa relecture de ce mémoire qui m'a vraiment aidé à la raffiner et de pousser mes analyses plus loin.

Merci aussi aux chercheurs, doctorants, post-doctorants et stagiaires au laboratoire LASTIG à l'IGN pour m'avoir accueilli dans leur structure et pour les échanges intéressants, enrichissants et même drôles.

Merci beaucoup aux formateurs dans le programme du Master SIGMA à l'Université de Toulouse Jean-Jaurès et à l'ENSAT pour m'avoir donné l'opportunité et la formation nécessaire d'intégrer le monde des sciences de l'information géographique.

Et enfin merci à toute la promotion du Master SIGMA 2019-2020, malgré une année d'événements inédits, on était un groupe bien soudé !

## Première Partie : contexte, introduction et présentation du stage

### 1.1. Introduction et les hypothèses de départ

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoit un réchauffement climatique global selon de nombreux scénarios et taux d'intensité relatifs aux émissions des gaz à effets serre (4<sup>ème</sup> Rapport du GEIC, 2014)<sup>1</sup>, ce qui va très probablement générer une augmentation des événements extrêmes, dont les canicules (Pinson et al., 2015, p.2). Ce phénomène, et l'augmentation des températures globales en été, engendre un effet de températures encore plus chaudes dans les villes, connu comme l'îlot de chaleur urbain (ICU). Les scientifiques s'accordent que ceci est dû à de nombreux facteurs comme la pollution de véhicules thermiques et d'autres sources, la consommation d'énergie et de l'électricité, mais aussi la forme et les caractéristiques des constructions urbaines comme les bâtiments et les surfaces minéralisées (ibid). Les conséquences sanitaires pour les populations urbaines sont potentiellement dramatiques avec des pics aigus de mortalité dont l'exemple le plus connu en France est la canicule de 2003. Ainsi, les ICUs sont un sujet de recherche de longue date afin de mieux développer la planification urbaine et des politiques publiques destinées à réduire l'impact néfaste sur les habitants des villes (Gautier, Christophe et Brédif, 2020, p.2).

Récemment en Europe, le projet Urclim a été commissionné pour regrouper des chercheurs et laboratoires de recherche autour d'un mariage d'études sur le climat urbain et la planification et adaptation des villes au réchauffement climatique. C'est dans ce contexte que ce stage et ses ont été créés, se concentrant sur l'analyse de l'environnement urbain et son climat particulier. Ce stage a pour objectif d'étudier et analyser la morphologie urbaine (les bâtiments, la forme et dimensions du tissu urbain, les surfaces minéralisées et l'occupation du sol) et évaluer son impact sur le climat de ce tissu. D'une part, ceci nécessite les mesures formelles de cette morphologie et de les intégrer comme champs scalaires dans différentes analyses : ces mesures seront désormais appelées des indicateurs morphologiques. D'autre part, il y a un besoin de co-visualiser ces indicateurs dans un seul rendu synthétique, destiné d'être mis à disposition des météorologues, des urbanistes et d'autres membres de la communauté scientifique concernés par la ville et son climat. Ce mémoire va présenter des analyses de statistique de la morphologie urbaine et du climat, et, ensuite, proposer un rendu résultant de ces analyses en 2D ou 3D qui pourrait être exploité par d'autres chercheurs dans le contexte du projet Urclim.

Au départ, nous nous positionnons sur une hypothèse centrale : que la morphologie urbaine a un impact sur le climat en ville et que cet impact peut être mesurée. Nous proposons d'étudier cette hypothèse via une étude sur la ville de Paris grâce à des données numériques qui seront utilisées pour réaliser trois analyses de statistique : une de l'auto-corrélation spatiale de nos indicateurs, une régression linéaire entre la température simulée et nos indicateurs, et, enfin, une analyse « GWR » ou une régression géographiquement pondérée. La prochaine étape sera de faire une sélection d'un ou plusieurs de ces indicateurs afin de les intégrer dans une co-visualisation de Paris et son climat. Nous espérons que cette co-visualisation sera utile pour la communauté scientifique dans l'analyse du climat et de la morphologie, et l'adaptation des villes au changement climatique.

Ce stage a eu lieu au laboratoire de recherche LASTIG à l'IGN à Saint-Mandé, qui sera introduit et décrit dans la prochaine section de ce mémoire.

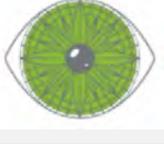
### 1.2. Présentation du laboratoire LASTIG à l'IGN

Le Laboratoire en sciences de l'information géographique pour la ville intelligente et les territoires durables (LASTIG) est un laboratoire de recherche basé à l'Institut national de

---

<sup>1</sup> Accessible à <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (dernier accès : 5/09/2020).

l'information géographique et forestière (IGN) à Saint-Mandé (94), à côté du 12<sup>ème</sup> arrondissement de Paris. Il est composé de quatre équipes de recherches :

	<p><b>ACTE</b></p> <p>Acquisition et traitements</p>
	<p><b>MEIG</b></p> <p>Médiation et enrichissement de l'information géographique</p>
	<p><b>STRUDEL</b></p> <p>Structures spatio-temporelles pour l'analyse des territoires</p>
	<p><b>GEOVIS</b></p> <p>Géovisualisation, interaction et immersion</p>

*Figure 1 : Logos des équipes de recherche au LASTIG.*

Ce stage est aussi un partenariat entre les équipes de STRUDEL et de GEOVIS, car il y a, d'une part, un besoin de l'analyse spatiale, et, d'autre part, cette analyse doit être visualiser afin que ses résultats et d'autres caractéristiques clés soient présentés au plus clair que possible.

STRUDEL est représenté par Paul Chapron, l'encadrant principal de ce stage, et GEOVIS par Sidonie Christophe et Jacques Gautier. Les travaux de ces stages ont été très souvent inspirés par les discussions lors des réunions et échanges de mail. Pour cette raison, le pronom « nous » est employé comme le sujet des phrases tout au long de ce mémoire, car, même si moi, Luke Riley, est le rédacteur de ce mémoire, les travaux que j'ai exécutés ne seraient pas possible sans l'encadrement et conseils de ces trois maîtres de stage regroupant deux domaines de recherche différents en sciences de géographie.

### 1.3. Diagramme de Gantt recensant le calendrier du stage

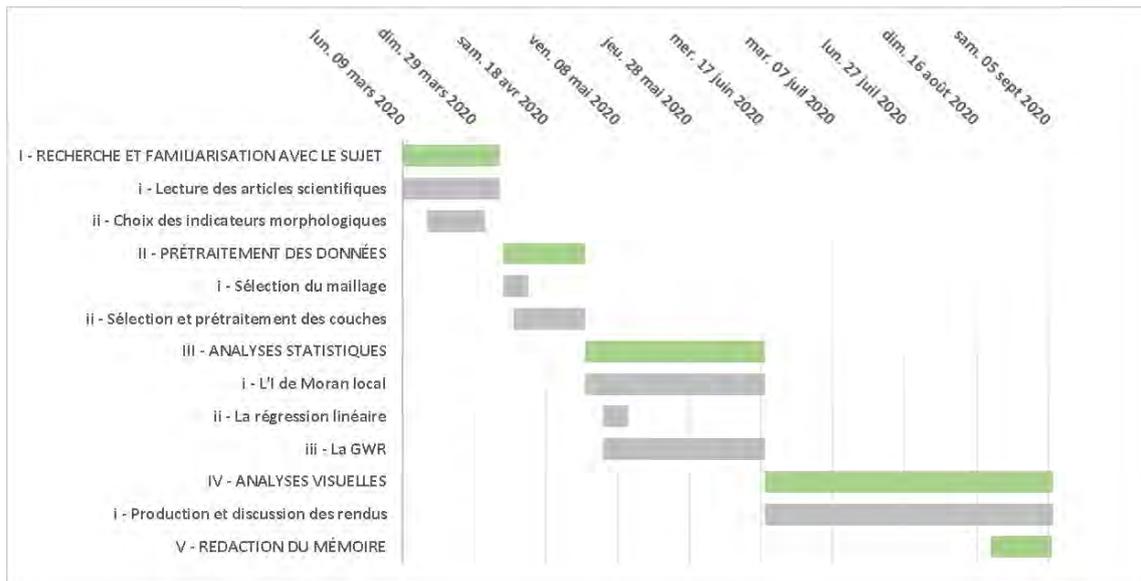


Figure 2 : Diagramme de Gantt

### 1.4. Contexte et l'état de l'art de la recherche sur les îlots de chaleur urbains (ICUs)

#### 1.4.1. Présentation du projet URCLIM

Le projet URCLIM (Advance on Urban Climate Services) fait partie de ERA4CS (European Research Area for Climate Services), qui est un ERA-NET (European Research Area Network) programme initié par JPI Climate (The Joint Programming Initiative Connecting Climate Knowledge for Europe) avec un co-financement de l'Union Européenne<sup>23</sup>. L'objectif du projet est la réalisation de divers services autour du climat urbain : Urban Climate Services (UCS)<sup>4</sup> destinés d'être mis à disposition des urbanistes et d'autres acteurs concernés par la conception de l'environnement urbain dans le contexte de l'adaptation de la ville au réchauffement climatique global. Les UCS sont destinés à communiquer des connaissances et/ou données sur le thème du climat urbain scientifiquement solides, de manière compréhensible et claire. L'équipe est composée de sept partenaires européens, dont l'IGN, et coordonnée par Météo France<sup>5</sup>.

En ce qui concerne le rôle de l'IGN dans cet ensemble, son objectif, résumé, est de produire des données topographiques fines et des rendus visuels du climat urbain. Ces visuels ont pour objectif de co-visualiser les données de température issues de Météo France et des données décrivant le tissu urbain à partir de données certifiées venant de l'IGN, mais aussi de données participatives et en libre-accès comme celles d'Open Street Map. Ces rendus et les

<sup>2</sup> <http://www.urclim.eu> (dernier accès : 17/08/20).

<sup>3</sup> Les financements et les nomenclatures des projets européens sont assez complexes, et pour bien comprendre les organisations, leurs rôles ainsi que leurs moyens de financement, le lecteur est invité à consulter les sites web respectifs de chaque organisation : URCLIM (<http://urclim.prod.lamp.cnrs.fr/>) ; JPI Climate (« The Joint Programming Initiative Connecting Climate Knowledge for Europe » à <http://www.jpi-climate.eu/home>) ; ERA-NET (European Research Area Network à <http://www.france-europe-innovation.fr/era-net.php>) ; et ERA4CS (un consortium qui fait partie de l'ERA-NET à <http://www.jpi-climate.eu/aboutERA4CS>).

<sup>4</sup> « integrated Urban Climate Services » <http://urclim.prod.lamp.cnrs.fr/about/>.

<sup>5</sup> Les autres acteurs sont le CNRS en France, le RMI (*The Royal Meteorological Institute of Belgium*), le KNMI (*The Royal Netherlands Meteorological Institute*), Meteo-Ro (Meteo Romania) et le FMI (Finnish Meteorological Institute). <http://urclim.prod.lamp.cnrs.fr/the-team/> (dernier accès : 17/08/20).

méthodes pour les obtenir ont vocation à être mis à disposition des scientifiques et chercheurs afin qu'ils puissent visualiser les résultats de leurs travaux.

Parmi les objets et phénomènes climatiques à l'étude dans ces projets, nous nous intéressons plus particulièrement à un phénomène qui repose sur les propriétés du tissu urbain et leur influence sur la température : les îlots de chaleur urbains.

#### 1.4.2. Les îlots de chaleur urbains (ICU)

Selon l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR) :

*« Le terme d'îlots de chaleur urbain (ICU) est employé pour décrire la spécificité climatique des villes par rapport aux zones rurales ou péri-urbaines avoisinantes. Les Villes de par leur caractère totalement artificiel sont le lieu de phénomènes de surchauffes notables qui peuvent s'avérer problématiques lorsque surviennent des épisodes caniculaires, c'est le caractère « amplificateur » de la ville qui rendra ces épisodes plus difficilement supportables et qui pose des questions sanitaires qui appellent des mesures d'adaptation du territoire. »*  
(Bigorgne et al., 2012, p.5)

Les conséquences d'une période caniculaire peuvent être catastrophique pour une ville et ses habitants, comme le montre l'exemple de 2003 qui a tué 15 000 personnes en France (Herzberg, 2019). Ainsi, la définition de canicule repose non seulement sur la notion d'une période de chaleur très intense (pendant typiquement au moins trois jours), mais également sur les conséquences nocives sur le confort et la santé des personnes vivant en ville (e.g. leur température corporelle)<sup>6</sup>. La canicule se remarque plus la nuit que le jour, où les écarts de température entre les zones urbaines et rurales deviennent très importants, comme la nuit du 18 août 2012 quand une différence de 8,4°C a été mesurée entre le centre de Paris et la station météo à Melun en Seine-et-Marne (77) à 1h du matin (Bigorgne et al., p.7). La température peut aussi varier énormément dans la ville même, comme l'écart de 5°C (de 26,5°C à 21,5°C) mesuré entre la Gare de l'Est et le Parc des Buttes-Chaumont à Paris le 1<sup>er</sup> août 2011 vers 22h (ibid, p.15). La morphologie de la ville, autrement dit la disposition et les dimensions des bâtiments, des espaces ouverts, des surfaces minéralisées ou non, est un des facteurs qui participe à la formation des ICUs<sup>7</sup>. Ainsi, il est pertinent d'identifier, par analyse de ces propriétés morphologiques, si certaines zones urbaines particulièrement à risque pour leurs habitants pendant un épisode caniculaire. D'où, le besoin de cartographie de montrer clairement les zones à risque et de trouver des indicateurs morphologiques de mesure qui rendent compte de « caractère amplificateur » de la ville.

Une période caniculaire est souvent le moment où le grand public et la presse s'intéressent aux ICUs à cause de graves conséquences sanitaires déjà mentionnées, mais il est important à préciser que ces ICUs sont présents toute l'année. La canicule est souvent le moment où leur effet est exacerbé. L'objectif principal de cette étude est d'examiner au lien

---

<sup>6</sup> La définition de canicule varie d'une ville à l'autre en France. A Paris, une journée caniculaire est quand la température diurne sous abris dépasse 31°C et 21°C en nocturne (<https://www.paris.fr/pages/la-canicule-5469/>, dernier accès : 17/08/20). En revanche, les seuils sont de 35°C le jour et 24°C la nuit à Marseille. ([https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/06/21/a-quelles-temperatures-peut-on-parler-de-canicule\\_5479799\\_4355770.html](https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/06/21/a-quelles-temperatures-peut-on-parler-de-canicule_5479799_4355770.html), dernier accès : 17/08/20).

<sup>7</sup> (Beiser, 2019) <https://time.com/5655074/concrete-urban-heat/> (dernier accès : 30/08/2020), (Galindo, 2020) <https://www.wmcactionnews5.com/2020/08/28/breakdown-urban-heat-island-effect-why-its-hotter-city/> (dernier accès : 30/08/2020). Ces articles de presse ne sont pas de publications officiellement scientifiques, mais ils montrent comment le phénomène des ICUs est connu au grand public. Cette connaissance populaire est décrite plus formellement par Bigorgne et al. « tout aménagement urbain a pour corollaire direct une modification locale du climat » (Bigorgne et al., 2012, p.3).

entre l'occupation du sol, la morphologie de la ville et le climat urbain, afin d'exposer des causes possibles des ICUs.

### 1.4.3. Courte revue de la littérature scientifique sur la recherche et l'analyse et exploration des ICUs

Le phénomène des ICUs est le sujet de nombreuses études et modélisations numériques appelées modèles de canopée urbaines (UCM) selon Masson et al<sup>8</sup>. Ces UCMs sont des schémas surfaciques d'une ville divisés selon une grille ou un maillage spécifique. Le plus connu est celui de Stewart et Oke qui ont rassemblé un certain nombre de paramètres et de mesures pour catégoriser le tissu urbain de manière générale selon une classification appelée « Local Climate Zones (LCZ) » ou zones de climat local en français (Stewart and Oke, 2012). Les auteurs stipulent clairement,

*« Le système des LCZs est fondamentalement générique et ne peut pas capturer les particularités de chaque site qu'il soit urbain ou rural. Sa vue de l'univers de paysages est extrêmement réductionniste, et, comme toute système de classification, ses capacités descriptives et explicatives sont limitées. »* (ibid, p. 1888)<sup>9</sup>

La LCZ ne peut pas donc représenter la ville à une échelle très fine, l'expressivité du système est limitée, surtout au niveau micro-échelle (un étendu de 2km ou moins selon *The American Meteorological Society*<sup>10</sup>. En revanche, à méso échelle au-delà de 2km et jusqu'à quelques centaines de km horizontalement)<sup>11</sup>, elle devient plus intéressante si l'on veut comparer et modéliser la ville avec des données de température pour voir si le tissu dominant d'une zone coïncide avec une température plus élevée ou basse que la moyenne d'une ville entière. Pour cette raison, la classification LCZ facilite les études numériques du climat urbain et est devenue un standard dans la littérature scientifique sur les ICUs, ce qui a mené à l'initiative du World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT<sup>12</sup>), une plateforme collaborative de données cartographiques des grandes villes mondiales décomposées en LCZs en libre accès. Cette plateforme permet aux utilisateurs de télécharger des données sur certaines villes afin de les exploiter pour la réalisation d'études ou pour leur usage personnel.

---

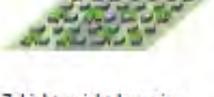
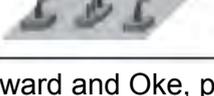
<sup>8</sup> p. 2, Masson et al. "City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges" in Urban Climate 31 (2020).

<sup>9</sup> Dans l'anglais original : *The LCZ system is inherently generic and cannot capture the peculiarities of every urban and rural site. Its view of the landscape universe is highly reductionist, and, like all classifications, its descriptive and explanatory powers are limited.*

<sup>10</sup> <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Microscale> (dernier accès : 03/09/2020). Cette définition vient des citations de : Emanuel, K. A. 1986. Overview and definition of mesoscale meteorology. Mesoscale Meteorology and Forecasting. P. Ray, Ed., *Amer. Meteor. Soc.*, . P. 13. ; et Orlanski, I. 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*. 56. 527–530.

<sup>11</sup> <http://www.meteofrance.fr/publications/glossaire?articleId=150510> (dernier accès : 3/09/2020). Orlanski définit la méso-échelle par trois sous-classes : méso-alpha (200-2000 km), méso-beta (20-200 km) et méso-gamma (2-20 km) (Orlanski, 1975). Si l'on prend soit la définition de Météo France, soit la définition d'Orlanski, notre zone d'étude se situe vers la mesure la plus basse de méso-échelle ou méso-Gamma.

<sup>12</sup> <http://www.wudapt.org/> (dernier accès : 17/08/20).

Built types	Definition	Land cover types	Definition
 <p>1. Compact high-rise</p>	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>A. Dense trees</p>	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>2. Compact midrise</p>	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>B. Scattered trees</p>	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>3. Compact low-rise</p>	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>C. Bush, scrub</p>	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
 <p>4. Open high-rise</p>	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>D. Low plants</p>	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
 <p>5. Open midrise</p>	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>E. Bare rock or paved</p>	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
 <p>6. Open low-rise</p>	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	 <p>F. Bare soil or sand</p>	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
 <p>7. Lightweight low-rise</p>	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	 <p>G. Water</p>	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
 <p>8. Large low-rise</p>	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	<b>VARIABLE LAND COVER PROPERTIES</b>	
 <p>9. Sparsely built</p>	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	Variable or ephemeral land cover properties that change significantly with synoptic weather patterns, agricultural practices, and/or seasonal cycles.	
 <p>10. Heavy industry</p>	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	<p>b. bare trees</p> <p>s. snow cover</p> <p>d. dry ground</p> <p>w. wet ground</p>	<p>Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.</p> <p>Snow cover &gt;10 cm in depth. Low admittance. High albedo.</p> <p>Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.</p> <p>Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.</p>

(Steward and Oke, p.1885)

Figure 3 : Aperçu de la classification générale des LCZs.

Un projet plus récent intitulé MApUCE<sup>13</sup> a réussi à produire un UCM au moyen d'un traitement automatisé et reproductible. Les créateurs de l'UCM de MApUCE ont utilisé le travail de Berghauser-Pont et Haupt afin de trouver des échelles de base pour construire le maillage<sup>14</sup>(Berghauser-Pont et Haupt, 2005), comme par exemple le plan cadastral, les espaces publics, les parcs, le réseau viaire et les cours d'eau (Bocher et al., 2018, p.5). L'entité élémentaire est nommée l'Unité de Référence Spatiale (USR) ou Reference Spatial Unit (RSU) en anglais. Une classification de ces USRs est aussi proposée qui s'inspire de celle des LCZs. (ibid, pp5-8).

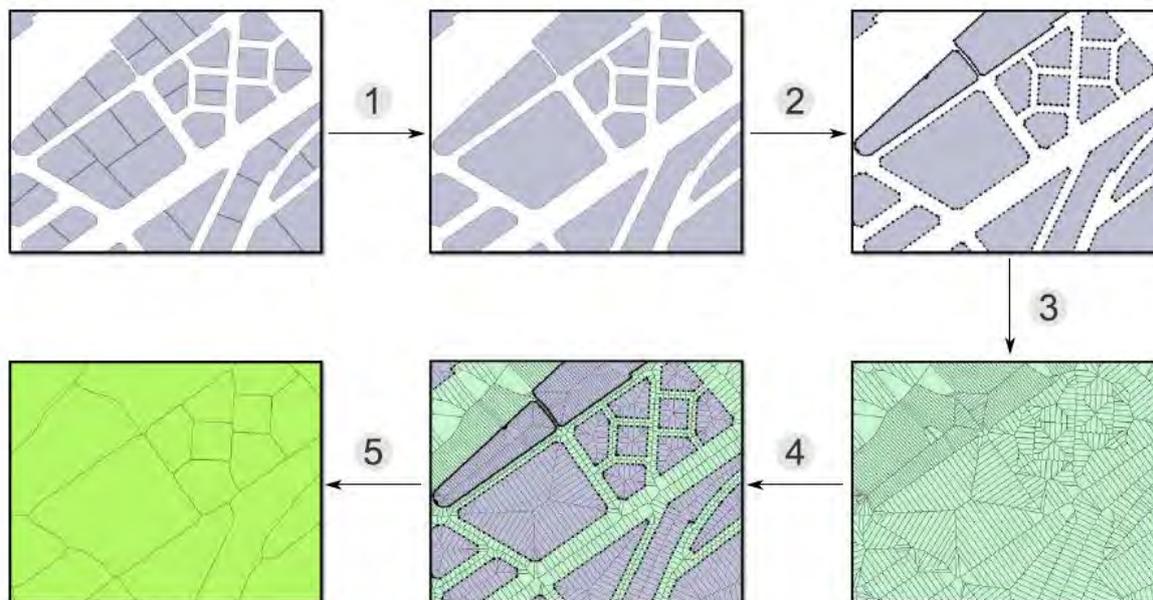


Figure 2: The RSU generation process (adapted from [Plumejeaud-Perreau et al. \[23\]](#))

**Figure 4 : Le processus de génération des USRs de MApUCE**

(ibid, p.8)<sup>15</sup>

<sup>13</sup> Une description plus détaillée du projet est disponible en ligne à <https://www.umr-cnrm.fr/ville.climat/spip.php?rubrique120> (dernier accès : 17/08/20). Le sigle MApUCE est le raccourci de « Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme ».

<sup>14</sup> Les cinq échelles proposées sont le bâtiment, le lot, l'îlot, le tissu urbain et le district.

<sup>15</sup> Le citation de l'article par Bocher et al. : C. Plumejeaud-Perreau, C. Poitevin, C. Pignon-Mussaïd, N. Long, Building Local Climate Zones by using socio-economic and topographic vectorial databases, in: 9th International Conference on Urban Climate(ICUC9), Météo-France, Toulouse, France.

data set	Description
BD Topo®	Topographic data, in vector format, provided by the French National Geographical Institute (IGN) (see <a href="http://professionnels.ign.fr/bdtopo">http://professionnels.ign.fr/bdtopo</a> ). The data are classified in ten topics. Each topic contains a set of layers distributed in a GIS file format. <i>e.g</i> "BUILDING" theme includes undefined, industrial or remarkable building layers, ...
Parcels	Cadastral parcels, in vector format, provided by IGN (see <a href="http://professionnels.ign.fr/bdparcellaire">http://professionnels.ign.fr/bdparcellaire</a> )
Gridded population	This data set depicts the distribution of human population across the french territory. The data is distributed by the French National Institute for Statistics and Economic Studies (INSEE) (see <a href="https://www.insee.fr/en/accueil">https://www.insee.fr/en/accueil</a> )
IRIS contouring	The IRIS contouring contains a set of polygons that represents an area of 2,000 grouping inhabitants. The median area is about 740 ha, and maximal size is of 36,700 ha. This data set is provided by IGN.

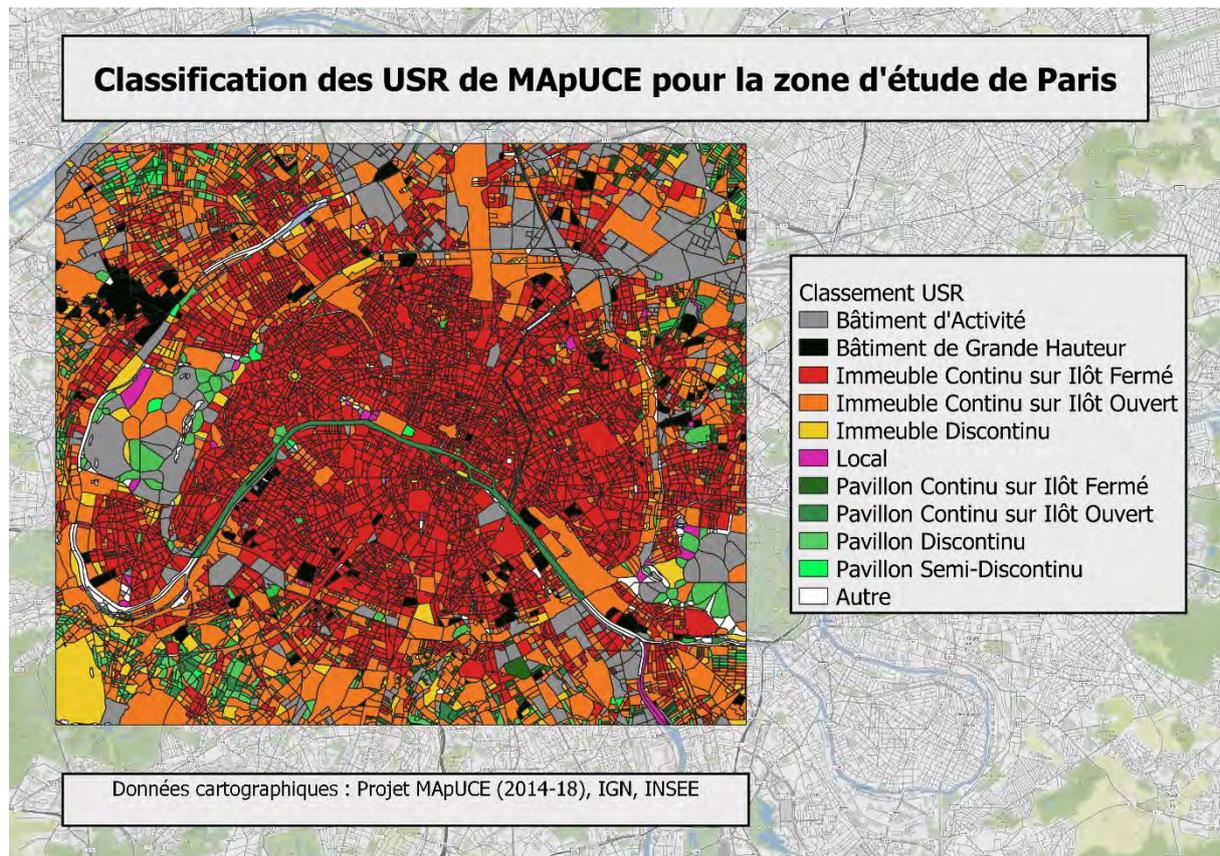
Table 1: Input spatial data sets used by the MApUCE tool chain

data set	Description
Households survey	The french households survey is provided by the National Institute of Statistics and Economics and Studies (INSEE). This survey is linked to the IRIS contouring thanks to a key index.

Table 2: Input statistical data set used by MApUCE tool chain

**Tableau 1 : Les jeux de données employés par le projet MApUCE.**

(ibid, p.6)



**Figure 5 : Le maillage MApUCE de Paris avec sa classification des USRs.**

(ibid, pp17-19)

#### 1.4.4. La problématique du stage

L'objectif de mon stage est, pour une zone d'étude urbaine, d'accommoder le point de vue morphologique avec celui du climat ? Nous avons donc besoin d'identifier le « caractère amplificateur » ou plusieurs s'ils existent de la morphologie urbaine. Il faut pouvoir comparer ces deux recueils d'information, et mettre en avant leurs similarités et différences. On se pose également la question de la réconciliation ces informations dans un seul rendu. Quelles sont les possibilités et les limites de co-visibilité pour exprimer les caractères amplificateurs des ICUs sans alourdir la visualisation de bruits ? Quelles sont les limites de communiquer un maximum d'informations pertinentes et de les présenter de manière claire, cohérente et interprétable ?

Ce stage s'intéresse au lien susceptible d'exister entre le climat urbain d'une ville et sa morphologie au moyen de méthodes de statistique spatiale et d'analyse visuelle. Si l'on peut identifier des zones où la corrélation entre la température et la morphologie est avérée, ceci représenterait un point d'intérêt pour des urbanistes et des acteurs de la planification urbaine, l'adaptation et la modification de la ville afin d'en tenir compte pour protéger ses habitants et d'améliorer leur confort pendant les canicules estivales qui vont augmenter dans leur durée et leur intensité avec le réchauffement climatique (Harvey, 2019)<sup>16</sup>.

A ce stade, il est impératif de préciser que cette étude cherche à savoir si une corrélation existe entre la température et la morphologie urbaine, à aucun moment doit le lecteur confondre le mot « corrélation » avec « cause » ou « causalité ». Ceci n'empêche pas

<sup>16</sup> <https://www.scientificamerican.com/article/urban-heat-islands-mean-warming-will-be-worse-in-cities/> (dernier accès : 24/08/2020).

que cette étude pourrait être utile comme un guide pour des chercheurs qui mènent des études physiques sur les microclimats urbains, mais elle ne cherche pas à trouver la cause physique de ce phénomène, plutôt de travailler avec des données numériques qui sont basées sur des mesures de terrain et d'identifier celles qui sont liées avec les ICUs.

Plusieurs analyses statistiques seront réalisées pour examiner et décrire, à la fois, la composition de la morphologie urbaine, les informations climatiques, i.e. la température, et la relation entre ces indicateurs. Ceci nous permet d'investiguer des indicateurs individuellement dans un premier temps avec une étude d'autocorrélation spatiale, puis de les comparer avec une simple étude de régression linéaire, et, enfin, d'opérer une comparaison plus fine et rigoureuse grâce à une analyse de régression géographiquement pondérée (GWR) qui soulignera les différences, similarités et interactions entre la morphologie et le climat urbain. Nos analyses nous fourniront des mesures et métriques qui décriront cette relation.

Ensuite, nous nous interrogerons sur les données à choisir pour entamer et enrichir notre étude ? Nous commençons par présenter dans ce qui suit la zone d'étude, les données et indicateurs considérés.

## 1.5. Présentation de la zone d'étude, données et indicateurs morphologiques utilisés pendant l'étude

### 1.5.1. L'UCM, la zone d'étude et l'échelle d'analyse

Pour analyser notre terrain d'intérêt comprenant la municipalité de Paris et ses banlieues, nous avons pris la décision de se servir du maillage produit par le projet de MApUCE. En premier, le maillage est construit à partir des bâtiments, des îlots urbains, des lots et des espaces publics, ce qui constitue une bonne base pour analyser la morphologie urbaine car le maillage-même en est un modèle. Deuxièmement, un objectif du projet est d'étudier les îlots de chaleur urbain, donc le maillage mérite d'être testé afin de savoir si sa résolution et sa précision suffit à nous révéler des corrélations statistiques et spatiales entre la température et la morphologie de Paris.

### 1.5.2. Données

Nous disposons d'un jeu de données de bâtiments de la BD Topo® fourni par l'IGN qui possède des informations de hauteur de la géométrie de l'emprise au sol des bâtiments, et qui correspond aux normes européennes d'INSPIRE<sup>17</sup>. L'intérêt de ce choix est d'avoir des données standardisées pour que la méthodologie que nous allons présenter pourrait être reproduite et testée par la communauté scientifique. Afin d'identifier les zones de végétation et les surfaces imperméables présentes dans les parcs et les zones boisées Paris et ses proches banlieues, nous avons utilisé des jeux de données issues de Open Street Map, les mêmes employés par le *Geoclimate Chain*<sup>18</sup>.

---

<sup>17</sup> Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (the **INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) Directive**) [https://itlaw.wikia.org/wiki/INSPIRE\\_\(Infrastructure\\_for\\_Spatial\\_Information\\_in\\_Europe\)\\_Directive](https://itlaw.wikia.org/wiki/INSPIRE_(Infrastructure_for_Spatial_Information_in_Europe)_Directive) (dernier accès : 28/08/2020). Ce lien donne des informations clés et envoie l'utilisateur vers la documentation officielle (<https://inspire.ec.europa.eu/> (dernier accès : 28/08/2020)). Pour des informations en français, voir la page sur INSPIRE sur le site du CNIG à [http://cnig.gouv.fr/?page\\_id=1177](http://cnig.gouv.fr/?page_id=1177) (dernier accès : 28/08/2020).

<sup>18</sup> <https://github.com/orbisgis/geoclimate> (dernier accès : 28/08/2020). Le *Geoclimate Chain* est un github maintenu par des ingénieurs et chercheurs du laboratoire français Lab-STICC (CNRS UMR 6285 - DECIDE team - GIS group) qui produit des données en libre-accès pour les analyses du climat et morphologie urbaine.

NB : Dans les données attributaires « HAUTEUR » quelques bâtiments n'avaient aucune information. Nous avons attribué ces valeurs de hauteurs manquantes en affectant la moyenne des bâtiments voisins aux bâtiments en manque de ces données.

### 1.5.3. Critères de sélection des indicateurs morphologiques

Nous avons sélectionné certaines mesures morphologiques en prenant la littérature scientifique sur les LCZs comme un point de départ. Le travail de Rodler et Leduc (Rodler and Leduc, 2018) nous est particulièrement utile, et se base aussi sur l'étude séminale de Stewart et Oke (Stewart and Oke, 2012).

Comme déjà évoqué, l'échelle de la zone d'étude détermine le type de mesure, et donc le type d'indicateur morphologique possible à mettre en œuvre. Le travail de Rodler et Leduc se pose sur trois LCZs distincts dans deux villes : Nantes et New York. Cette approche a permis aux auteurs d'analyser ces zones au niveau des canyons urbains, autrement-dit, la largeur et la hauteur du canyon urbain, c'est-à-dire la hauteur des bâtiments de part et d'autre d'une rue, ainsi que la distance qui les sépare. Ils ont conduit cette analyse avec le placement stratégique des « sensors » (ou capteurs) afin de mesurer la distance entre les bâtiments dans un rayon de 360° (cf : Figure 4) (Rodler and Leduc, p. 5).

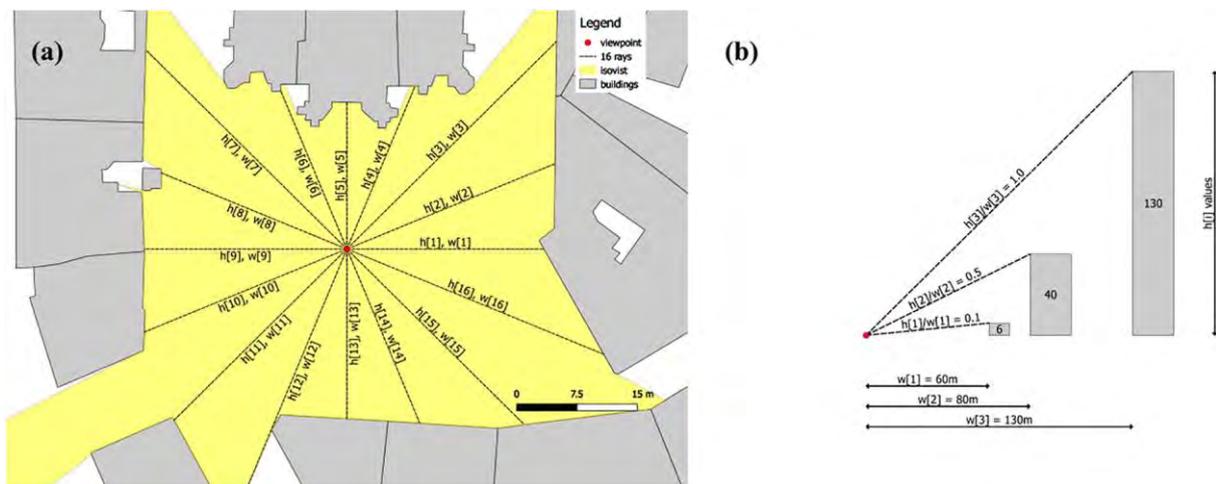


Figure 6 : Un exemple du placement d'un capteur au centre d'une place dans l'étude de Rodler et Leduc.

(ibid)

Le placement de ces capteurs permet de calculer deux indicateurs en particulier : le Sky View Factor (SVF) ou la vue du ciel depuis la terre, et l'aspect-ratio.

Le SVF est l'indicateur du pourcentage du ciel visible au sol qui n'est pas obturé (ibid, p.6). Évidemment ce pourcentage peut varier selon l'emplacement du capteur, un pourcentage de ciel plus important sera visible depuis le centre d'une grande place que dans une petite ruelle cernée de grands bâtiments. Il est mesuré par le positionnement d'un hémisphère autour du capteur (cf : Figure 5) qui permet de calculer un ratio de la proportion de ciel visible depuis ce point. Une valeur de SVF élevée avec une vue bien dégagée du ciel indique que la zone recevra une bonne quantité d'énergie solaire en journée, et que la zone se refroidira plus facilement la nuit, car il n'y a pas de grands bâtiments qui empêcheraient la chaleur de s'échapper dans l'espace. A l'inverse, un SVF faible se chauffera moins rapidement la journée, mais cette chaleur restera plus longtemps la nuit. Évidemment, la quantité de chaleur stockée la journée est aussi lié à la forme urbaine : les matériaux dont les bâtiments sont construits et la surface des rues et les trottoirs, donc le SVF seul ne peut pas nous dire pourquoi un îlot de chaleur urbain sera plus important dans un endroit et non un autre, mais ces mesures peuvent

attirer l'attention sur certaines zones afin de les étudier avec plus de précision (Bigorgne et al., p. 21).

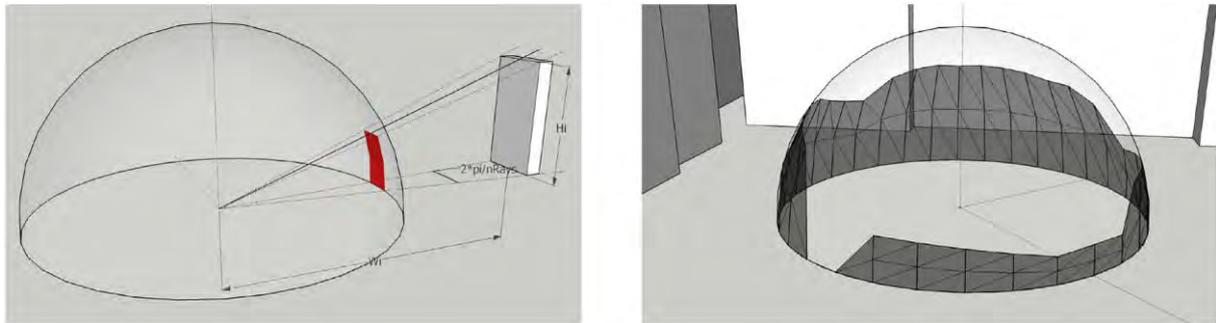


Figure 7 : un exemple du placement d'un capteur au centre d'une place dans l'étude de Rodler et Leduc.

(ibid)

Figure 26 – Le « facteur de vue du ciel » (SVF) est un indicateur qui permet d'évaluer la facilité avec laquelle se produit le refroidissement nocturne par échange radiatif avec le ciel. En zone rurale ce refroidissement est maximum (SVF = 1), en ville il est contraint pas la présence des bâtiments (SVF < 1).

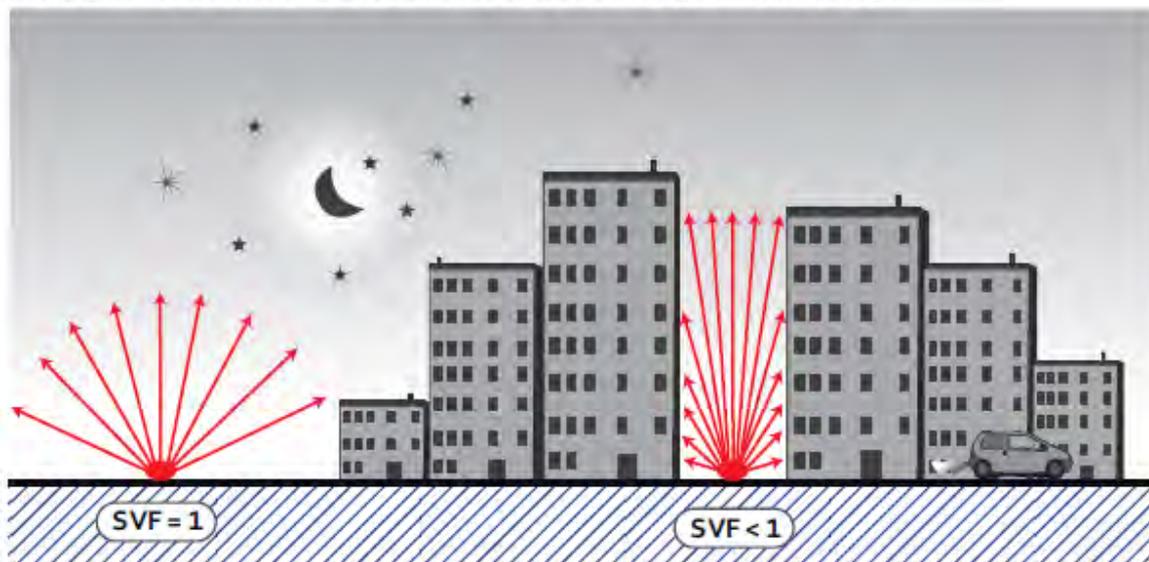


Figure 8 : Une illustration de comment les bâtiments empêchent l'énergie solaire de repartir dans l'espace la nuit.

(ibid)

L'*aspect ratio* est un indicateur, similaire au SVF, qui mesure les canyons urbains. La valeur de cette mesure, peut être simplifiée de manière très basique comme la hauteur moyenne divisée par la largeur du canyon (Rodler and Leduc, p. 7)<sup>19</sup>.

Malgré la pertinence de ces deux indicateurs, nous avons décidé de ne pas les implémenter pour notre analyse. La raison est simplement parce que Rodler et Leduc travaille à micro-échelle sur des LCZs de moins de 2km de longueur, alors que nous travaillons sur

<sup>19</sup> La méthode de Rodler et Leduc est plus complexe et raffinée que cette simple définition, et consiste à compter le nombre de rayons en 360° quand le capteur est positionné dans une place pp7-8.

une zone à méso-échelle qui s'étend à plus que 14km de longueur. En principe, c'est possible de placer les capteurs entre les bâtiments, mais il y a deux désavantages considérables à appliquer une telle méthode à l'échelle de Paris.

1) Le jeu de données des bâtiments est trop vaste pour placer les capteurs et réaliser les calculs nécessaires en un temps raisonnable. Le placement des capteurs serait peut-être automatisable mais la recherche requise pour trouver et adapter un algorithme performant serait un travail à part entière de celui du stage, et, donc, impossible dans une contrainte de la durée de stage d'uniquement six mois.

2) Nous recherchons des tendances à une échelle vaste (l'agglomération de Paris intramuros et un peu de ses banlieues), que ce que ces mesures permettent de caractériser. Cependant, le travail qu'on réalise à méso-échelle pourrait dénicher certaines petites zones qui mériteraient d'être isolées et analysées avec des approches adaptées à une micro-échelle.

#### 1.5.4. La « Building Surface Fraction » (BSF)

Cet indicateur, aussi employé par Rodler et Leduc, est une simple mesure surfacique sans dimensions de l'emprise bâtiment d'une surface (ibid, p.8). Il est calculé en divisant l'emprise totale des bâtiments d'une zone donnée par la surface totale de cette zone. Il est facilement calculable pour des zones de toutes dimensions, donc nous l'avons choisi. Pour notre étude, nous calculons la fraction pour chaque USR dans le maillage.

$$\text{BSF} = \text{somme des aires d'emprise bâti} / \text{aire d'USR}$$

#### 1.5.5. La « Impervious Surface Fraction » (ISF)

Très similaire à la BSF, l'ISF est calculé à partir de la couche des routes, et des surfaces imperméables issues d'Open Street Map et du Geoclimate Chain. Pour calculer de façon approchée l'aire des routes, il est nécessaire de prendre l'attribut « width » ou largeur, calculer la longueur afin de réaliser le calcul : largeur \* longueur, puis diviser l'aire par la surface totale de l'USR.

$$\text{ISF} = \text{somme des aires des surfaces minéralisées} / \text{aire d'USR}$$

#### 1.5.6. La « Pervious Surface Fraction » (PSF)

Cette fraction est calculée en agrégeant les espaces verts publics présents dans certaines couches de végétation d'Open Street Map. Un processus de nettoyage était obligatoire, car certains polygones se superposent dans ces couches, ce qui veut dire qu'on peut obtenir, en les agrégeant, des aires de végétation plus grandes que la surface totale de l'USR.<sup>20</sup>

La PSF a été détaillée par Rodler et Leduc, mais pas employé du fait qu'ils n'avaient pas accès aux données des jardins privés de leurs LCZs. C'est également le cas ici. Nous avons décidé de l'employer, car notre zone d'étude comprend un bon nombre d'espaces verts publics et deux grandes zones boisées : le Bois de Boulogne et le Bois de Vincennes dont nous espérons qu'ils pèsent dans la balance et aient un effet visible sur la température aux alentours.

$$\text{PSF} = \text{somme des aires des surfaces de végétation} / \text{aire d'USR}$$

---

<sup>20</sup> Pour une explication plus complète, voir l'organigramme de flux en Annexe-I

### 1.5.7. La « Height of Roughness Elements » (HRE)

Cet indicateur peut être défini comme une mesure de la rugosité généralisée de la canopée urbaine ou sa hauteur moyenne. Nous l'avons calculée pour chaque USR par la somme des surfaces des emprises des bâtiments multipliés par la hauteur moyenne des bâtiments dans l'USR et divisée par la surface totale de l'USR.

$$\text{HRE} = \text{somme des aires d'emprise bâti} * \text{hauteur moyenne des bâti} / \text{aire d'USR}$$

### 1.5.8. Les indicateurs présents dans la couche de MApUCE

Le projet MApUCE a produit de nombreux indicateurs et analyses statistiques dont des résultats se trouvent dans les données attributaires des couches spatiales résultats. Nous avons décidé de ne pas les employer dans notre étude, parce que ces données sont issues des jeux de données plus anciens que les nôtres (Petit et Bocher, 2019, p.9)<sup>21</sup>, et que l'on préfère que les résultats communiqués par nos indicateurs soient calculés sur des données les plus récentes possible. Néanmoins, il faut préciser que les données de MApUCE sont censées d'être mises à jour régulièrement, donc ses données attributaires vont certainement évoluer.

### 1.5.9. Une note sur l'albédo et son importance dans l'analyse des ICUs

L'albédo est la part de l'énergie solaire réfléchiée dans l'espace, il est mesuré sur une échelle de 0 à 1, 0 étant une surface qui absorbe totalement les rayons solaires et 1, souvent une surface de teinte blanche ou de couleur très pâle, indiquant la réflexion totale de ces rayons. Cette mesure est très significative dans le contexte des ICUs, car elle indique la capacité d'inertie thermique des surfaces de couleur foncée qui vont se réchauffer plus vite que celles de couleur claire. La difficulté pour une étude comme la nôtre est de le mesurer à l'échelle d'une grande ville comme Paris ; un défi considérable, et même à l'échelle d'une USR car les toits des bâtiments pourraient avoir des variations remarquables en albédo. La classification des LCZs par Stewart et Oke propose une mesure générique de l'albédo selon la surface généralisée, et Barnabé et al. ont proposé une méthode simple de mesurer l'albédo par bloc urbain (Barnabé et al., 2015), également Rodler et Leduc soulignent son importance sans avoir proposé une méthode de l'évaluer au niveau d'un district (Rodler and Leduc, p.19). Nous n'avons pas trouvé de méthode adaptée à son implémentation, il faut aussi préciser que MApUCE propose une classification similaire à celle des LCZs de Stewart et Oke, mais pas de mesures précises de l'albédo par USR. L'albédo devrait être inclus en principe dans plus d'études sur les ICUs, néanmoins, le mesurer précisément pour un tissu urbain composé de différentes surfaces reste assez difficile.

On va maintenant aborder les données auxquelles il s'agira de confronter ces mesures : la température.

## 1.6. Présentation des données de température : le modèle de simulation MesoNH de Météo-France

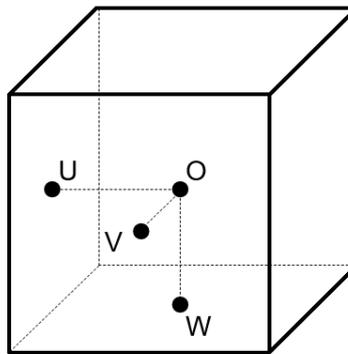
Le « *Mesoscale non-hydrostatic model* » (Meso-NH) est un modèle météorologique de recherche à méso-échelle développé initialement par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM – CNRS/Météo-France) et le Laboratoire d'Aérodynamique (LA – UPS/CNRS). (Lac et al., 2018, pp3-4). Le modèle fournit des données simulées de température mesurée en kelvins, de vents, de pression dans l'atmosphère jusqu'à 15000

---

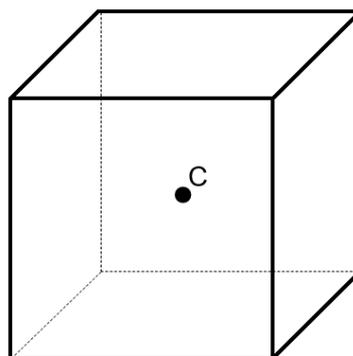
<sup>21</sup> Les données de BD Topo® datent de 2014, BD Parcellaire (IGN 2014), les contours IRIS (2011), les données carroyée à 200m de l'INSEE de 2010 et le recensement de la population de 2011.

mètres d'altitude, basées sur différents indicateurs comme la hauteur de bâtiment, l'albédo, la densité de végétation, etc ...). Ces données sont présentées sous la forme d'une grille 3D irrégulière de points O (point de masse, pour lequel sont simulées une température, une pression etc ...), et des points U, V, W (points pour lesquels sont simulés un vecteur vent). Chaque quadruplet forme une cellule dont est assemblé un « parallélépipède » que on va appeler un cube dans le but de simplification (cf : Figure 7) dont l'arête mesure 650m au niveau du sol et la hauteur entre 60m et 350m : la hauteur des cubes varie suivant l'altitude de ces cubes. Le modèle Meso-NH est fourni dans le format des fichiers NetCDF, dont un fichier CSV a été extrait afin de faciliter les opérations nécessaires de nos analyses.

Il existe beaucoup de types de données différentes dans un modèle Meso-NH qui simulent la température dans les zones urbaines, rurales, maritimes etc ... Ce qui nous intéresse est le *Town Energy Balance* (TEB) (Masson, 2000). Les données TEB sont en fait une extension du modèle Meso-NH pour l'environnement urbain, et permet de simuler des températures et des vitesses de vent à l'échelle du bloc urbain avec la même résolution horizontale des cellules Meso-NH, et une résolution verticale entre 1m et 30m. Il existe 6 niveaux de TEB dont celui qui nous intéresse, le TEB\_T1, qui fournit des données de température à 0,5m au-dessus du sol.



**Figure 9 :** Une illustration d'un cube Meso-NH qui est formé par 4 points. O représente la simulation des données de température et de pression atmosphérique. U pour la vitesse du vent en direction UO, V pour la vitesse du vent en direction VO, et W pour la vitesse de vent en direction WO.

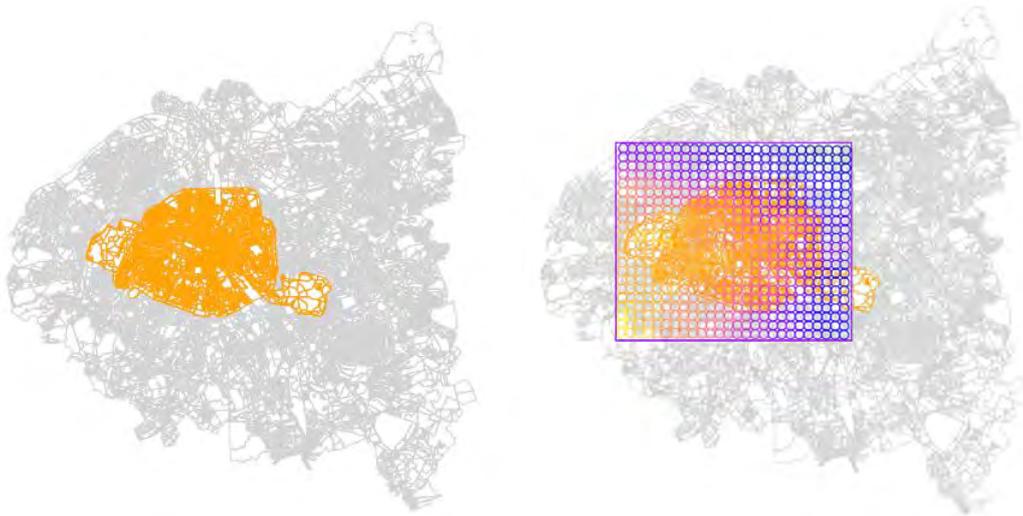


**Figure 10 :** Une illustration d'un cube TEB. Pour le centre, C, les données de température, de pression atmosphérique et du vent en toutes directions sont simulées.

Nos données de TEB\_T1 correspondent à une date et une heure précise, le 10 août, 2003 à 6h, ce qui place notre étude dans un contexte d'une canicule extrême.

### 1.6.1. Délimitation de la zone d'étude et l'intégration des données Meso-NH

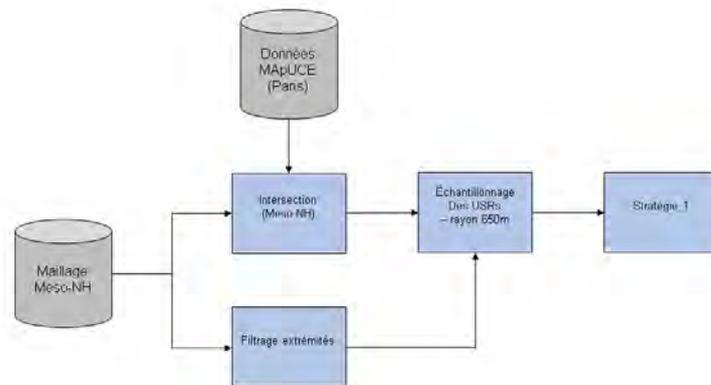
Les limites spatiales de notre zone d'étude sont celles définies par la zone pour laquelle les résultats du modèle Meso-NH ont été produits. Cette étape est réalisée par une intersection entre le maillage Meso-NH et celui de MApUCE (cf : Figure 11).



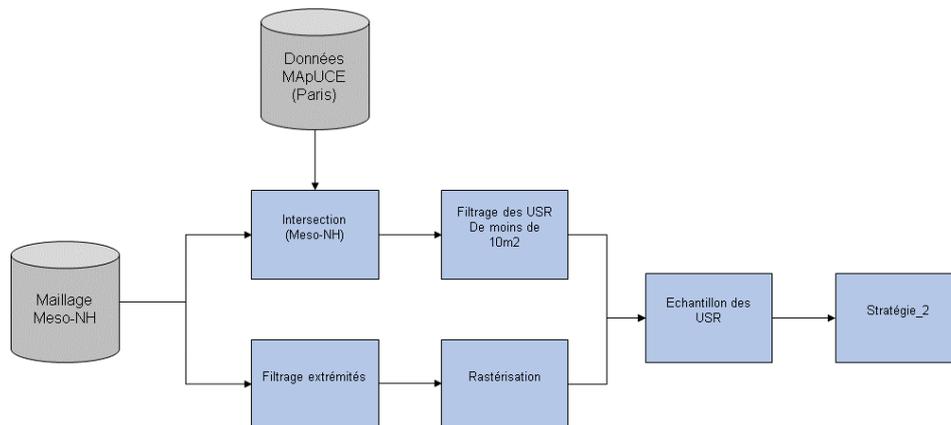
**Figure 11 : A gauche, Paris (75) en jaune superposée sur les départements de l'Île de France qui l'entourent (92, 93, 94). A droite, la grille de Meso-NH placée par-dessus Paris et quelques USRs des départements qui l'entourent.**

Ensuite, les données de TEB sont intégrées dans le maillage de MApUCE afin de faciliter les analyses statistiques. Les mailles aux extrémités portent les valeurs de 999 kelvins qui ne conforment pas à la réalité du terrain, et sont, par conséquent, filtrées.

Pour intégrer les TEB dans la couche de MApUCE, deux stratégies d'échantillonnage ont été employées. La première consistait à échantillonner les valeurs de TEB dans les USR de MApUCE dans un rayon de 650m, la même largeur que les mailles de Meso-NH. La deuxième a rastérisé les valeurs de TEB afin de les échantillonner dans les mailles de MApUCE. Certaines USR comprennent des aires de petite surface de moins de 10m<sup>2</sup>, ces très petites USRs ont été filtrée pour la deuxième stratégie. La performance de ces deux maillages serait testée par les analyses statistiques de comparaison de distributions des températures de la zone.



**Figure 12 : Première stratégie d'échantillonnage des données Meso-NH dans les mailles de MApUCE.**



**Figure 13 : Deuxième stratégie d'échantillonnage.**

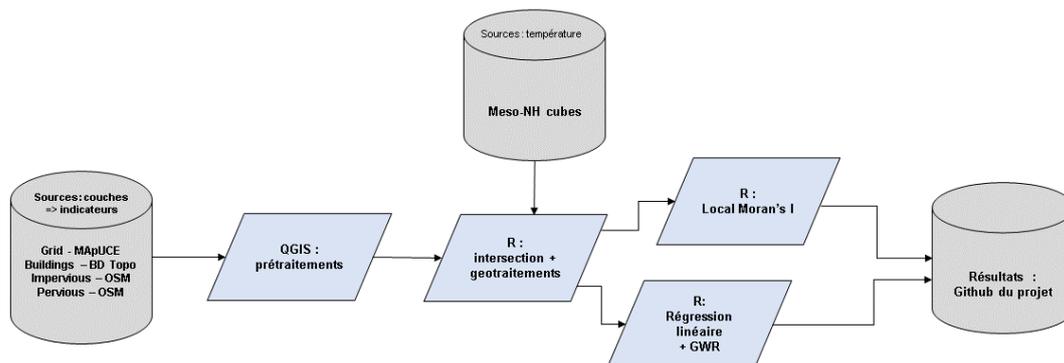
NB : les scripts et les organigrammes de flux montrant les prétraitements, les géotraitements et les calculs des indicateurs se trouve dans l'annexe de ce mémoire.

### 1.7. Outils

Les couches, dont les calculs de ces indicateurs sont issus, ont été prétraitées dans le SIG « QGIS » version 3.4, avant que les calculs soient réalisés par un script R dans le logiciel « R Studio ».

Ces outils vont être employés pour produire des analyses statistiques qui révéleront la composition de la morphologie de la zone d'étude et sa relation avec la température. Nous commençons avec l'étude d'auto-corrélation spatiale.

### 1.8 Chemin de traitement



**Figure 14 : Chemin du traitement du projet**

Pour faciliter de futurs travaux et la reproductibilité des analyses réalisées pendant ce stage, nous avons créé un répertoire Github pour stocker nos scripts, résultats et organigrammes de flux disponible en libre accès à cette adresse :

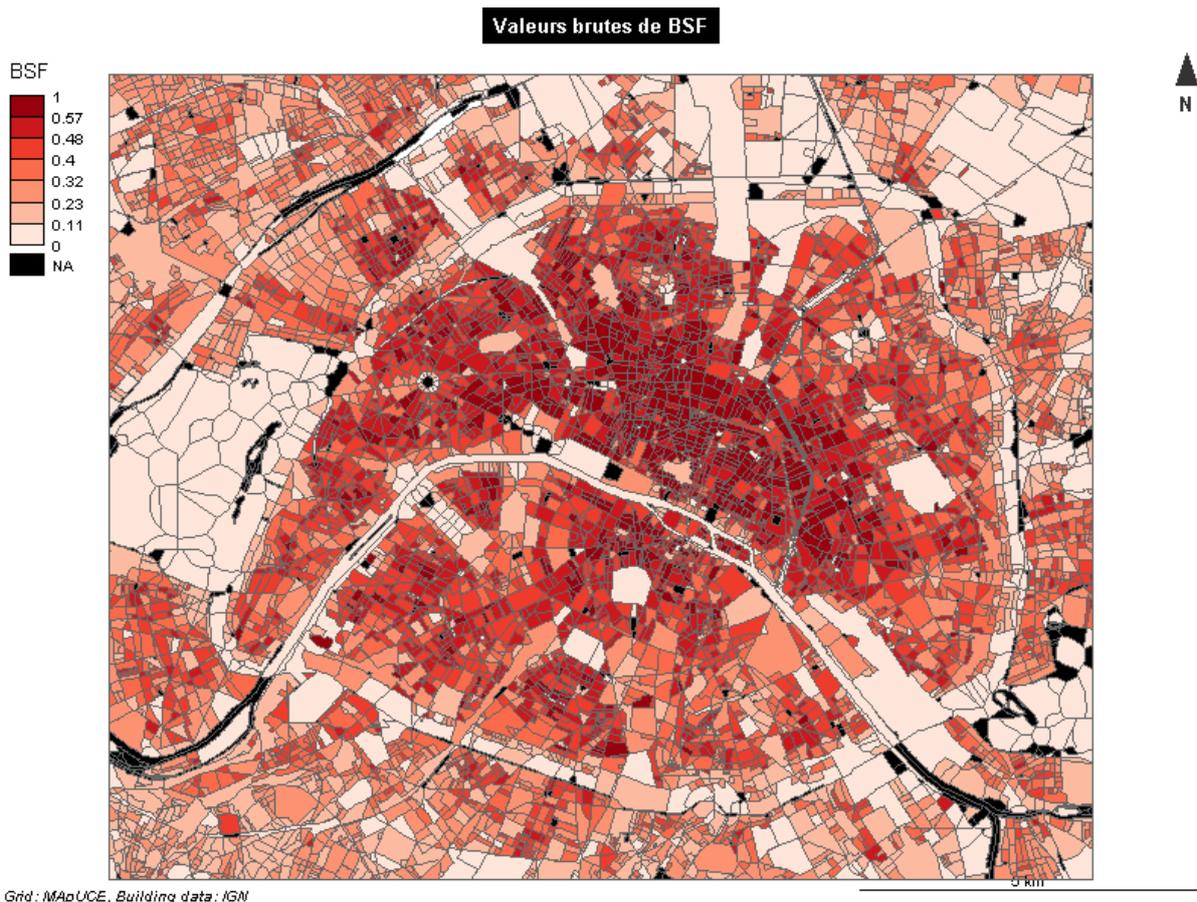
[https://github.com/LukeKR84/indicateurs\\_UHI](https://github.com/LukeKR84/indicateurs_UHI)

## Deuxième partie : Analyses statistiques

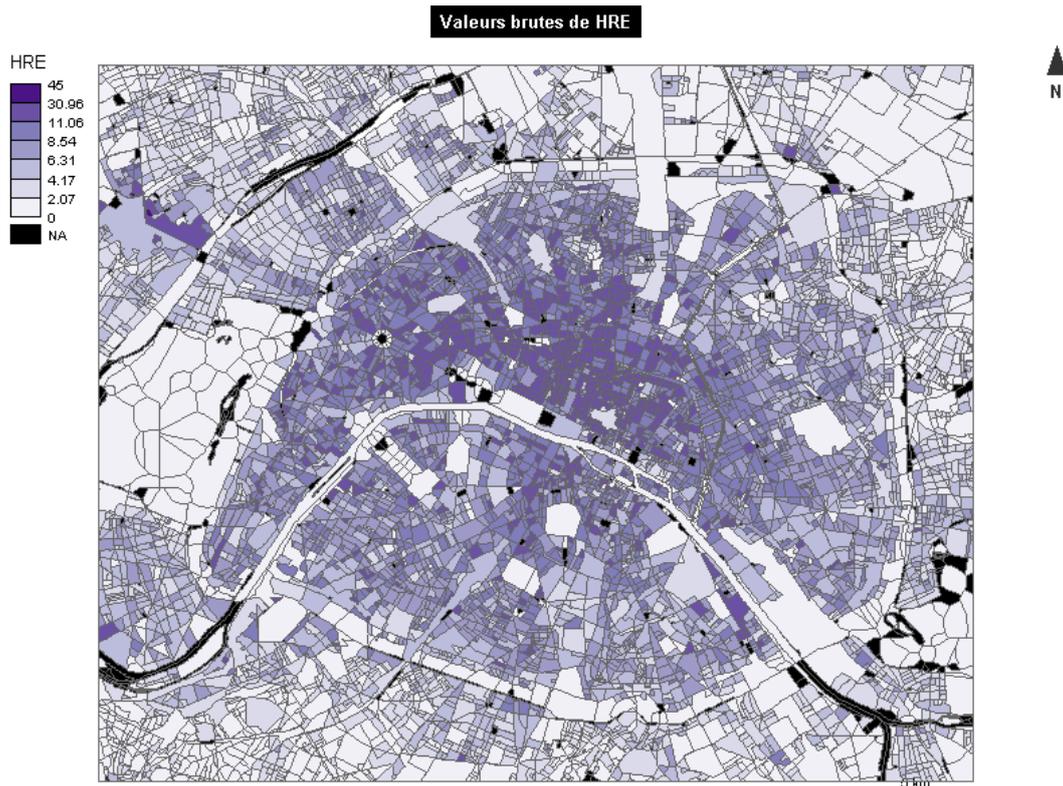
### 2.1. Analyse statistique I : l'auto-corrélation spatiale des indicateurs

#### 2.1.1. Présentation des cartes des indicateurs brutes

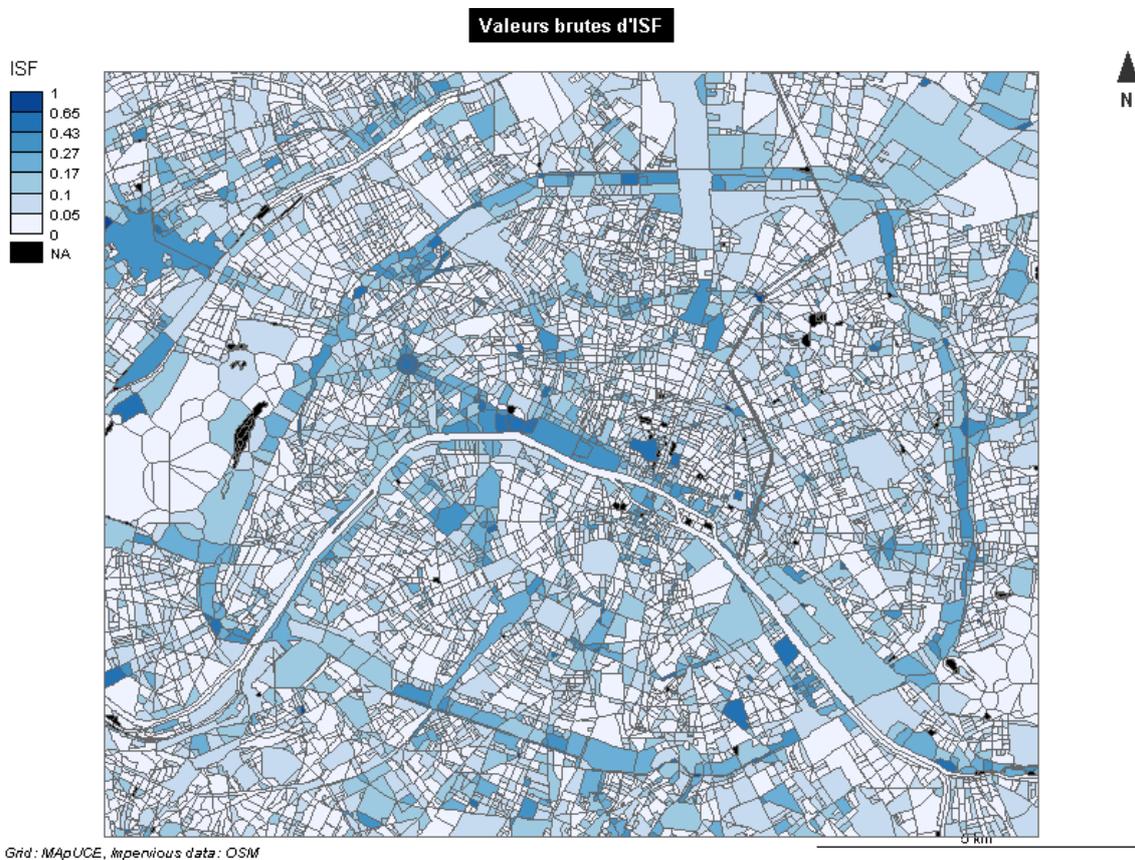
Nous disposons d'une zone d'étude dont l'occupation du sol et la morphologie urbaine sont très variées. Au lieu de décrire ces différences, il est plus convenable de cartographier dans un premier temps les valeurs brutes de ces mesures.



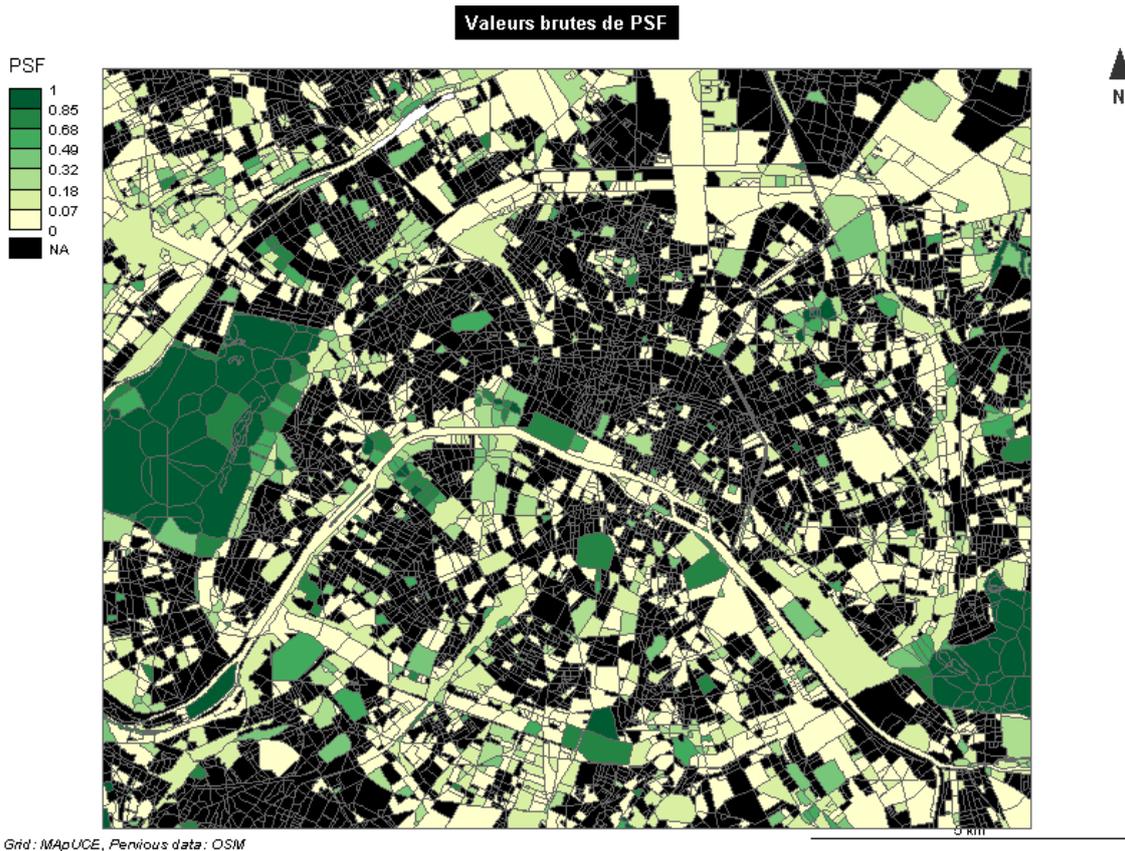
**Figure 15 : La carte de valeurs brutes de la BSF (Building Surface Fraction).**



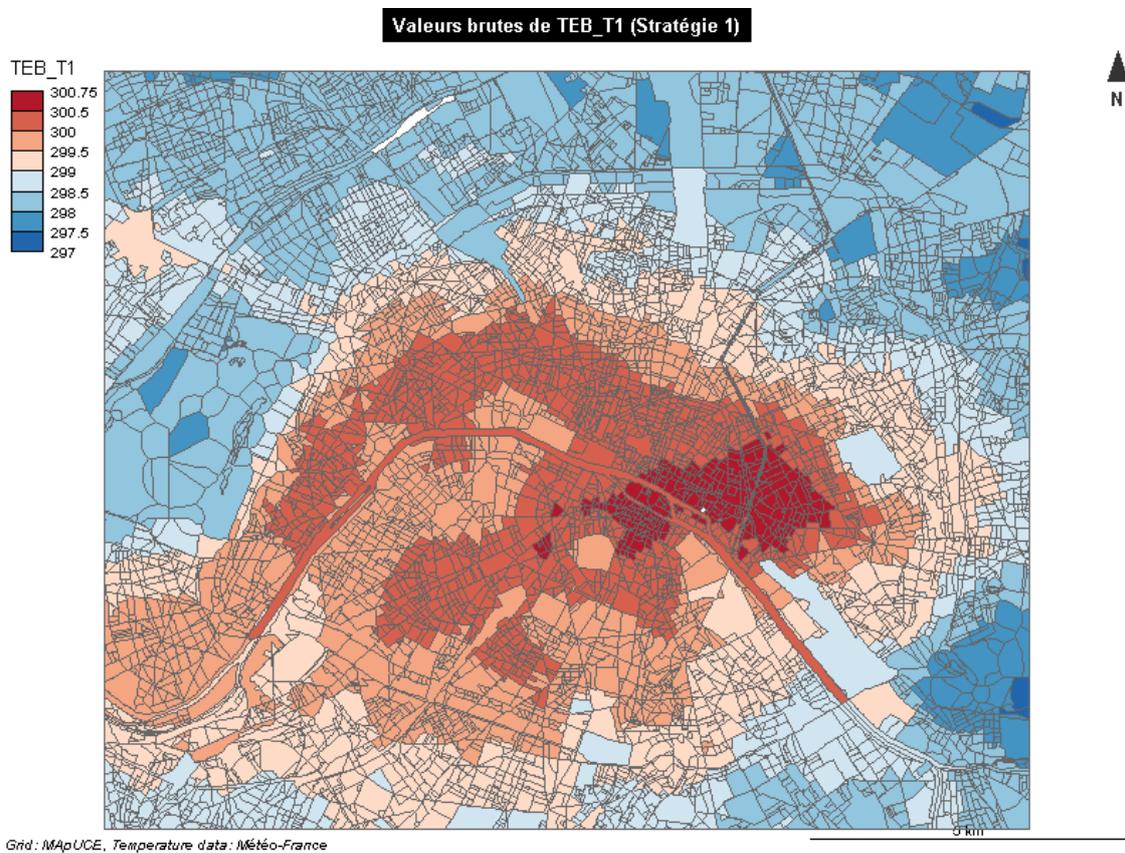
**Figure 16 : La carte de valeurs brutes de HRE (Height of Roughness Elements).**



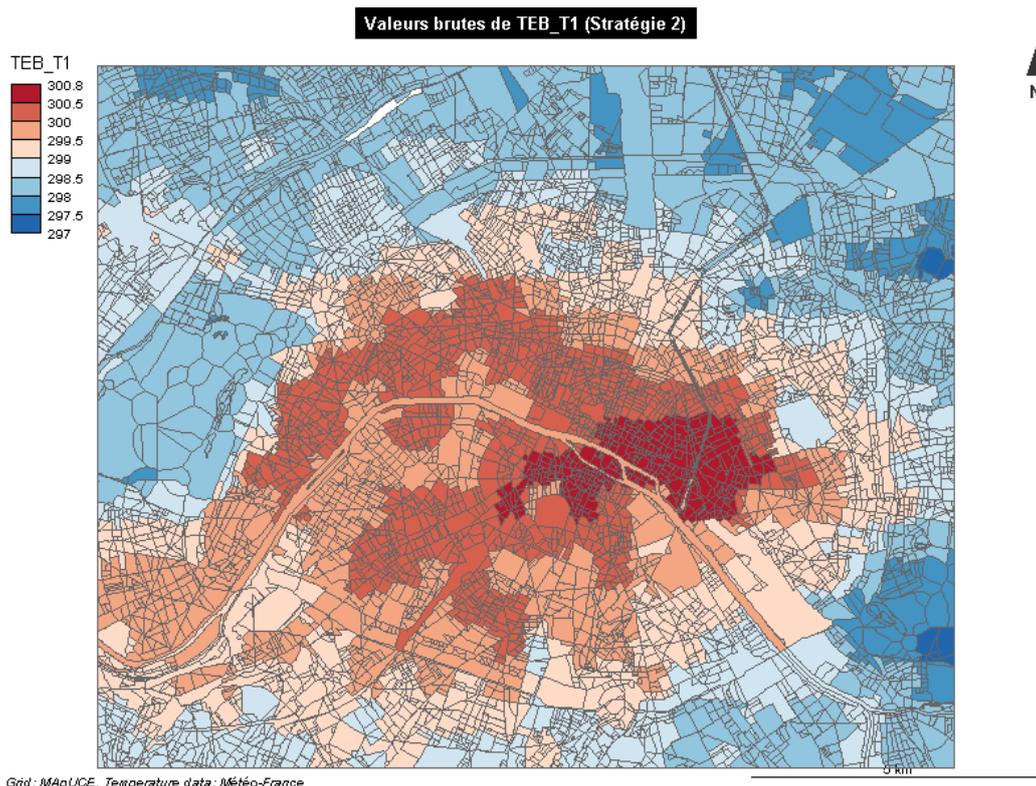
**Figure 17 : La carte de valeurs brutes d'ISF (Impervious Surface Fraction).**



**Figure 18 : La carte de valeurs brutes de PSF (Pervious Surface Fraction).**



**Figure 19 : La carte de valeurs brutes de TEB\_T1 (Stratégie 1).**



**Figure 20 : La carte de valeurs brutes de TEB\_T1 (Stratégie 2).**

Nous remarquons que la distribution spatiale des indicateurs (à l'exception de celles des TEB\_T1) est à la fois d'apparence hétérogène à l'échelle de la zone entière, mais plus localement homogène. On peut même apercevoir des clusters homogènes, qu'on définit comme un ensemble d'USRs adjacentes qui ont la même valeur ou très peu de variations, mais sont-ils vraiment des clusters ? A ce stade, on a intérêt à les délimiter de manière plus exacte. L'approche proposée est de regrouper les observations (les USRs dans notre cas) « qui sont à la fois voisines et similaires (clusters spatiaux) » (Feuillet, Cossart et Commenges, 2019, p.120). Nous allons employer la méthode des indicateurs locaux d'autocorrélation spatiale (LISA) proposé par Luc Anselin (Anselin, 1995). Cette approche est bien élaborée par Feuillet, Cossart et Commenges dans leur ouvrage *Manuel de géographie quantitative* :

*« L'intérêt d'une telle démarche est de considérer que, une fois qu'une certaine hétérogénéité spatiale a été démontrée (ou est soupçonnée d'exister) au niveau de l'ensemble de la zone d'étude, il convient de localiser des contextes spatiaux à une échelle plus fine afin de mieux comprendre leurs mécanismes propres et leurs éventuelles interactions spatiales. »* (Feuillet, Cossart et Commenges, p.119)

### 2.1.2. Présentation d'I de Moran local

Le travail d'Anselin montre l'utilité de prendre un indicateur global et, déjà existant et standardisé dans le domaine d'analyses statistiques spatiales, et de l'employer afin de localiser les clusters homogènes. Un indicateur global permet de savoir l'autocorrélation spatiale d'une zone d'étude, et un des plus connu est l'indice global de Moran, où l'indice est

écrit comme « I »<sup>22</sup>. Pour notre analyse, nous nous sommes basés sur l'I de Moran local, comme il a été développé par Anselin, quoique d'autres types de LISA existent, comme le coefficient (C) de Geary, l'I de Moran est souvent considéré d'être plus performant (Oliveau, 2005, p.4)<sup>23</sup>.

Le principe du passage des indicateurs globaux aux indicateurs locaux est le suivant :

« décliner la mesure de l'auto-corrélation spatiale pour chaque observation en fonction du voisinage local. Ainsi, la variante locale de l'indice de Moran ( $I_i$ ) s'écrit de la façon suivante (quand la variable est standardisée) :

$$I_i = (x_i - \bar{x}) \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x})$$

où  $x$  est la variable étudiée et  $w_{ij}$ <sup>24</sup> est la matrice de pondération ( $x_j$  étant donc ici la valeur de  $x$  dans le voisinage de  $i$ ).

(Feuillet, Cossart et Commenges, p.120).

Il est utile d'illustrer comment ce LISA fonctionne avec plusieurs exemples à l'aide d'un diagramme de Moran (ou le *Moran scatter plot* en anglais) et les cartes d'indices et de quadrants.

### 2.1.3. Méthodologie

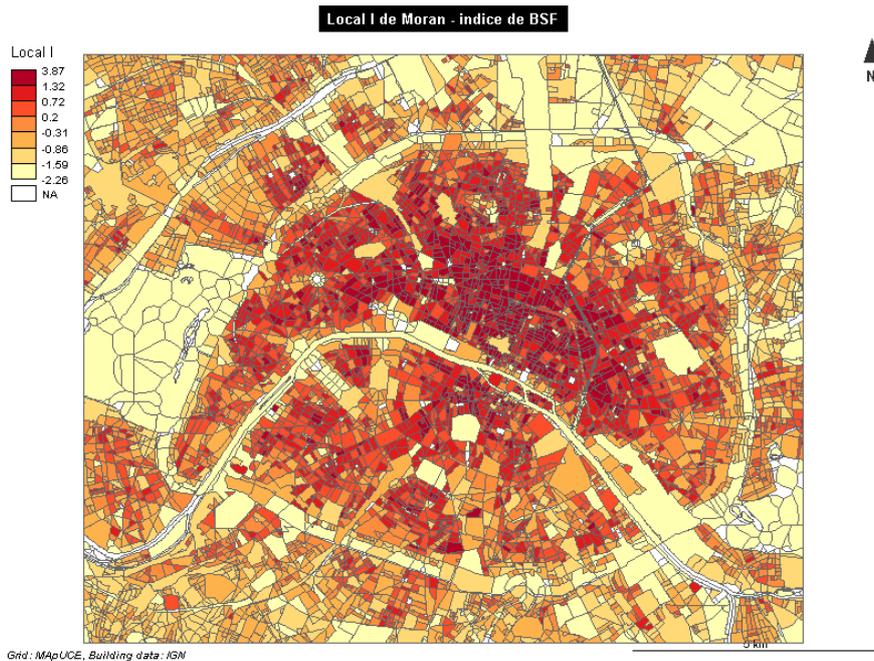
Prenons le premier exemple, la BSF (Building Surface Fraction). Pour chaque observation, une fois qu'on a calculé l'indice I local de Moran pour la variable choisie, on obtient une valeur nous signalant si l'observation se situe dans un contexte de valeurs similaires ou différents (ibid). La meilleure méthode pour illustrer ces observations est par une carte brute des indices suivie par une diagramme de Moran, ou le *Moran scatter plot*.

---

<sup>22</sup> « L'indice de Moran est exposé dans un article de 1950 (Moran, 1950), mais c'est sous la forme présentée par Cliff et Ord (1981) qu'il a été popularisé. Il en est de même pour le coefficient de Geary (1954). » (Oliveau, 2005, p.4).

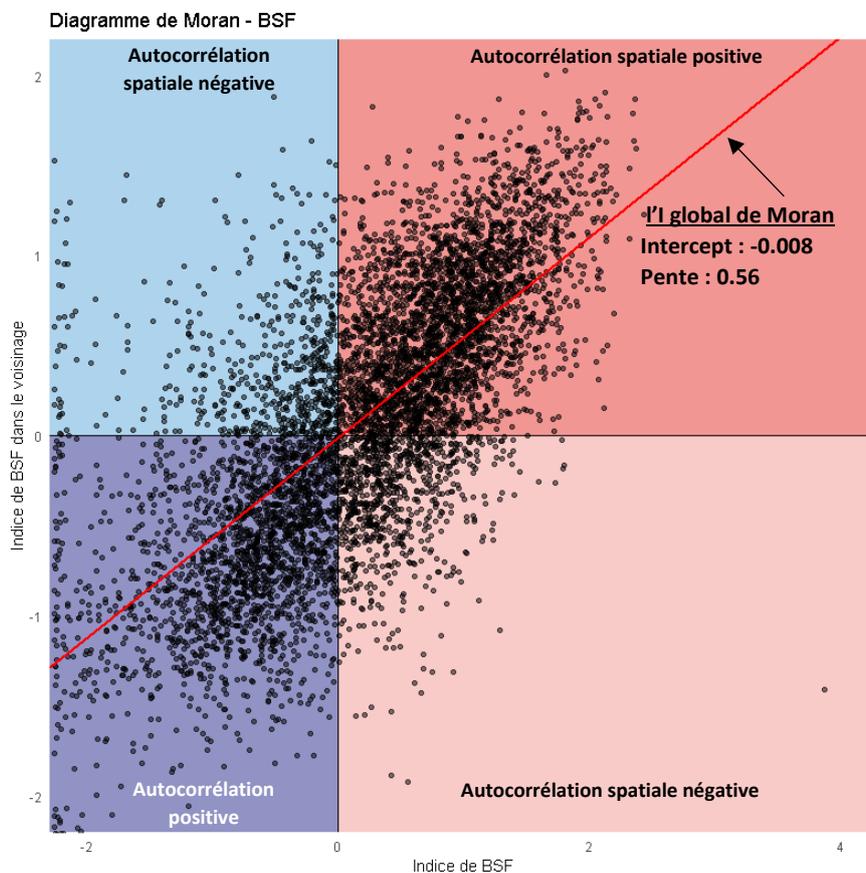
<sup>23</sup> L'I de Moran « semble globalement plus performant que les autres [méthodes de LISA]. D'abord, l'indice de Moran, comme le coefficient de Geary (c de Geary), se base sur la moyenne et est donc peu sensible aux valeurs aberrantes. De plus, il est moins fragile que le second car il mesure les écarts à la moyenne et non pas les écarts entre voisins. » (ibid).

<sup>24</sup>  $w_{ij}$  est une matrice symétrique pondérée de 1/0, avec la valeur 1 pour tous liens défini comme à l'intérieur d'une limite de distance d'une observation (i) donnée ; tous autres liens sont 0 y inclus celui du lien du point i à lui-même (Getis and Ord, 1992, p.190). L'expertise de Getis et Ord sur ce type de matrice est citée par Anselin (Anselin, p.100).



**Figure 21 : La mesure des indices d'association locale de BSF suite au calcul des valeurs locales de l'I de Moran.**

Les indices d'association locaux de BSF ressemblent beaucoup aux valeurs brutes de BSF avant le calcul, et on commence à apercevoir où vont apparaître les clusters homogènes. Le diagramme de Moran permet de voir plus finement la situation des observations dans leur contexte d'autocorrélation.



**Figure 22 : Le diagramme de Moran pour les observations de BSF.**

Anselin décrit le diagramme de Moran (cf. Figure 19) ainsi : « Le diagramme de donne une indication formelle du degré d'association linéaire entre un vecteur de valeurs observées  $y$  et une moyenne pondérée des valeurs voisines ou spatial lag,  $Wy$ . L'association linéaire entre  $y$  et  $Wy$  est au cœur des processus d'auto-régression spatiale, qui sont typiquement utilisés pour exprimer le mécanisme génératif derrière la dépendance spatiale. Formellement, l'I de Moran peut être décrit en notation matricielle comme :

$$I = (N/S_0)y'Wy/y'y$$

$N$  étant le nombre d'observations,  $S_0$  la somme de tous les éléments dans la matrice spatiale

$$(S_0 = \sum_i \sum_j w_{ij})$$

$y$  sont les observations en déviations de la moyenne, et  $Wy$  est le spatial lag associé (Anselin, 1996, pp115-6). »

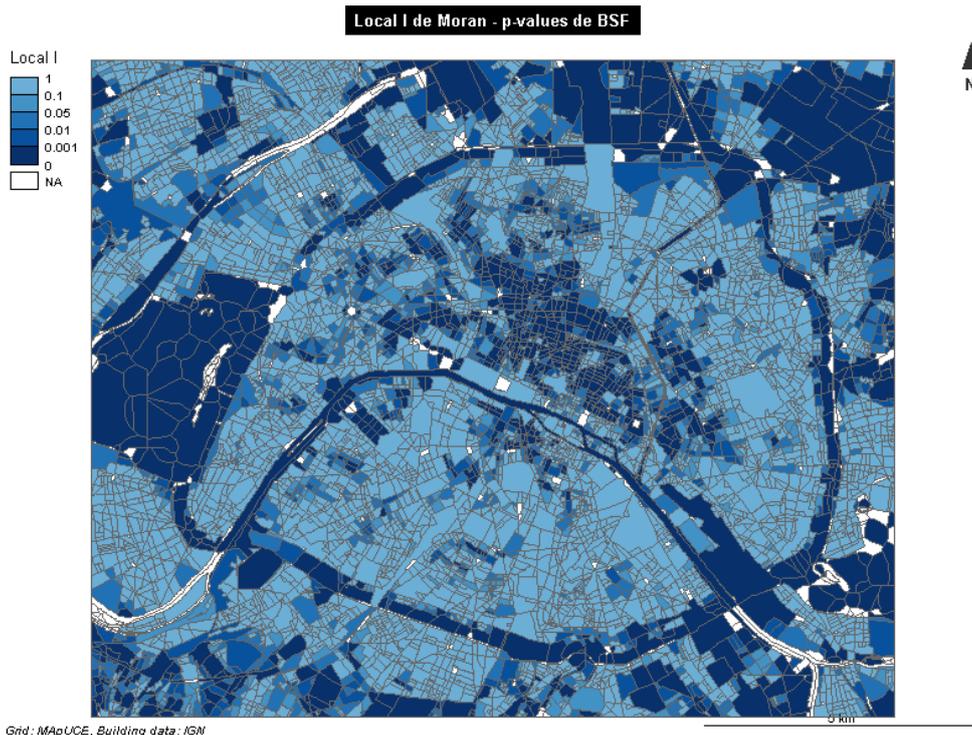
Le coefficient directeur de la droite de régression est l'indice global de Moran et plus cette droite est pentue, plus l'autocorrélation spatiale globale est forte (Feuillet, Cossart et Commenges, p. 121). Les quadrants colorés donnent le moyen d'interpréter la répartition des observations de BSF :

- « Dans le quadrant du bas à gauche, les observations ont des valeurs faibles et sont situées dans un contexte de valeurs faibles (autocorrélation positive).
- Dans le quadrant du haut à droite, les observations ont des valeurs fortes et sont situées dans un contexte de valeurs fortes (autocorrélation positive).
- Dans le quadrant du bas à droite, les observations ont des valeurs fortes et sont situées dans un contexte de valeurs faibles (autocorrélation négative).
- Dans le quadrant du haut à gauche, les observations ont des valeurs faibles et sont situées dans un contexte de valeurs fortes (autocorrélation négative). »  
(ibid)

Le calcul de l'I local de Moran sous R permet de récupérer un Z-score de chaque observation dont une  $p$ -value est calculée. La comparaison de ces  $p$ -values avec les indices locaux permet de classer les observations comme significatives si la  $p$ -value de cette observation est égale ou inférieure à 0.05 (voir le scripte R en annexe)<sup>25</sup>. Une  $p$ -value de 0,05 ou moins correspond grossièrement à un intervalle de confiance de 95%, cet intervalle est souvent critiqué d'être un faux seuil car cela veut dire qu'on accepte un résultat de 0,048 mais on rejeterait un autre de 0,052 (Besançon et Dragicevic, 2017). Où fixe ce seuil pourrait être un point de contention, mais si l'on cherche des  $p$ -values les plus proches de zéro possible et on en obtient un bon nombre, dans ce cas le seuil de 0,05 peut se justifie. Si l'on n'obtient aucune ou très peu de valeurs de 0,05 ou moins, on devrait mettre ce seuil en question. C'est possible de comparer la qualité et la distribution de nos  $p$ -values si l'on les cartographie.

---

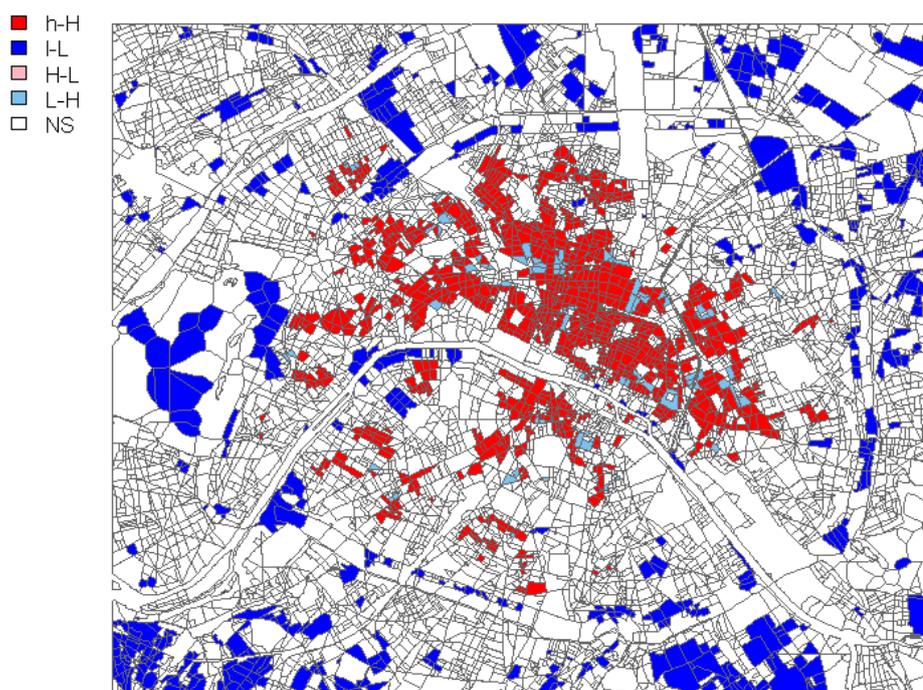
<sup>25</sup> Pour une discussion plus formelle et exhaustive sur le calcul et l'obtention de ces statistiques par des langages de programmation voir Bivand, R. S. et Wong, D. W. S. (2018) "Comparing implementations of global and local indicators of spatial association". TEST, 27(3), 716-748. <https://doi.org/10.1007/s11749-018-0599-x>



**Figure 23 :** La carte de  $p$ -values pour les indices de  $I$  de Moran local. Si l'on compare cette carte avec celles des indices de  $I$  de Moran local, on commence à savoir où précisément nos clusters homogènes vont apparaître et comment ces regroupements homogènes seront classifiés en regardant la distribution dans les quadrants du diagramme de Moran.

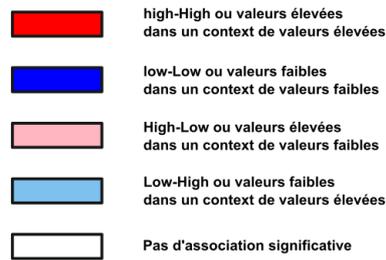
La prochaine étape est d'afficher la carte de quadrants. Le diagramme de Moran et les cartes précédentes vont nous donner des idées de la répartition des clusters homogènes.

### BSF - Les quadrants de $I$ local de Moran



**Figure 24 :** La carte des quadrants pour les indices de BSF.

Les couleurs et terminologies de la légende de la carte de quadrants (cf : Figure 25) correspondent à la méthodologie d'Anselin qui classe ces regroupements selon les critères suivants :



**Figure 25 : La classification de la légende selon Anselin.**

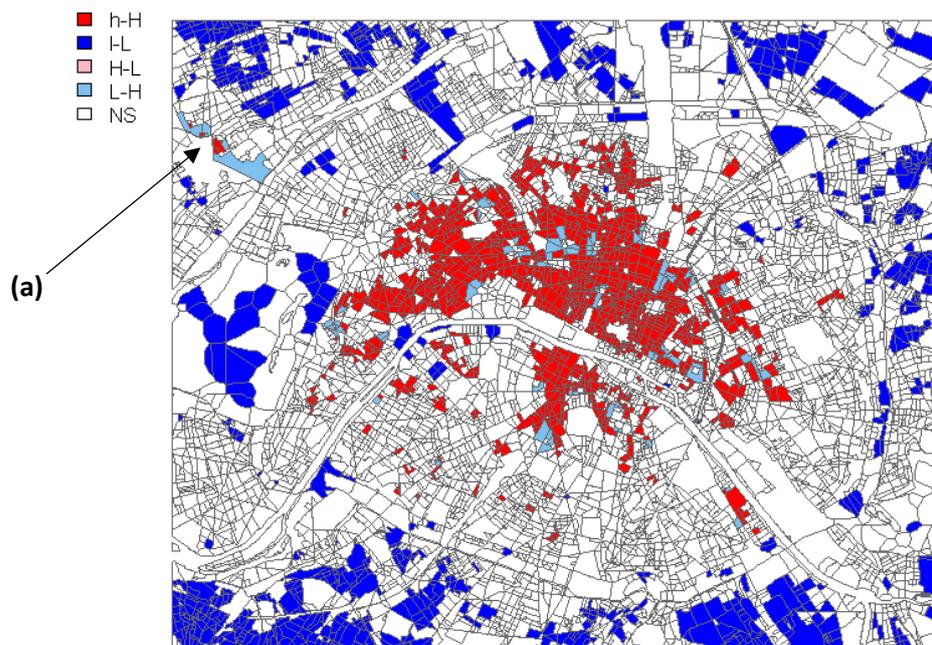
Si on compare la carte des indices d'association (cf : Figure 21) et celle de *p-values*, on peut savoir à l'avance que les clusters homogènes qui vont apparaître à l'intérieur de la périphérie de Paris seront majoritairement des « High-high », mais qu'en sortant de Paris intramuros des « Low-low » seront présents. La carte de quadrants confirme cette hypothèse.

#### 2.1.4. Résultats

Afin de démontrer la méthodologie nécessaire pour produire les résultats du calcul des indices locaux de Moran, on a présenté les résultats pour l'indicateur de la BSF. Dans cette section, le reste des résultats pour les autres indicateurs morphologiques seront présentés par leurs cartes de quadrants, ainsi que ceux pour les valeurs de TEB\_T1.

On constate des répartitions spatiales similaire pour la HRE que la BSF, l'ISF et la PSF sont moins auto-corrélées, avec des regroupements plus éparpillés que la BSF et la HRE. La température, qu'elle soit affichée par la stratégie 1 ou 2, présente un regroupement homogène et positif au centre, au nord et dans les zones boisées de la zone d'étude.

HRE - Les quadrants de l'I local de Moran



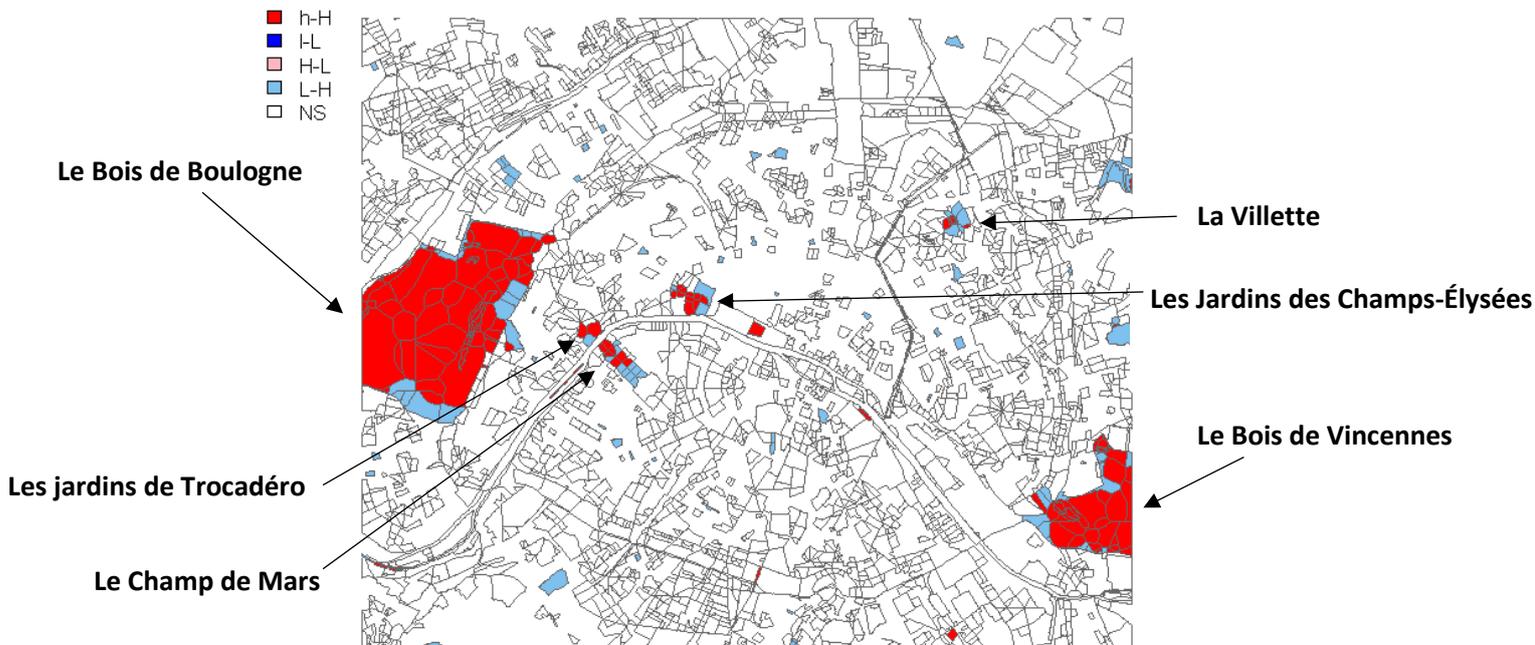
**Figure 26 : La carte des quadrants pour les indices de HRE. La distribution des clusters ressemble à celle de la BSF, sauf qu'on remarque quelques « High-high » à La Défense (a).**

### ISF - Les quadrants de l'I local de Moran



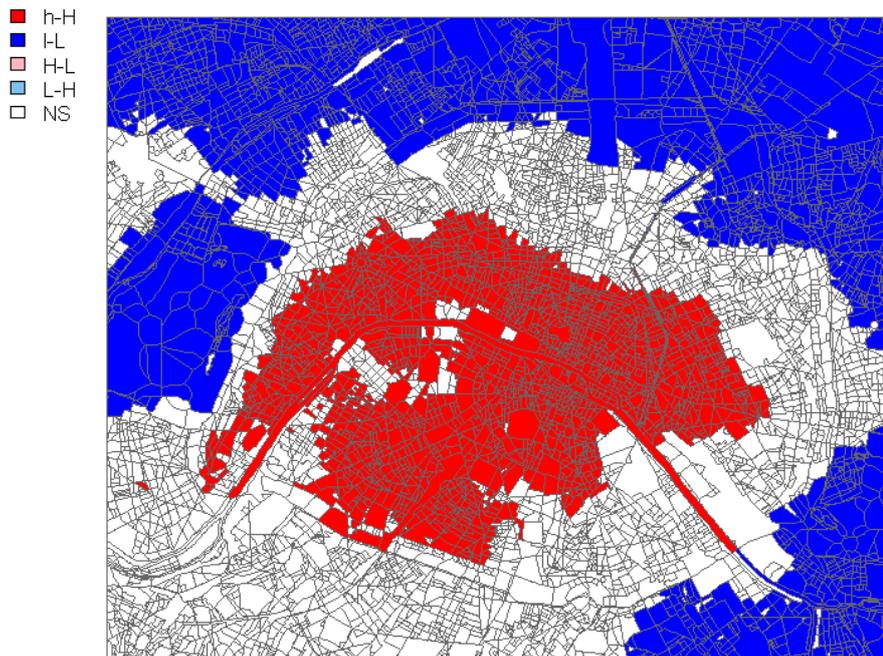
*Figure 27 : La carte de quadrants pour l'ISF. On remarque bien la forme de la périphérique (a), la rive droite à côté du musée du Louvre (b) et les Jardins des Tuileries, et la Défense (c). Les clusters sont clairement dispersés de manière plus éparpillée que ceux de la BSF et la HRE.*

### PSF - Les quadrants de l'I local de Moran



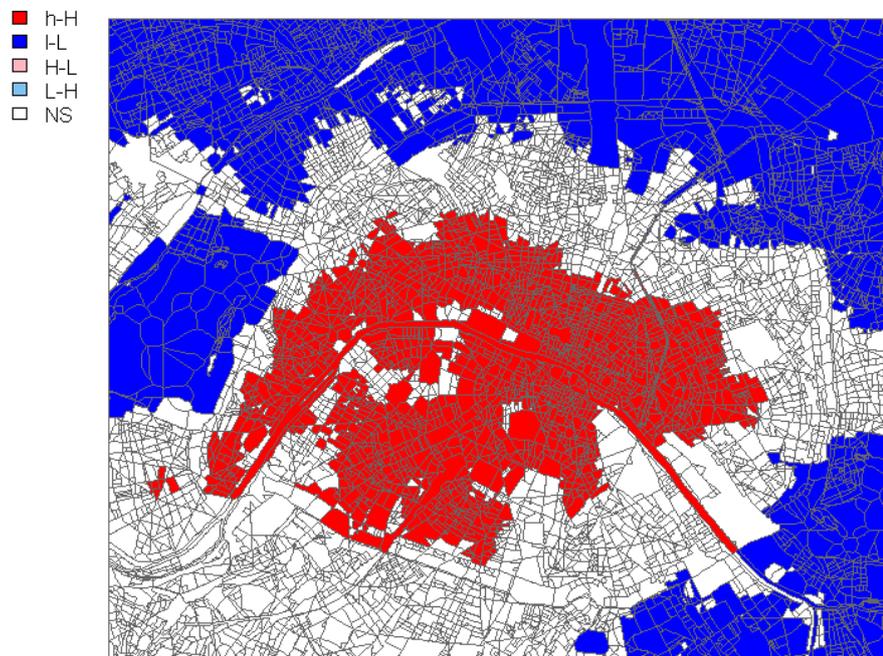
*Figure 28 : La carte des quadrants pour les indices de PSF. Les zones boisées sont très fortement auto-corrélées. Beaucoup d'USRs contiennent aucune valeur de PSF, ce qui explique leurs absences de la carte.*

TEB\_T1 (Stratégie 1) - Les quadrants de l'I local de Moran



*Figure 29 : La carte de quadrants pour le TEB\_T1 (Stratégie 1). Les valeurs élevées et basses de température sont très fortement auto-corrélées entre elles.*

TEB\_T1 (Stratégie 2) - Les quadrants de l'I local de Moran



*Figure 30 : La carte de quadrants pour le TEB\_T1 (Stratégie 2). Comme pour la première stratégie (Figure 26), on aperçoit des trous dans le grand cluster de « High-high » probablement par conséquent des présences importantes de surfaces perméables comme le Champ de Mars et les Jardins des Champs-Élysées (cf. Figure 28).*

### 2.1.5. Discussion des résultats

Hormis les résultats pour les données de température, les indicateurs morphologiques de BSF et de HRE présentent des niveaux d'autocorrélation plus forts et répandus que l'ISF et la PSF, et des clusters plus centralisés qui se rapprochent des clusters de « High-high » pour TEB\_T1. L'analyse de l'autocorrélation spatiale nous a permis d'identifier des clusters (i.e. des régularités) de nos indicateurs, choisi en début de notre étude, qui sont localement homogènes. La prochaine étape est d'examiner de plus près si ces régularités se retrouvent dans les températures.

## 2.2. Analyse statistique II : la régression linéaire entre la température et les autres indicateurs

### 2.2.1. Méthodologie

Pour examiner si une corrélation entre la température et d'autres indicateurs existe, on observe chaque indicateur en croisant avec la température par la représentation dans un graphique cartésien en forme d'un nuage de points. Ensuite, on trace une droite au sein de ce nuage, la « régression linéaire est la méthode qui va permettre d'estimer les paramètres de l'équation de cette droite » (Feuillet, T. Cossart, E. Commenges, p.159). On suppose qu'une corrélation positive existe entre tous les indicateurs morphologiques dont la BSF, la HRE et l'ISF, c'est-à-dire quand la valeur de l'indicateur monte, la température va monter au même temps. Puisque, la PSF est différente, et que, par exemple, pendant une période de canicule les zones les plus fraîches sont bien végétalisées (Bigorne et al. p.14), nous supposons qu'il y aura une corrélation négative avec la température.

Nous voulons aussi éliminer l'hypothèse nulle (H0) selon laquelle il n'existe aucune corrélation la température et nos indicateurs. Nous considérons classiquement que cette hypothèse sera écartée si notre analyse produit une p-value de 0,05 ou moins.

Feuillet et al. explique la méthodologie derrière le R2 et sa mesure de corrélation : « Cette mesure se comprend à partir de la décomposition de la variance :  $SCT = SCE + SCR$

*Cette équation peut s'écrire avec la somme des carrés ou avec la variance (somme des carrés rapportée à l'effectif) :*

- *La somme des carrés totale (SCT), celle de la variable que l'on cherche à expliquer.*
- *La somme des carrés expliquée par le modèle (SCE), c'est-à-dire expliquée par la covariation avec les variables explicatives.*
- *La somme des carrés résiduelle (SCR), celle qui reste à expliquer.*

*Le R2 correspond au rapport entre la variation (mesurée par la somme des carrés ou par la variance) de y expliquée par le modèle et la variation totale de y, que l'on cherche à expliquer :*

$$R^2 = \frac{SCE}{SCT} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

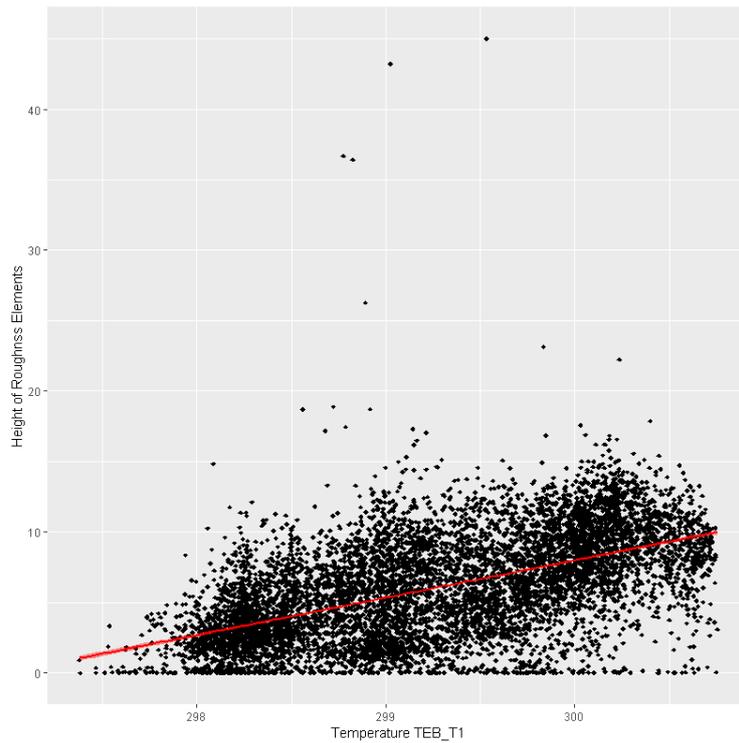
*ou écrit autrement :*

$$R^2 = 1 - \frac{SCR}{SCT} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

*Le coefficient de détermination est compris entre 0 et 1. Sa valeur s'interprète comme le pourcentage de variance de y expliqué par le modèle. Par exemple, un R<sup>2</sup> de 0,5 signifie que 50 % de la variance de y est expliqué par le modèle (plus précisément par la variance de la variable explicative intégrée au modèle). En d'autres termes, **plus le R<sup>2</sup> est proche de 1, plus la qualité prédictive du modèle est élevée**. Un R<sup>2</sup> égal à 0 correspond à une situation où la droite de régression est horizontale (b1 = 0) (Feuillet, T. Cossart, E. Commenges, pp165-6). »*

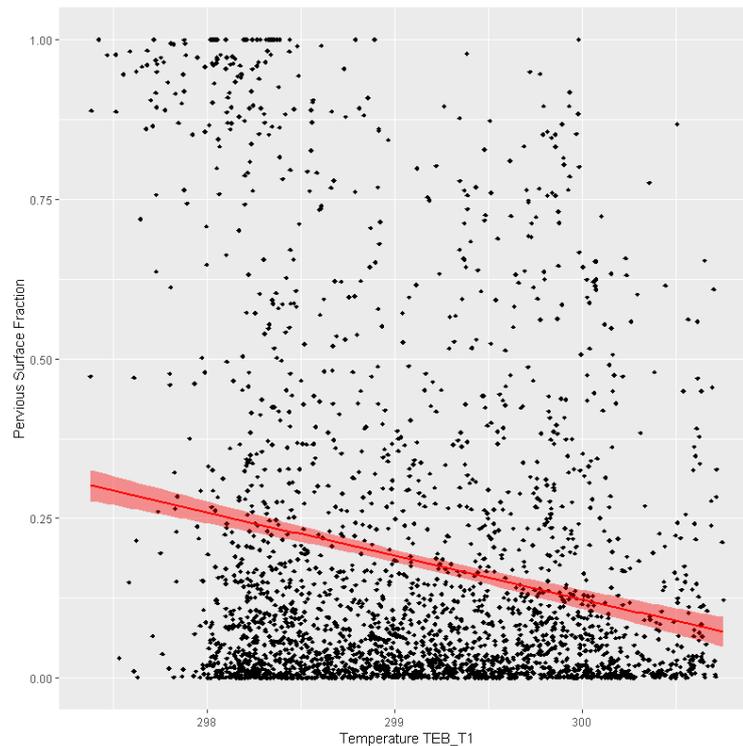
### 2.2.2. Résultats

L'indicateur avec la meilleure corrélation positive est la HRE, mais elle est faible, avec un R2 de seulement 0,3.



**Figure 31 : La régression linéaire des valeurs de TEB\_T1 (Stratégie 1) contre celles de HRE.**

Concernant la PSF, notre hypothèse était bien correcte : la corrélation est négative, néanmoins la corrélation-même reste très faible avec un R2 de 0,04.



**Figure 32 : La régression linéaire des valeurs de TEB\_T1 (Stratégie 1) avec celles de PSF.**

L'ensemble des résultats ne montrent presque aucune différence de corrélation pour les valeurs de température entre la stratégie 1 et la stratégie 2.

Stratégie 1			Stratégie 2		
Indicateur	R2	P-value	Indicateur	R2	P-value
Building Surface Fraction (BSF)	0.21	<2.2e-16	Building Surface Fraction (BSF)	0.21	<2.2e-16
Height of Roughness Elements (HRE)	0.3	<2.2e-16	Height of Roughness Elements (HRE)	0.3	<2.2e-16
Impervious Surface Fraction (ISF)	- 5.305e-05	0.4631	Impervious Surface Fraction (ISF)	- 1.759e-06	0.3211
Pervious Surface Fraction (PSF)	0.04	<2.2e-16	Pervious Surface Fraction (PSF)	0.04	<2.2e-16

**Tableau 2 : Tableau des résultats de la régression linéaire.**

NB : tous les graphiques de ces résultats se trouvent dans l'annexe.

### 2.2.3. Discussion des résultats

Globalement, on peut conclure que des corrélations existent pour nos indicateurs, hormis la ISF qui a une *p-value* nettement trop élevée. En revanche, ces corrélations sont très faibles qui nous permet à dire que le lien la température et la morphologie est faible. Cependant, un détail qu'on n'a pas pris en compte dans cette analyse est la répartition spatiale de nos observations, vu précédemment dans l'analyse d'autocorrélation spatiale, ce détail est important. Une régression géographiquement pondérée (GWR) permettra de prendre en compte la localisation des observations dans la régression.

## 2.3. Analyse statistique III : GWR (*geographically weighted regression / la régression géographiquement pondérée*)

### 2.3.1. Présentation de « GWR »

La GWR a été développée par Fotheringham, Brunson et Charlton, et publiée dans leur ouvrage *Geographically Weighted Regression* (Fotheringham, Brunson and Charlton, 2002). Afin d'expliquer l'utilité de cette approche, nous nous posons la question de comment cartographier les informations de la régression linéaire qu'on vient de réaliser ? La simple réponse est que c'est impossible, les auteurs explique pourquoi c'est le cas :

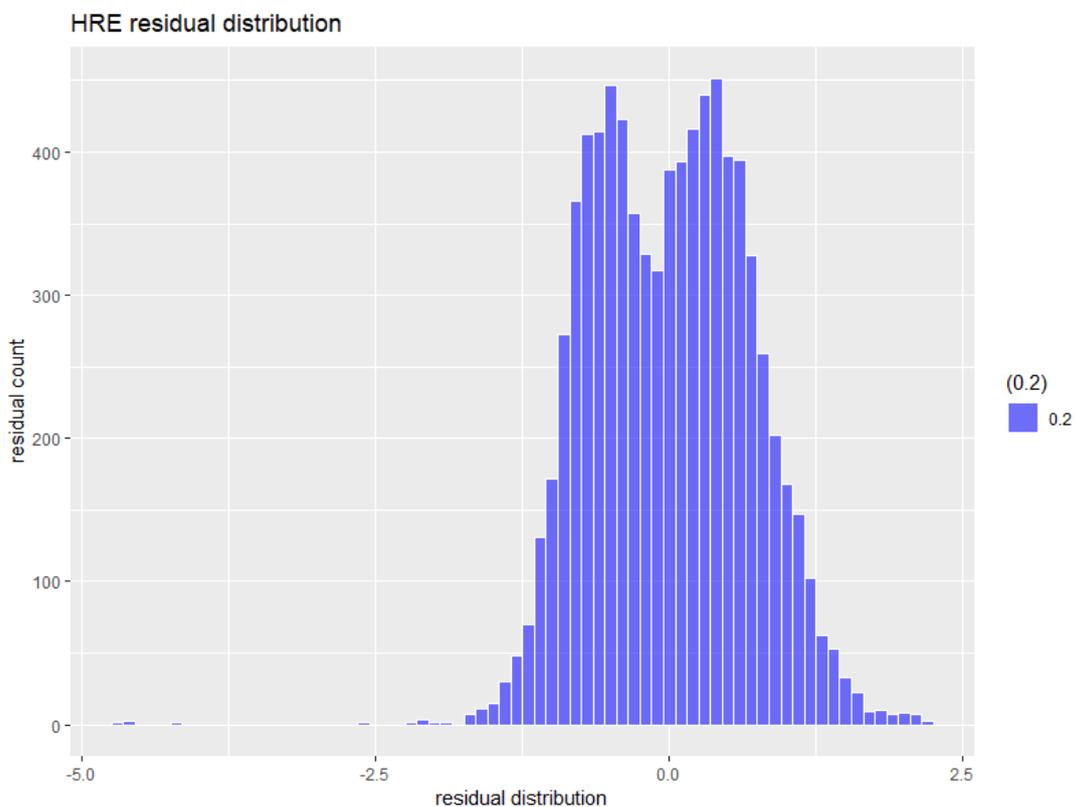
*« Les statistiques globales sont généralement à valeur unique : les exemples incluent une valeur moyenne, un écart type et une mesure de l'autocorrélation spatiale dans un ensemble de données. Les statistiques locales ont plusieurs valeurs : différentes valeurs de la statistique peuvent apparaître à différents endroits dans la zone d'étude. Chaque statistique locale est une mesure de l'attribut ou de la relation examinée à proximité d'un emplacement dans la zone d'étude : à mesure que cet emplacement change, la statistique locale peut prendre des valeurs différentes. Par conséquent, les statistiques globales ne peuvent pas être cartographiées ou sont « non compatibles avec le SIG », ce qui signifie qu'elles ne sont pas propices à l'analyse au sein d'un système d'information géographique (SIG) car elles consistent d'une seule valeur. Les statistiques locales, en revanche, peuvent être cartographiées et examinées dans un SIG. Par exemple, il est possible de produire une carte d'estimations de paramètres locaux montrant comment une relation varie dans l'espace, puis d'étudier le modèle spatial des estimations locales pour établir une certaine compréhension des causes possibles de ce modèle. En effet, étant donné que de très grands nombres d'estimations de paramètres locaux peuvent être produits, il est presque essentiel de les cartographier afin de donner un sens au*

*modèle qu'ils affichent. Les statistiques locales sont donc des statistiques spatiales alors que les statistiques globales sont non spatiales ou spatialement limitées. » (ibid, pp6-7)<sup>26</sup>*

Que nos résultats de la régression linéaire soient intéressants ou non, nous avons besoin de les cartographier. De plus, les informations globales ne répondent pas à nos interrogations sur la température, car on possède des mesures locales et non une simple moyenne pour la zone Paris entière. Nous avons donc besoin à savoir si les variations géographiques varient spatialement avec la température et de pouvoir mesurer ces variations si elles existent. Nous présenterons les étapes qui permettent de réaliser cette cartographie dans la partie suivant la méthodologie.

### 2.3.2. Méthodologie

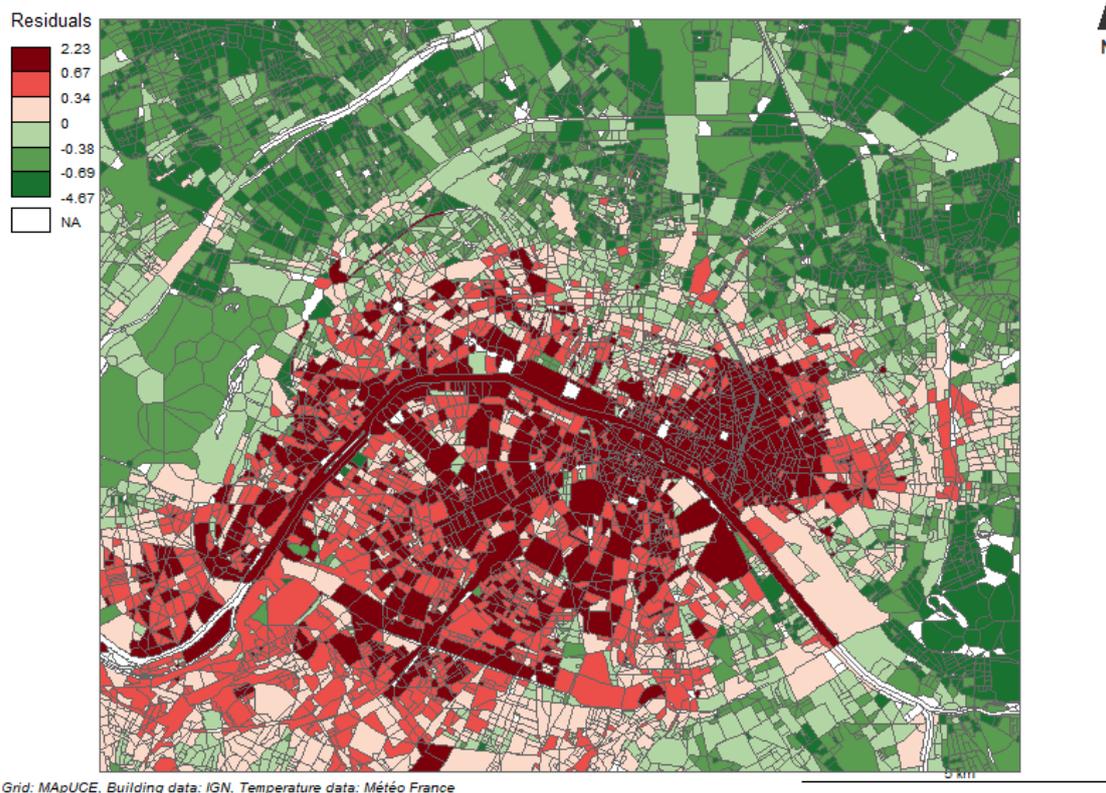
Nous commençons à partir du graphique de la régression linéaire (cf : Figure 33) où les observations manquent d'information spatiale. Si l'on leur réattribue leurs coordonnées géographiques, cela nous permet à réaliser une carte des résidus de régression (des écarts-types de la moyenne à l'intérieur de chaque sous-régression) des observations.



**Figure 33 : L'histogramme de la distribution des résidus de la régression linéaire des valeurs de TEB\_T1 (Stratégie 2) avec celles de HRE.**

<sup>26</sup> La version originale en anglais à été traduite en français par l'auteur du mémoire.

### TEB T1~HRE Strat 2 : residual spatial distribution

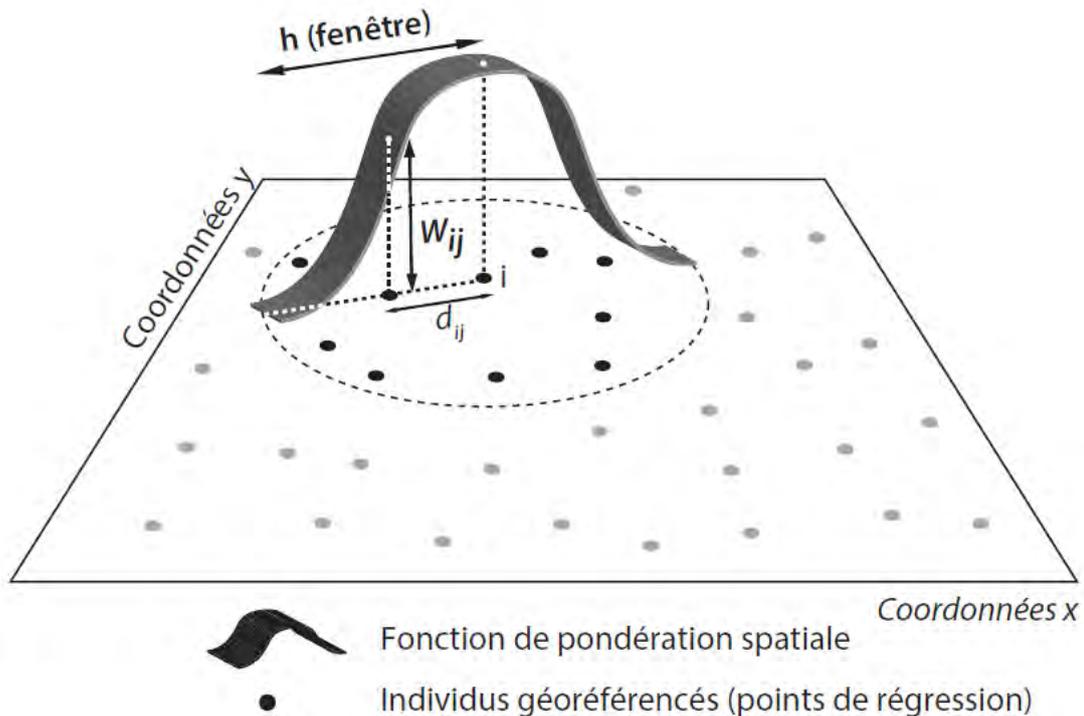


**Figure 34 : La carte des résidus de la régression linéaire des valeurs de TEB\_T1 (Stratégie 2) avec celles de HRE.**

On constate immédiatement une grande hétérogénéité spatiale qui n'est pas communiquée par la régression linéaire, ce qui nous indique que le  $R^2$  de 0,3 dans le cas de la HRE est assez trompeur. De plus, la carte de résidus ne prend pas en compte la première loi de la géographie de Tobler que « Tout interagit avec tout, mais deux objets proches ont plus de chances de le faire que deux objets éloignés » (Tobler, 1970). Ce principe nous indique qu'on a besoin de comparer la valeur de chaque observation avec celle de ses voisins, en réduisant la taille de l'ensemble d'individus sur lesquels est calculée la régression à l'aide d'une limite de distance. Cette distance est définie comme une fenêtre ou une bande passante (*bandwidth* en anglais) qui parcourt la zone d'étude paramétrée selon une fonction spécifique<sup>27</sup>. Tout interagit avec tout, mais deux objets proches ont plus de chances de le faire que deux objets éloignés. La définition des paramètres de notre bande passante est une opération délicate, car elle va fortement influencer les résultats qu'on affichera sur le rendu. Il faut qu'on choisisse une limite de distance et une méthode de pondération. Nous avons fait un choix classique et opté pour la méthode gaussienne<sup>28</sup>, illustrée par la Figure 35.

<sup>27</sup> On définit souvent une bande passante avec une distance euclidienne fixe comme une bande passante non-adaptée. Il existe aussi la possibilité d'utiliser une bande passante adaptée qui fonctionne du le nombre de proches voisins et non directement sur la distance. Le désavantage d'une bande passante adaptée pour notre zone d'étude est que les mailles sont de tailles extrêmement variables, donc un nombre de voisins dans le Bois de Boulogne couvrirait un territoire bien plus vaste que dans l'hypercentre de Paris. Nous considérons donc une bande passante non adaptée approprié pour notre approche.

<sup>28</sup> Plusieurs d'autres méthodes sont proposées dont « exponentielle, bicarrée, et boxcar », pour une explication plus complète de ces méthodes cf : (Feuillet, T. Cossart, et E. Commenges , pp204-5).



**Figure 35 : Exemple d'une bande passante gaussienne (Feuillet, Cossart, Commenges, p.203)**

« On définit une fenêtre de voisinage ( $h$ ) et on attribue pour chaque observation voisine de  $i$  un poids  $W_{ij}$  inversement proportionnel à la distance entre  $i$  et l'observation voisine ( $d_{ij}$ ). Un modèle de régression est ensuite estimé pour chaque observation sur la base de la matrice de pondération spatiale ainsi définie (ibid) ».

L'avantage de la méthode gaussienne est que les voisins les plus proches sont plus fortement pondérés que ceux plus éloignés de l'observation, mais que la pondération est graduelle contrairement à la méthode exponentielle où le poids décroît plus vite avec la distance (ibid, p.205). Puisque les regroupements de températures sont homogènes et de distances assez larges (cf : Figures 19 et 20), cette décroissance graduelle de la méthode gaussienne se prête bien à notre zone d'étude.

Une fois notre fonction paramétrée avec une bande passante fixe et une fonction de pondération, la zone étudiée sera parcourue et une régression sera faite pour chaque observation. Formellement, ceci est défini ainsi :

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i$$

« où  $y_i$  est la valeur de la variable endogène [comme la BSF ou la HRE par exemple] pour l'individu  $i$  (qui est aussi une localisation) et  $(u_i, v_i)$  représentent les coordonnées géographiques de l'individu  $i$  (si c'est un polygone, on prend généralement les coordonnées de son centroïde). Ainsi,  $\beta_k(u_i, v_i)$  représente la valeur du coefficient de régression local (c'est-à-dire pour l'individu  $i$ ) associé à la variable exogène  $k$  (ibid, p.202) »

### 2.3.3. Résultats

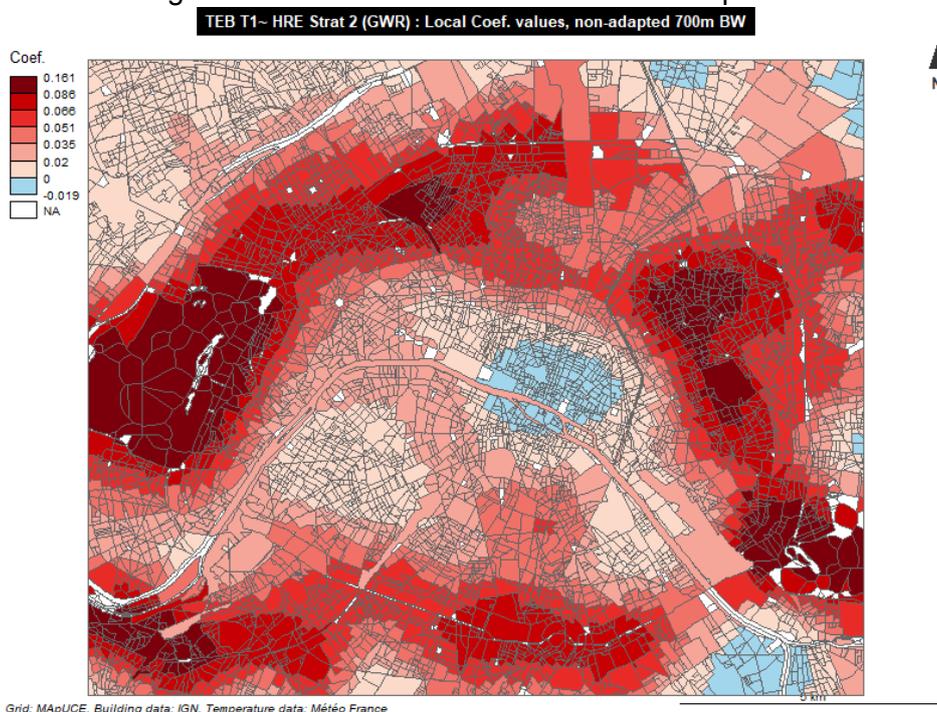
Nous avons testé plusieurs distances avec notre bande passante, et, au final, celle qui correspondait le mieux à la zone d'étude était de 700m, donc 50m plus large que les cellules de TEB\_T1. Les résultats sont d'abord présentés en forme d'un tableau :

Stratégie 1			Stratégie 2		
Indicateur	Adjusted R2	AICc	Indicateur	Adjusted R2	AICc
Building Surface Fraction (BSF)	0.956	- 6637.2	Building Surface Fraction (BSF)	0.921	- 1169.5
Height of Roughness Elements (HRE)	0.953	- 6120.6	Height of Roughness Elements (HRE)	0.919	- 898.6
Impervious Surface Fraction (ISF)	0.955	- 6654.6	Impervious Surface Fraction (ISF)	0.919	- 817.02
Pervious Surface Fraction (PSF)	0.949	- 1826.4	Pervious Surface Fraction (PSF)	0.918	- 401.6

**Tableau 3: Les résultats de l'étude GWR avec une bande passante non-adaptée de 700m**

Effectivement on a testé nos deux modèles ou types d'échantillonnage des TEB dans les mailles d'USR (Stratégie 1 et Stratégie 2, cf : 1.6.1. Délimitation de la zone d'étude et l'intégration des données Meso-NH), donc on peut se servir des R2 ajustés et le Critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) afin de sélectionner le meilleur modèle. L'AICc est utilisé pour mesurer l'information de distance entre la distribution du modèle et la vraie distance en réalité (Fotheringham, Brunsdon and Charlton, pp95-96)<sup>29</sup>. Plus l'AICc est parcimonieux, c'est-à-dire plus qu'il se rapproche de 0, plus le modèle est vraisemblable, l'AICc ayant moins de degrés de liberté. Nous remarquons que les GWR des deux modèles produisent des R2 ajustés nettement plus élevés que le modèle linéaire, logiquement (puisque seules des valeurs proches sont prises en compte), et on pourrait avoir tendance à choisir la Stratégie 1 à cause de son R2 supérieur, mais le R2 de Stratégie 2 n'est pas beaucoup inférieur et le modèle est marqué par un AICc bien plus parcimonieux que celui de Stratégie 1. Cette mesure nous permet de dire que la Stratégie 2 est le mieux adaptée.

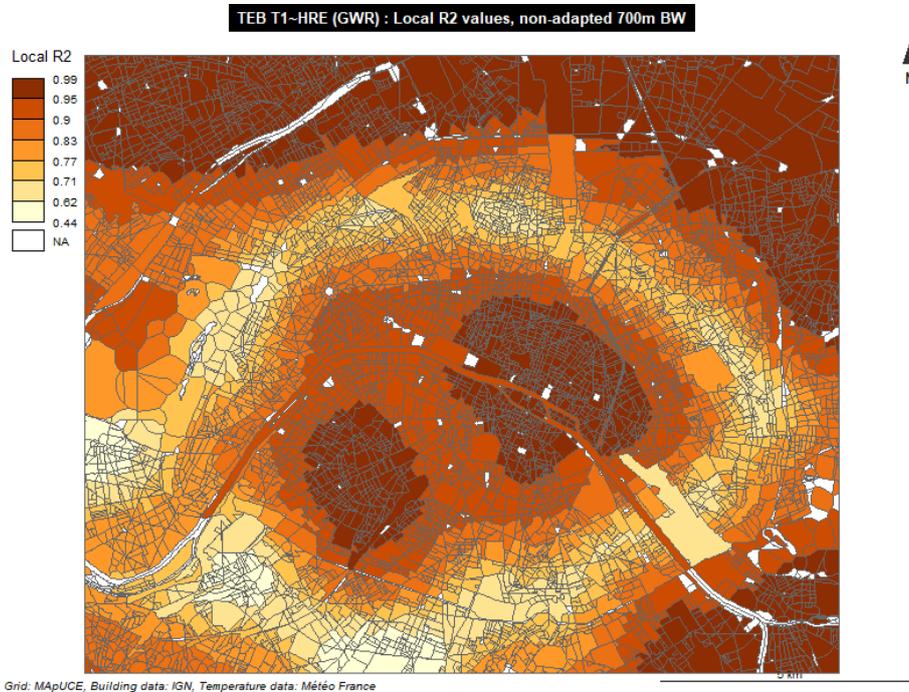
Ensuite nous regardons les valeurs de coefficients locaux pour la HRE :



**Figure 36 : Les valeurs de coefficient locales pour la HRE avec une bande passante non-adaptative de 700m.**

<sup>29</sup> Pour une explication plus complète de l'AIC et de l'AICc voir (Fotheringham, Brunsdon and Charlton, pp95-102).

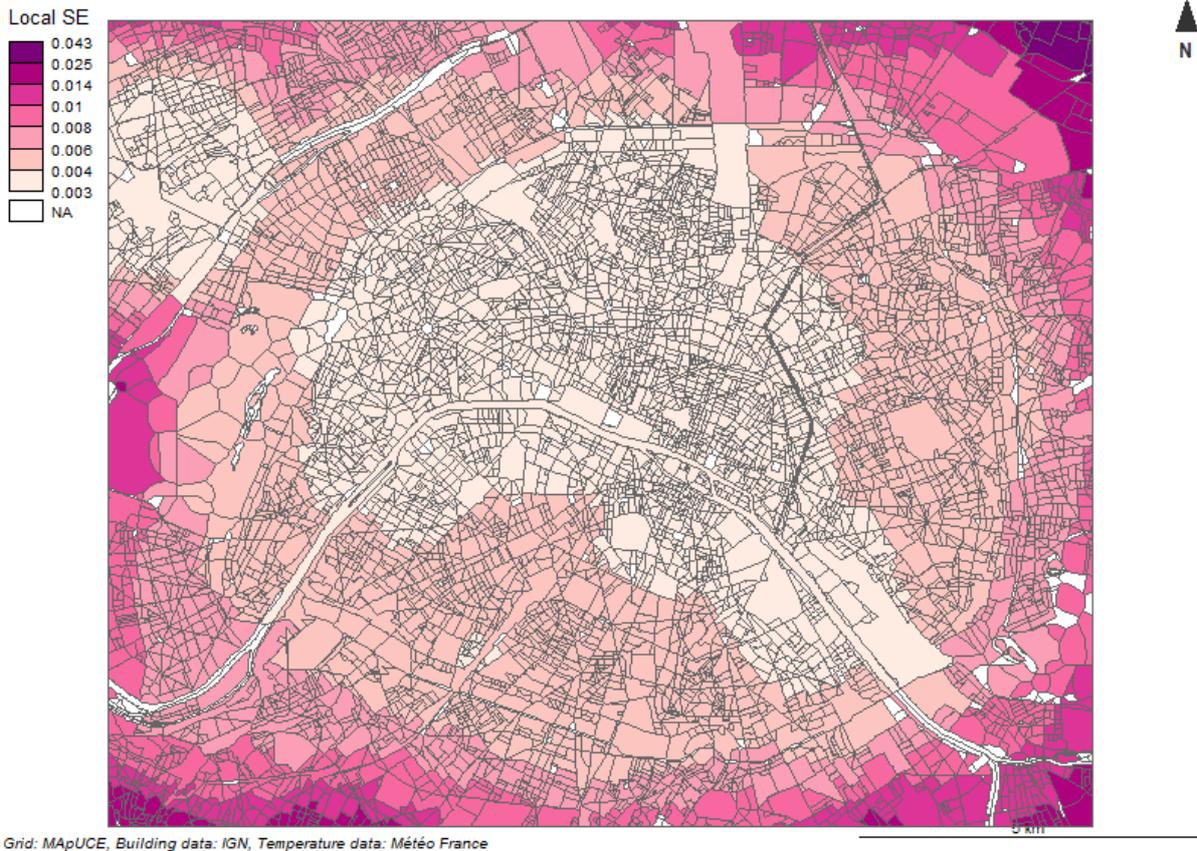
Le premier constat est que les coefficients apparaissent non stationnaires et varient entre - 0,019 et 0,16. Deuxièmement, la structure spatiale révèle que les coefficients sont faibles dans l'hypercentre de Paris, mais très forts dans certaines zones autour en rapprochant et en dépassant le périphérique. Pour expliquer au mieux cette répartition spatiale nous avons besoin de cartographier les R2 locaux.



**Figure 37 : La cartes des R2 locaux de la GWR entre les valeurs de TEB\_T1 (Stratégie 2) et celles de HRE.**

En comparant ces deux cartes, nous remarquons que notre fonction GWR sait très bien nous indiquer le changement de température expliqué par la HRE dans l'hypercentre, au sud de la Seine, les banlieues au nord de la zone d'étude et le coin du sud-est. En revanche, dans la plupart des zones où les coefficients sont forts, ce niveau de confiance est considérablement plus bas. Pour être plus sûr de ces résultats, nous les comparerons avec la carte des valeurs d'erreur standard.

### TEB T1~HRE (GWR) : Local Standard Error values, non-adapted 700m BW



**Figure 38 : La cartes des erreurs standards locales de la GWR entre les valeurs de TEB\_T1 (Stratégie 2) et celles de HRE.**

Les erreurs standard sont très proches de 0 sur une zone assez homogène au centre de la carte, et augmentent progressivement, mais faiblement vers les bords de la zone d'étude. Globalement, notre fonction GWR sait très bien indiquer le changement de température expliqué par la HRE au centre de la zone d'étude et un peu moins bien aux bords de la zone.

Nous constatons que notre rend bien compte de la relation entre température et HRE au centre de la zone d'étude, mais la carte de coefficients indique une grande hétérogénéité où les relations locales sont parfois faibles et inversement très fortes ailleurs. Comment interpréter ces divergences locales ? Ceci pourrait être dû à l'omission de variables locales, d'autres indicateurs rendraient certaines zones contextuellement différentes dans l'ensemble. En outre, cette hétérogénéité pourrait être d'ordre fonctionnel, ce qui veut dire que la relation entre la température et la hauteur des bâtiments n'est pas nécessairement linéaire partout. Peut-être l'altitude du sol sur lequel les bâtiments sont construits joue aussi un rôle ?

#### 2.3.4. Discussion des résultats

Nous avons établi que les corrélations locales entre la température et nos indicateurs choisis varient de manière hétérogène. Une conclusion qu'on peut tirer de cette étude est simplement une corrélation existe avec la morphologie urbaine, mais que nos indicateurs ne possèdent pas assez d'information pour nous le montrer selon une étude GWR. Néanmoins, les R2 locaux et les erreurs standards permettent de bien cibler le centre de Paris et ouvre la possibilité d'étudier cette zone et relever d'autres informations morphologiques à plus petite échelle qui nous renseignerait sur la relation entre les températures élevées de cette zone et ses caractéristiques particulières.

D'autres informations pourraient peut-être nous aider avec cette analyse, comme, par exemple, les matériaux de construction utilisés dans la composition des bâtiments, des altitudes différentes des bâtiments ou par moyenne dans chaque USR. Une autre difficulté de notre analyse est la différence de résolutions entre nos données : les mailles de Meso-NH sont de 650m \* 650m, alors que l'aire moyenne des USRs est de 19207,5m<sup>2</sup>, un écart considérable. On se demande si l'on avait des données de température de plus petite résolution quels seraient nos résultats ? Malheureusement, on ne peut tester cette hypothèse.

Nous n'excluons pas non plus les taux de pollution qui pourraient impacter les températures dans certaines zones, ou bien la consommation d'énergie et d'électricité de certains bâtiments. Le fait qu'il y ait une liste exhaustive (non-détaillé ici dans sa totalité) de facteurs qui pourraient influencer les ICUs est suffisant à dire que nos indicateurs, malgré les informations intéressantes qu'ils nous communiquent, ne nous révèlent pas une description complète de la relation entre la température et la morphologie urbaine.

## Troisième partie : Co-visualisation des indicateurs morphologiques et les données de température

### 3.1.1. Introduction

Nous avons analysé la composition morphologique de la zone d'étude à travers certains indicateurs ainsi que leurs relations avec la température. Maintenant le défi est de co-visualiser la température avec un ou d'autres indicateurs morphologiques. On pourrait se demander pourquoi il y a besoin de réaliser cette étape, quand on a déjà analysé nos indicateurs et la température ensemble ? Une réponse pourrait être que ces éléments co-existent ensemble dans une réalité complexe et, même si une analyse d'un ou plusieurs indicateurs pris séparément permet de mieux comprendre cette réalité, elle ne peut représenter les interactions complexes et constantes entre un grand nombre d'éléments. Évidemment, nous ne pouvons pas communiquer tous les résultats relevés de nos analyses de statistique précédent, mais nous cherchons à regrouper autant d'indicateurs possibles afin d'avoir une maquette du climat urbain qui permet l'interprétation visuelle de l'interaction entre autant d'indicateurs possibles.

Il est aussi impératif de mentionner que, puisque nous visualisons des éléments physiques (i.e. la température et le vent) qu'on ne peut pas voir, notre rendu sera composé de formes abstraites (cf : Figure 39). La visualisation abstraite de la météo est très ancienne dans l'histoire de l'humanité, et prend dans notre vie quotidienne chaque soir qu'on regarde la météo télévisée (Keeling, 2010). La présentation de données hétérogènes et scientifiques présente de nombreux défis : trouver des méthodes de visualiser des variables simulées ou des données observées peut être difficile, comme les liens entre certains phénomènes géographiques, plus précisément. En outre, il faut considérer combien de variables peut être visualisées simultanément sans produire des scènes de confusion, car il y a des limites de compréhension visuelle (Helbig et al., 2014, p.3768), comme cognitive. Dans l'idéal, il aurait été pertinent de réaliser un test visuel avec plusieurs individus afin de connaître empiriquement cette limite, mais ce n'était pas possible pendant la durée du stage. Nous nous contentons de réaliser de nombreux d'expérimentations visuelles et d'interagir avec les chercheurs de l'équipe pour améliorer ces rendus visuels.



**Figure 39 : Une carte du monde d'après la description de Ptolémée réalisée par Johannes Schnitzer d'ouvrage de Ptolémée intitulé Géographie traduit par Holle et publié en 1482. On note les têtes qui soufflent le vent, une très ancienne géovisualisation de la météo.<sup>30</sup>**

Notre visualisation doit se justifier à partir des analyses de statistique complétées auparavant. Pour récapituler, nous avons constaté que les indicateurs morphologiques, la BSF (Building Surface Fraction) et la HRE (Height of Roughness Elements) présentent des corrélations les plus intéressantes avec les données de température,  $TEB\_T1$  qui est, pour rappel, la température avec une résolution verticale entre 1m et 30m. Ce sont donc trois indicateurs physiques qui présentent des informations susceptibles d'intéresser des météorologues, des urbanistes, ou d'autres personnes de la communauté scientifique, notre public ciblé. Nous cherchons donc à représenter ces trois indicateurs dans un seul rendu qui communique leurs valeurs brutes afin qu'on puisse analyser leur interaction visuelle aussi clairement que possible.

Ensuite, nous nous interrogeons sur les dimensions du rendu, en 2D ou 3D. On remarque de suite qu'un rendu en 2D ne pourrait jamais clairement montrer les valeurs brutes de BSF et de HRE, les deux sont trop fortement auto-corrélées et partagent trop d'espace ensemble. Helbig et al. nous offre un conseil pour cette dilemme « *S'il est nécessaire à montrer plus qu'une variable en 2D à la fois, on devrait employer des objets basiques en 3D. Ainsi, une forme unique peut être définie pour chaque variable* » (ibid, p.3772). Effectivement, nous avons trois indicateurs à montrer à la fois dont deux qui sont fortement auto-corrélés et occupent la même espace de différents degrés. Une solution est donc de réaliser un rendu en 3D et présenter les trois indicateurs en trois formes différentes. La manière et la progression derrière cette solution seront présentées dans la section « méthodologie ».

<sup>30</sup> Image sourcée de Wikipédia : [https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolaus\\_Germanus](https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolaus_Germanus) (dernier accès : 1/09/2020). L'ouvrage-même peut être consulté à <https://archive.org/details/cosmographia00ptol/page/n25/mode/2up> (1/09/2020).

Nous avons donc décidé d'extruder les valeurs de BSF afin de leur attribuer une forme 3D. Cette approche

### 3.1.2. Méthodologie

Nous avons donc décidé d'extruder les valeurs de BSF afin de leur attribuer une forme 3D. Cette approche permet ce qui interprète notre modèle de leur distinguer par leur hauteur. Par la suite, nous avons testé le maillage d'USRs avec les USRs extrudées selon leurs valeurs de BSF. L'équation de l'extrusion est  $H = (x - \min(x)) * (\max(x) - \min(x))$  afin de normaliser les valeurs entre 1 et 0, puis multiplié le tout par un constant trouvé empiriquement. Ce qui nous a donné :

$$H = ((x - \min(x)) * (\max(x) - \min(x))) * C$$

Où H est la hauteur, x étant la valeur de l'indicateur (BSF) et C le constant. Pour illustrer cette méthode, nous prenons un exemple d'une zone sur la carte avec des valeurs de BSF très variées : la Défense.

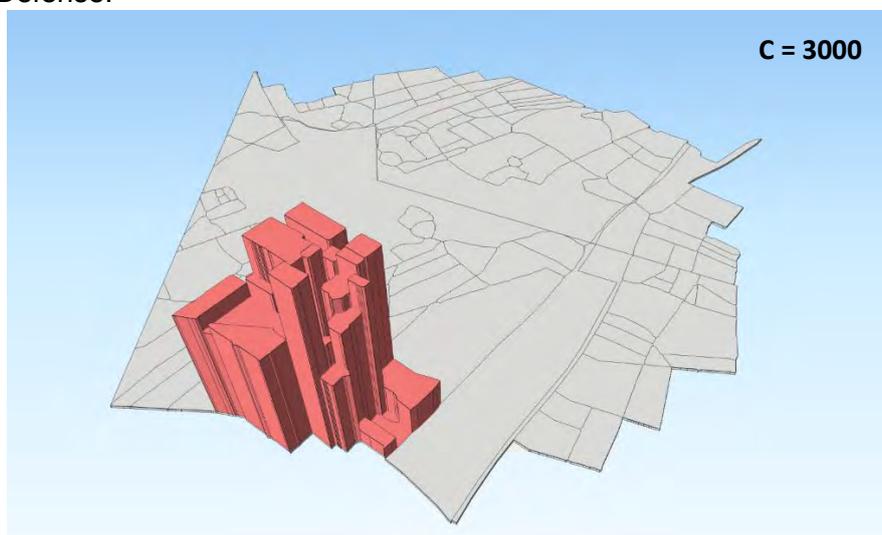


Figure 40 : La vue aérienne sur la Défense avec un échantillon de ses valeurs de BSF extrudées.

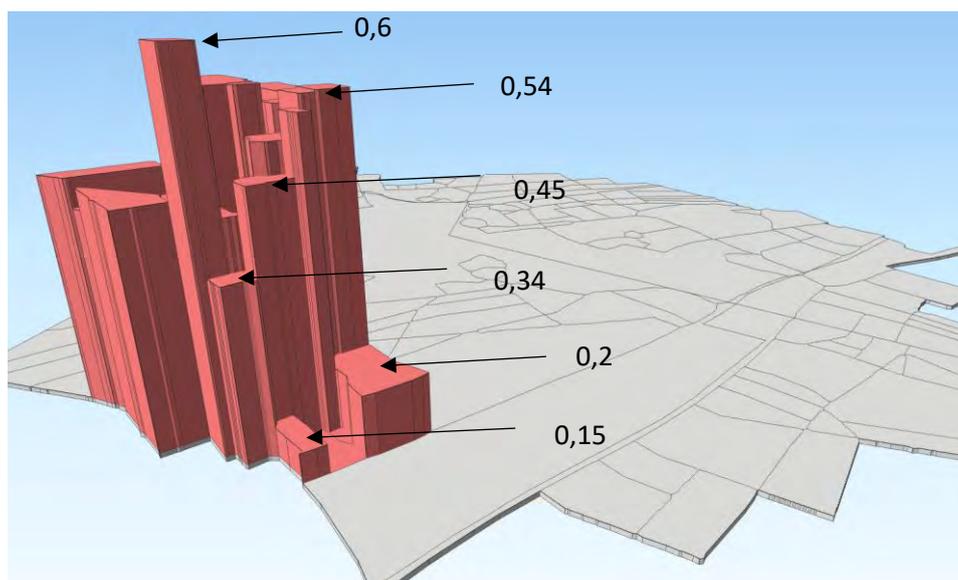
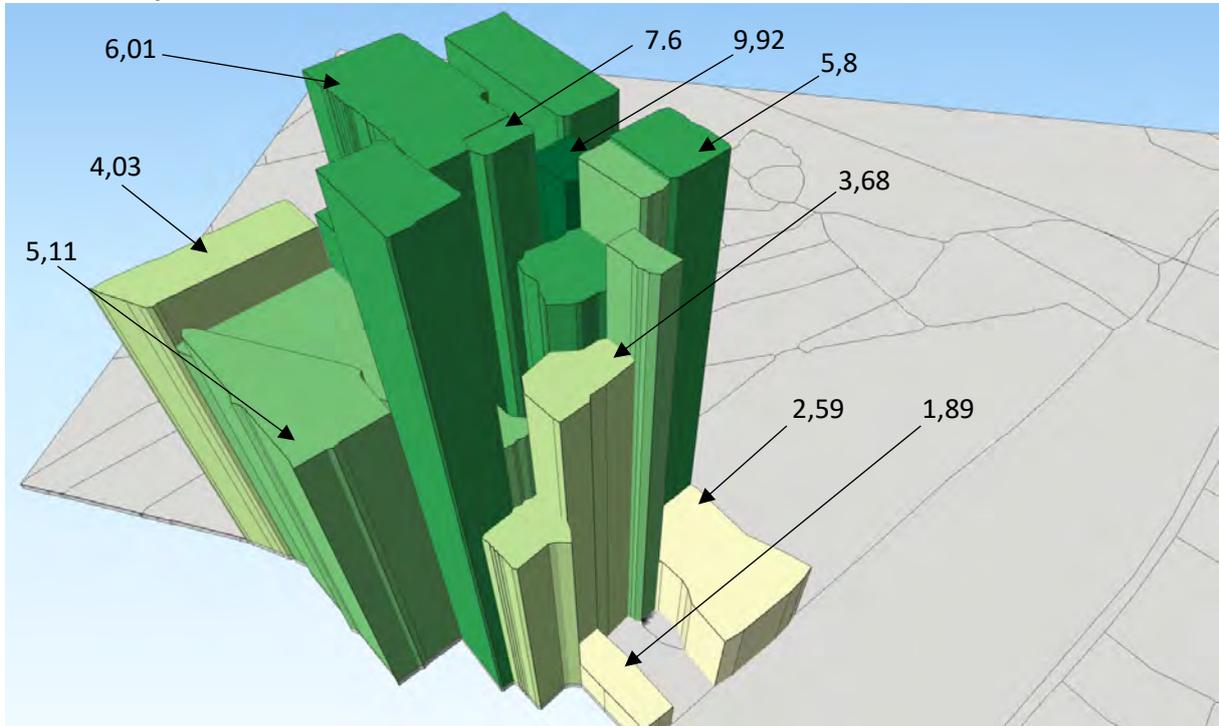


Figure 41 : L'Echantillon en profile avec une vue sur les différentes valeurs extrudées.

On peut donc voir une croissance exponentielle des valeurs de BSF extrudées, la différence de valeurs peut être donc exagérée par la constante de l'expression.

Nous avons ensuite classifié la HRE par-dessus la BSF avec une gamme de couleur en continu, jaune-vert avec la forte saturation de vert foncé indiquant des valeurs importantes de HRE, et jaune pâle ses valeurs faibles.

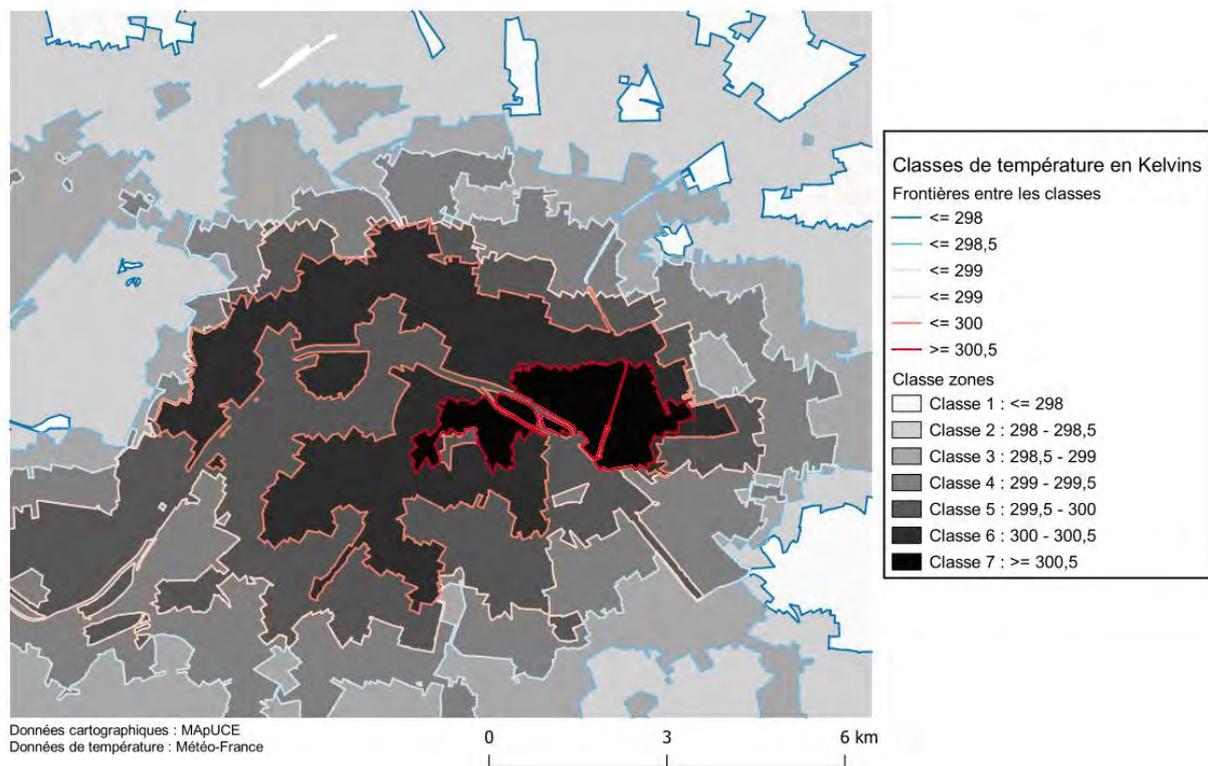


**Figure 42 : La HRE communiqué par la gamme de couleur jaune-vert avec des exemples de différentes valeurs de cet indicateur.**

Les différences subtiles entre les différentes valeurs de HRE ne peuvent être remarquées par seulement la couleur, mais certains écarts (1-3 jaune, 3-4 vert claire, 5-7 vert moyenne,  $\geq 8$  vert foncé) se distinguent bien (cf : Figure 42). On note aussi qu'en générale des valeurs importantes de BSF correspondent aux valeurs fortes de HRE, mais qu'il y a aussi des exceptions. Comme l'USR qui possède la valeur la plus élevée de HRE de ses voisins, mais non la BSF la plus importante. Ceci représente un guide crucial pour l'utilisateur, que les valeurs brutes de ces deux indicateurs se correspondent en générale, mais que les différences ponctuelles sont présentes dans la zone d'étude.

Finalement, nous avons rajouté les différentes classes de température délimitées par des couches de lignes, ce qui donne un effet similaire aux courbes de niveau d'altitude. Les valeurs de température sont communiquées par une gamme de couleur divergente rouge-blanc-bleu, où rouge représente les températures les plus élevées et bleu les plus basses (cf : Figure 43). Ce que l'utilisateur doit comprendre est que la température monte ou descende globalement par  $0,5^{\circ}\text{K}$  en traversant les frontières entre les classes. Ce classement permet aux météorologues ou d'autres acteurs concernés par l'urbanisation et les ICUs d'isoler les regroupements homogènes de température et de comparer les caractéristiques morphologiques à l'intérieur de ces frontières, de voir à la fois leurs généralités et leurs particularités.

## Zones de température homogènes séparées par des frontières entre ces classes



**Figure 43 : Les classes de température séparées par des frontières.**

Pour avoir une perspective différente sur la zone, nous avons aussi restructuré le maillage en agrégeant les USRs dans une grille d'hexagones. Un désavantage du maillage des USRs, d'un point de vue d'analyse visuelle, est les formes uniques et multivariées des USRs crée des bruits qui empêchent l'interprétation des valeurs brutes des indicateurs qui sont présentés à travers ces mailles. Le point fort d'un maillage hexagonal est de normaliser les informations stockées dans les USRs afin que des différences de valeurs puissent être remarquées plus facilement, car l'œil humain n'a pas à réparer les différentes formes uniques de chaque USR, donc il perçoit plus rapidement les valeurs des mailles. Géométriquement parlant, l'hexagone offre certains avantages aussi : de l'isopérimétrie (une forme géométrique plane qui maximise son aire avec un périmètre fixé), des voisins équidistants (et plus nombreux qu'une grille triangulaire ou quadrangulaire par exemple) et une connectivité uniforme (Luo et al. 2019, p.1). Cette méthode est également utilisée de plus en plus pour montrer les densités de population à l'intérieur de certaines limites administratives afin d'identifier des densités importantes qui seraient autrement inaperçues (Spangrud, 2015)<sup>31</sup>.

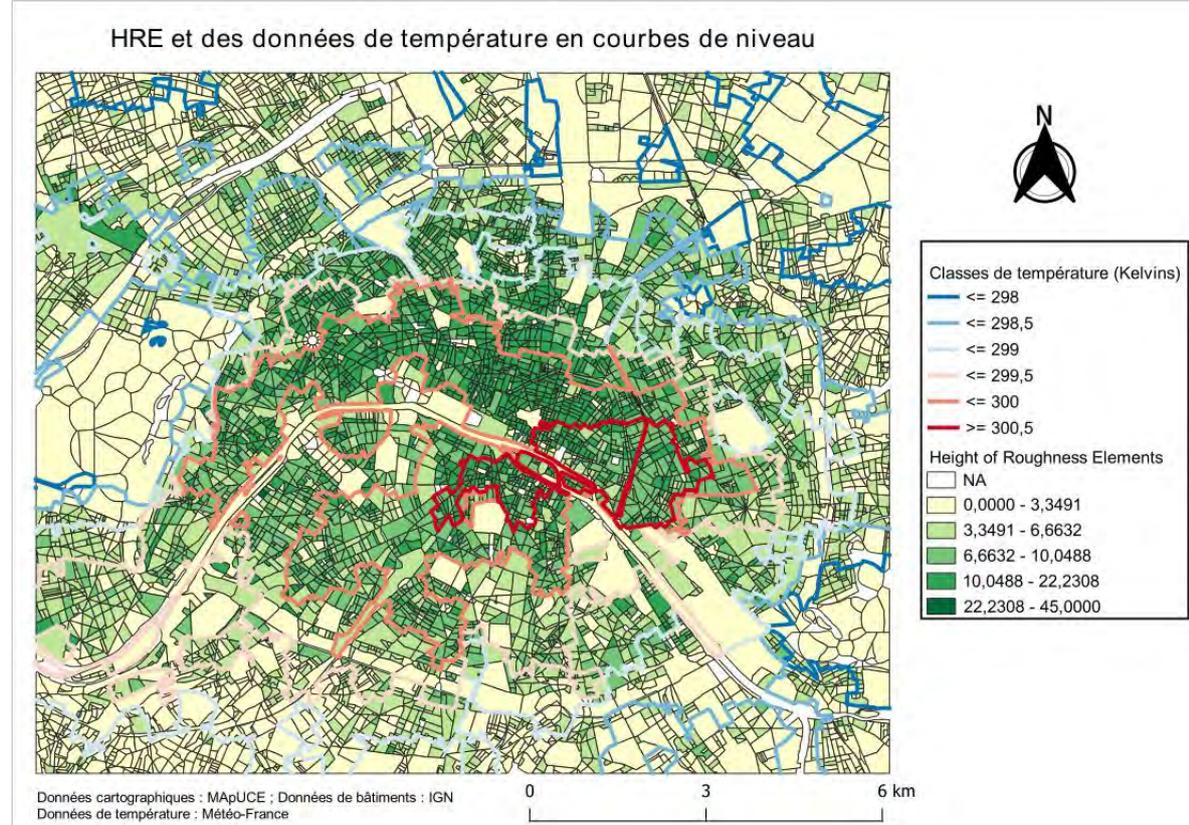
Nous avons testé une grille d'hexagones où chaque maille avait la même largeur de 650m que les grilles de TEB\_T1, ainsi qu'un autre maillage d'hexagones avec des aires au plus proches de l'aire moyenne des USRs possible : 19818,4m<sup>2</sup> (moyenne réelle des USRs : 19207,5m<sup>2</sup>)<sup>32</sup>. Les mêmes principes pour le maillage d'USRs étaient respectés pour les maillages hexagonaux.

<sup>31</sup> <https://medium.com/esri-insider/thematic-mapping-with-hexagons-61f995c0e795> (dernier accès : 1/09/2020).

<sup>32</sup> Plusieurs maillages hexagonaux de plus petites mailles ont été testés, mais agrégation des données des USRs étaient géométriquement impossible, donc l'aire de 19818,4m<sup>2</sup> pour les mailles hexagonales a été trouvée d'être la plus proche possible à la moyenne. Les tests ont été réalisés empiriquement.

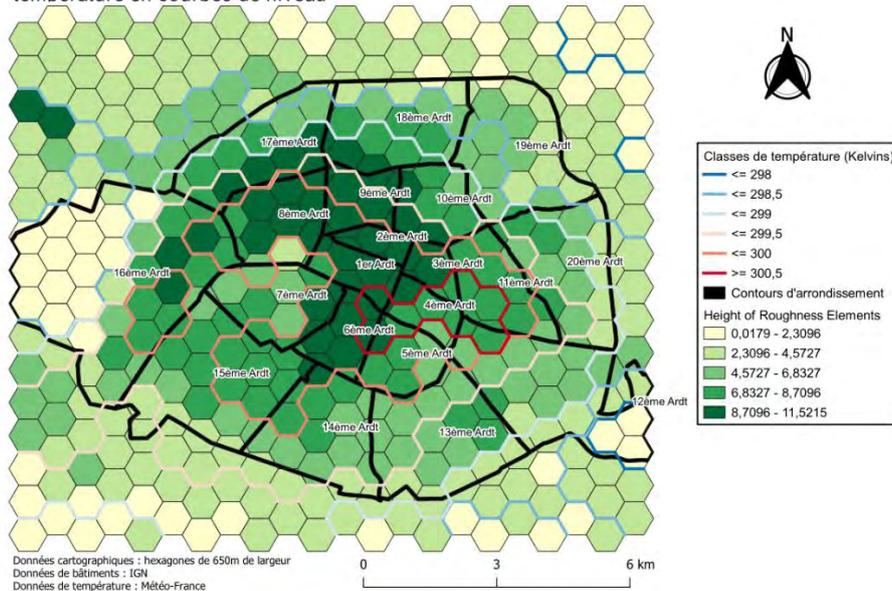
### 3.1.3. Résultats

Avant de montrer les résultats visuels des rendus en 3D, nous allons exposer les différents rendus en 2D comme une introduction globale et les limites de ces dimensions.



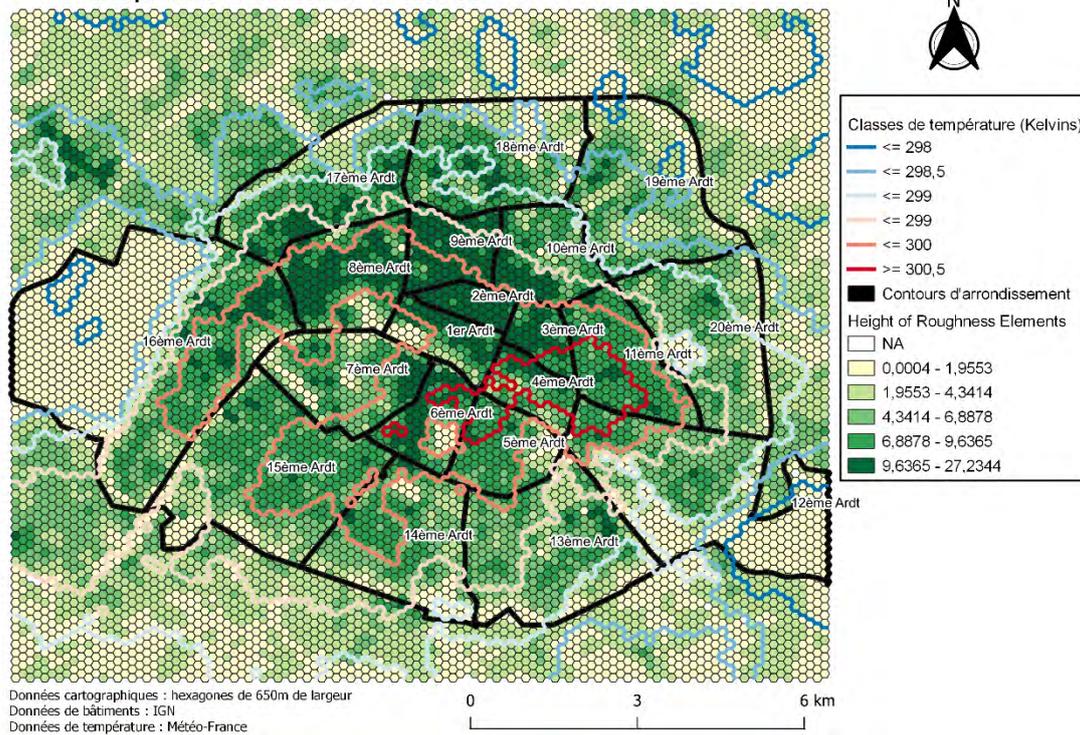
**Figure 44 : Carte en 2D du maillage des USRs de MApUCE avec la température en courbes de niveau. Il est clair que l'intégration du BSF dans ce rendu serait très difficile voire impossible.**

Maillage de hexagones de 650m de large, HRE et des données de température en courbes de niveau



**Figure 45 : Carte en 2D du maillage avec des hexagones de 650m de large**

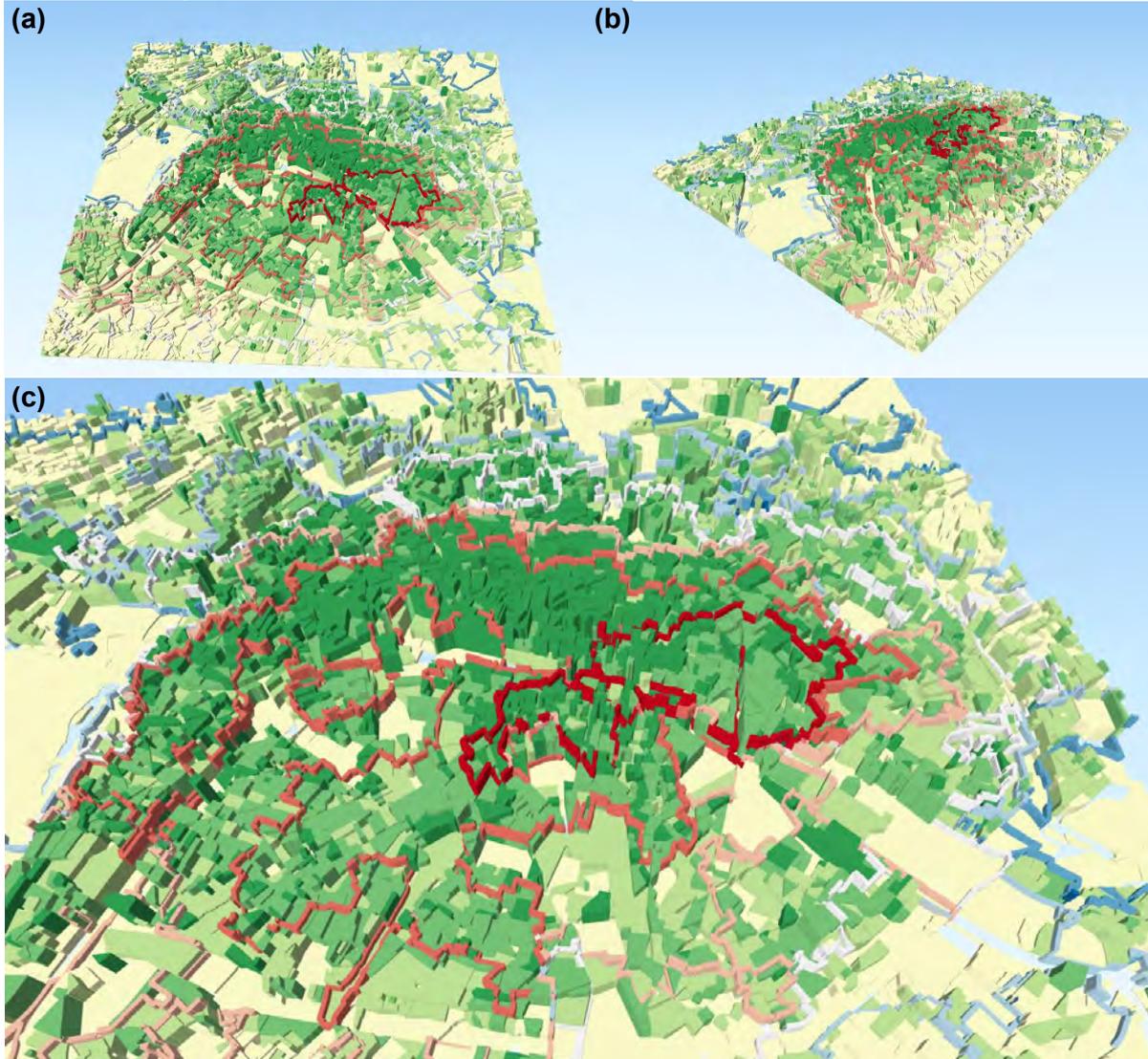
**Maillage de hexagones de 19.818,4m<sup>2</sup>, HRE et des données de température en courbes de niveau**



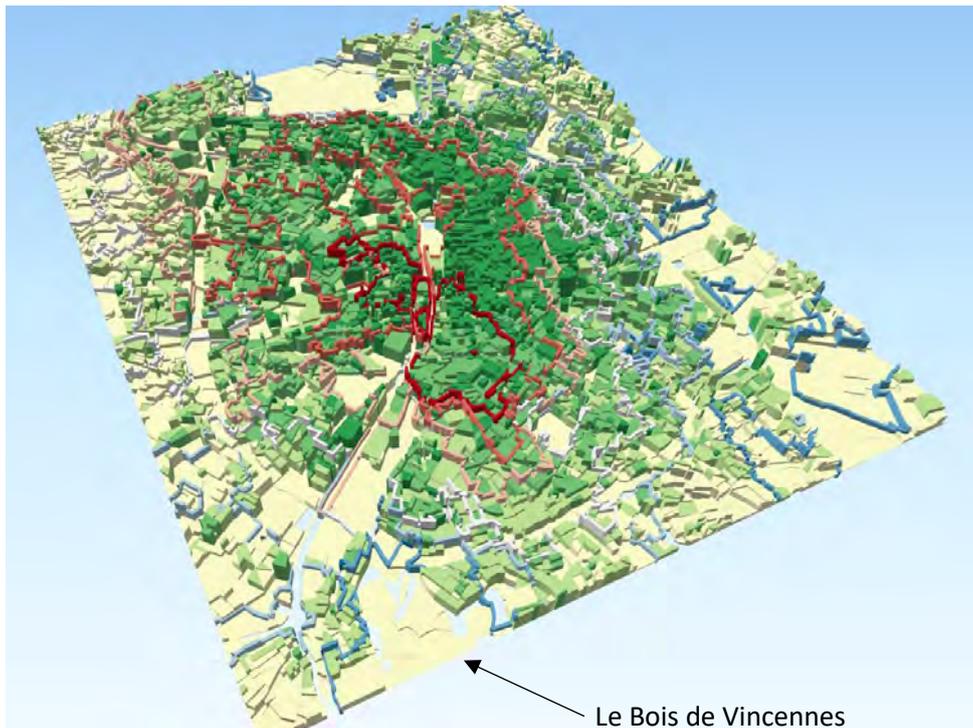
**Figure 46 : Carte en 2D des hexagones d'aires de 19.818,4m<sup>2</sup>**

Le choix de la gamme de couleur représentant la HRE est pour que l'œil puisse la bien distinguer ses valeurs contre les courbes de température. Certaines frontières de température seraient perdues dans le maillage si l'on employait une gamme contenant du bleu, du rouge ou du violet, ce qui réduit notre choix assez sévèrement. Même ces couleurs, du bleu-clair contre vert n'est pas facile à distinguer, ce qui souligne le besoin de cartographier nos indicateurs en 3D.

Nous commençons avec le modèle 3D avec un maillage en USRs de MAPUCE.

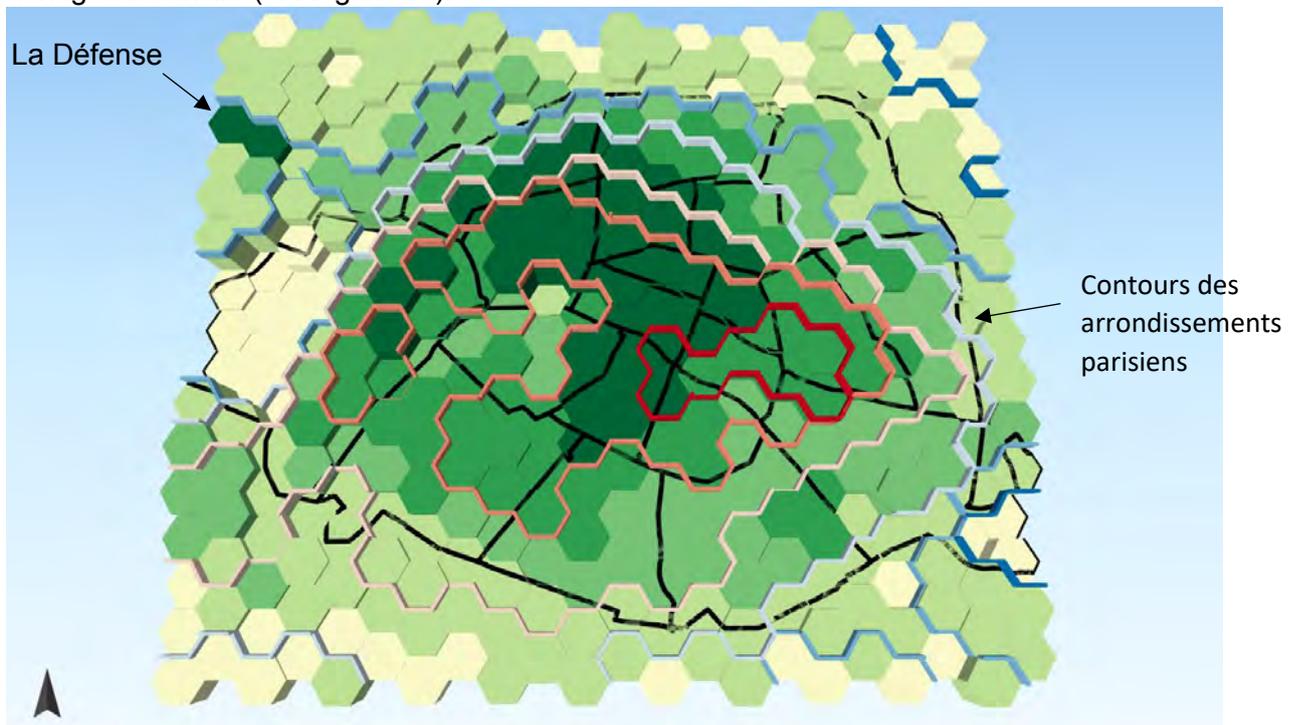


**Figure 47 :** (a) Visualisations 3D de la zone d'étude avec les mailles de MAPUCE extrudée selon leurs valeurs de BSF, les valeurs de HRE sont classées par une gamme de couleur en vert-jaune, les classes de température sont délimitées par les courbes de niveau et classées selon une gamme de couleur divergente bleu-rouge. ; (b) Vue sur la zone du sud-ouest, le grand espace jaune étant le Bois de Boulogne. ; (c) Vue sur l'hypercentre où les températures sont les plus élevées.



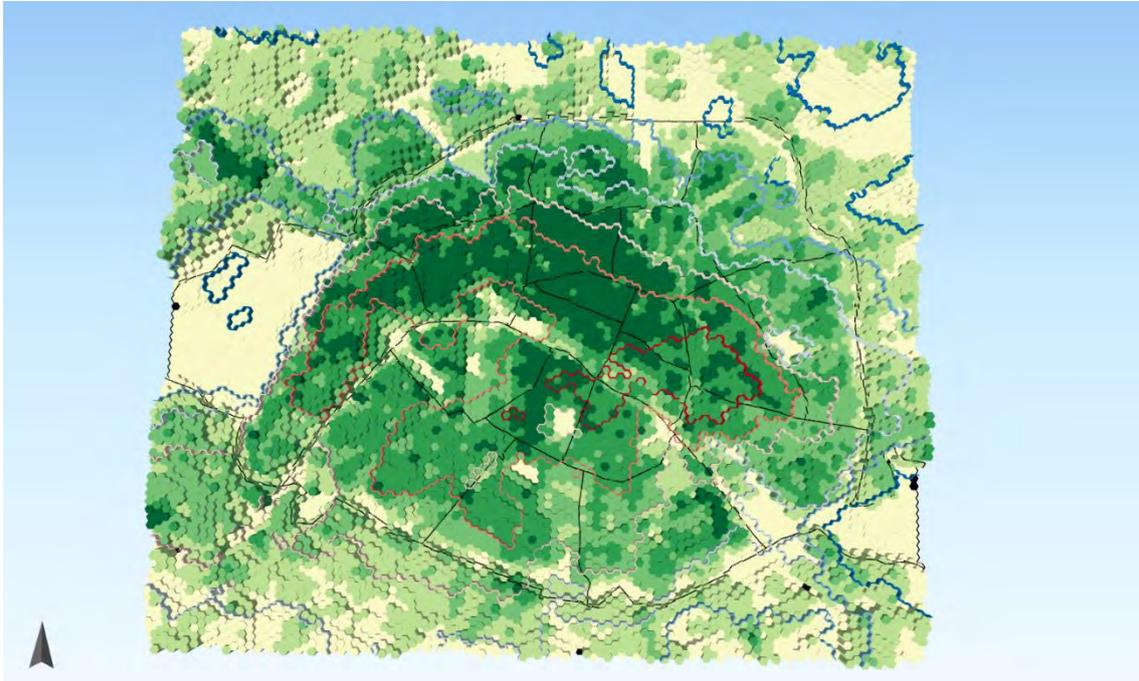
**Figure 48 : Vue sur la zone du sud-est avec le Bois de Vincennes au premier plan où les températures sont parmi les plus fraîches.**

On peut remarquer que la forme urbaine ressort bien avec les couleurs de vert foncé délimitant le centre-ville et la densité importante au nord de la rive droite de la Seine. En revanche, la forme naturellement complexe de cette morphologie rend le réperage des valeurs fortes et faibles des indicateurs assez difficile. Ce problème partiellement rectifié par le maillage hexagonal suivant (cf : Figure 49).



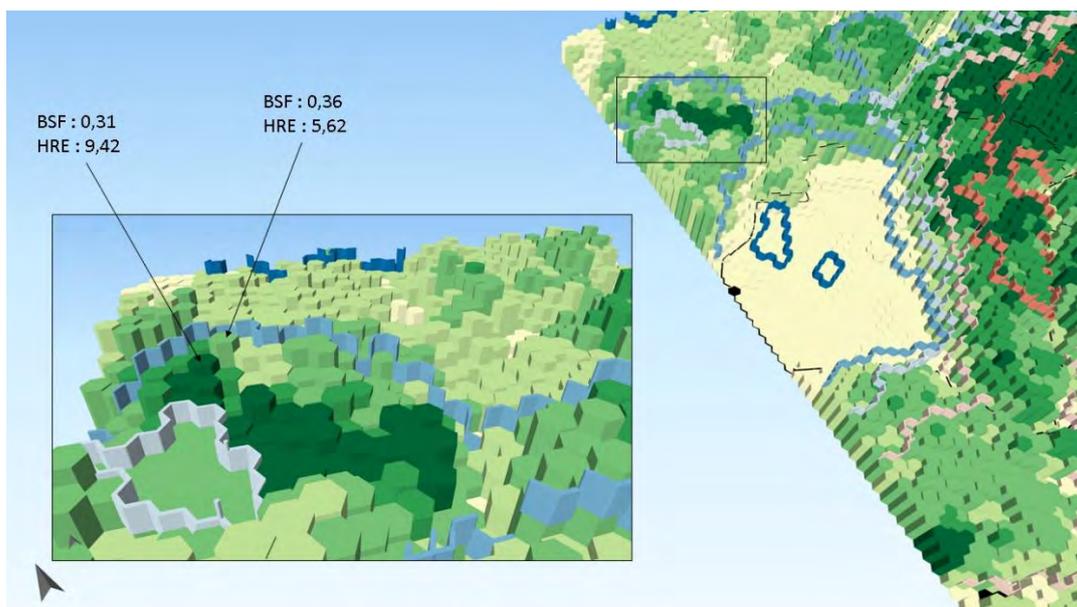
**Figure 49 : Vue aérienne du maillage d'hexagones de 650m de large.**

Les hexagones de 650m de large permet l'utilisateur de mieux identifier les valeurs individuelles des indicateurs pour chaque, mais la forme de la morphologie urbaine est presque perdue par ce rendu, ce qui a nécessité le placement des contours d'arrondissements pour que l'utilisateur puisse identifier Paris intramuros et percevoir où commencent les banlieues. Cet aspect est mieux retrouvé avec des mailles de 19.818,4m<sup>2</sup> (cf : Figure 47).

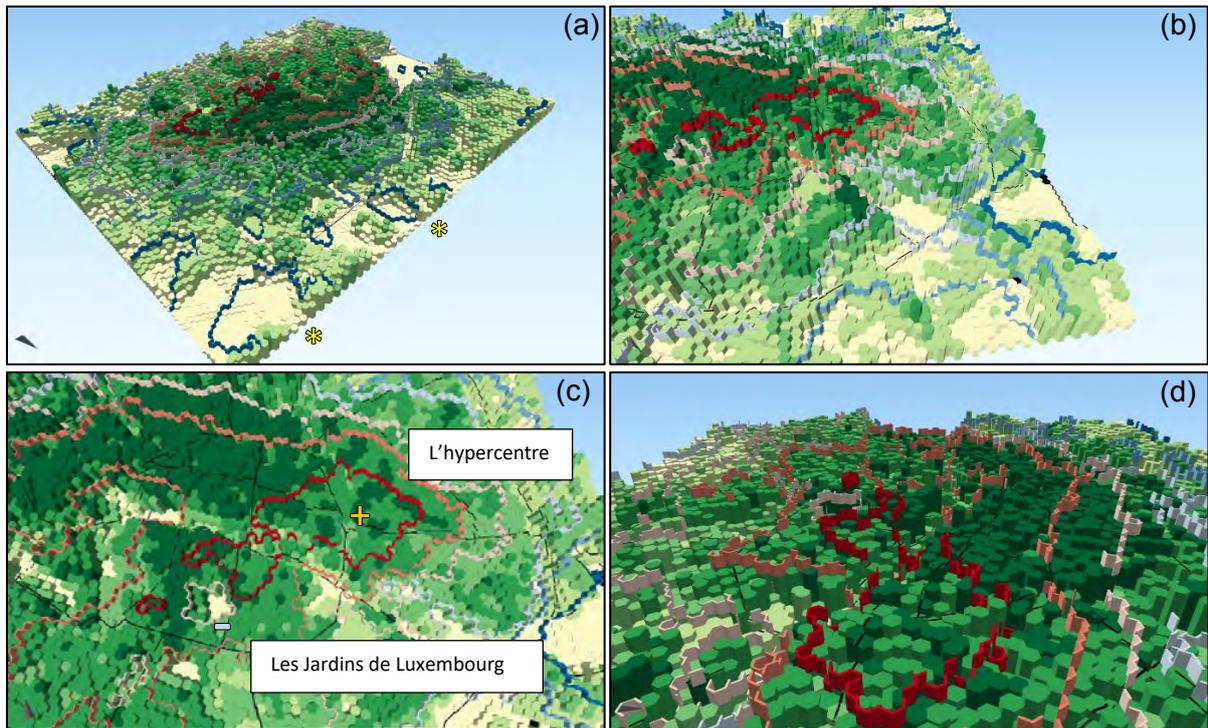


**Figure 50 : Vue aérienne du modèle en 3D composé de mailles de 19.818,4m<sup>2</sup>**

Les contours d'arrondissement sont maintenus, mais certaines formes de la morphologie illustrée par la HRE se distinguent un peu plus comme le maillage des USRs (cf : Figures 47 et 48). En regardant la distribution des valeurs hétérogènes dans certaines zones, la hauteur de la BSF et les couleurs de HRE permettent des comparaisons fines des voisins proches.



**Figure 51 : Vue de l'ouest sur la Défense. (a) On remarque les différences entre les valeurs de BSF extrudées et celles de HRE colorées. Le vert foncé indique une mesure importante de HRE, alors que la hauteur des hexagones extrudées mesure la valeur de BSF.**



**Figure 52 :** (a) Vue du nord-est, on remarque des points de bascule où la température descend\* au même point que la densité de la morphologie se diminue. ; (b) Vue sur le coin du sud-est où les températures dans le Bois des Vincennes sont parmi les plus fraîches de la zone d'étude. Même si l'on a décidé de ne pas intégrer la PSF (Pervious Surface Fraction) dans le rendu, la manque total des extrusions délimité par la frontière bleue foncée nous donne un indice d'une couverture importante de végétation. ; (c) Vue sur le centre où on remarque que au niveau des Jardins de Luxembourg (-) la température descend globalement par 1° de 300,5K à 299,5K° par rapport à la zone la plus chaude(+); (d) Vue sur l'hypercentre, de loin (cf : 49c) la frontière de température paraît en 2D, mais vu de près elle paraît comme des panneaux fins, avec l'altitude de chaque panneau réglée au sommet de l'hexagone qu'il délimite. Parfois les panneaux obturent des hexagones de certains angle et l'utilisateur doit manipuler la vue pour révéler ces hexagones cachées.

On peut voir les changements de valeur et les variations entre la BSF et la HRE plus finement, et les températures les plus basses coïncident avec une forte réduction de la densité de la morphologie urbaine.

### 3.1.4. Discussion des résultats

Nous avons constaté qu'un maillage d'hexagones permet de mieux cerner les valeurs des indicateurs morphologiques, et de les comparer selon certaines zones de la ville. Ce qu'on perd avec un rendu moins fidèle aux formes uniques du tissu urbain, on gagne en analyse visuelle de la morphologie. Le maillage de grandes hexagones de 650m de large simplifie énormément la complexité de la topologie morphologique et permet une analyse rapide de la zone d'étude, mais la taille très importante de ces mailles rase presque toutes les caractéristiques géographiques de la ville et la rend presque méconnaissable. Le pouvoir de l'utilisateur de s'orienter sur la zone selon la carte est très affaibli et presque impossible sans les contours des arrondissements de Paris. Les plus petites hexagones rapprochant la surface moyenne des USRs semblent d'être un bon compromis, car elles permettent une analyse plus rapide de la zone sans alourdir le rendu de bruits et favorisent une comparaison plus fine entre les valeurs de BSF et de HRE. A ce stade, nous pouvons faire notre choix de ce rendu comme

notre modèle de co-visualisation préféré. Même si ce rendu ne peut pas communiquer toutes les informations pertinentes à l'analyse des ICUs, ils expriment clairement les points clés des indicateurs morphologiques de notre sélection et leur interaction avec la température.

NB : les expériences de géovisualisation ne sont pas terminées, et d'autres rendus pourraient être présentés au moment de la soutenance de ce mémoire.

## Conclusion

Dans ce travail nous avons étudié la morphologie urbaine de Paris et ses proches banlieues afin de savoir si un lien existe ses caractéristiques et les îlots de chaleur urbains. A la réalisation de cet objectif, nous avons mené trois analyses de statistique sur différents aspects de cette morphologie à travers quatre indicateurs morphologiques : la BSF (Building Surface Fraction), la HRE (Height of Roughness Elements), l'ISF (Impervious Surface Fraction) et la PSF (Pervious Surface Fraction). Nous avons également exploré les liens statistiques entre ces indicateurs et nos données de température. A la complétion de ces analyses, nous avons retenu la BSF et la HRE afin de les co-visualiser avec la température.

Au terme d'une étude sur la co-visualisation de ces mesures, nous avons identifié le besoin d'intégrer ces indicateurs dans une visualisation en 3D ce qui permet la représentation de chaque indicateur individuel par une forme unique et avec plus de perspective et exposition de tous les éléments que ce qui serait impossible dans un rendu en 2D. Notre choix de couleurs et de formes permet à l'utilisateur de distinguer chaque indicateur, mais aussi d'observer leurs interactions.

Nous pouvons également confirmer notre hypothèse au départ : qu'une corrélation positive existe entre la morphologie urbaine et le climat. Selon les résultats de notre analyse « GWR », cette relation est hétérogène parmi les différentes zones de la ville de Paris, et difficilement exprimable selon les données. Des facteurs possibles qui pourraient décrire cette hétérogénéité sont : la différence de résolution entre les maillages de MApUCE et de Meso-NH, le manque très probable d'autres informations comme la performance énergétique des bâtiments, leur consommation d'électricité, les taux et quantités de pollution, les mesures d'albédo et de l'inertie thermique des surfaces entre autres. Néanmoins, les résultats de la « GWR » permettent d'isoler le centre de Paris afin de potentiellement délimiter certaines LCZs et d'analyser la relation entre morphologie et température à micro-échelle.

Ce mémoire de recherche est bientôt terminé, mais les pistes d'expérimentation visuelles ne le sont pas, et d'autres co-visualisations seront peut-être présentées d'ici au jour de la soutenance. Un répertoire a été spécialement créé pour stocker ces expériences en ligne, dont les rendus peuvent être consulter à l'adresse suivant :

<https://drive.google.com/drive/folders/16cXtRUzMn-p7ec5KTF1mf-t3TJ5HKgK8?usp=sharing>

## Perspectives

Une information manquante des analyses statistiques est la possibilité des liens et relations entre les indicateurs morphologiques. Une analyse en composantes principales (ACP) aurait pu nous apporter d'autres perspectives à notre analyse, mais nous avons opté de ne pas la mener à cause du manque de temps vers la fin du stage dont on avait besoin pour réaliser nos analyses de covisualisation.

La contrainte de la durée du stage a également empêché la réalisation des tests de sensibilité pour l'analyse d'auto-corrélation spatiale et celle de GWR. Pour tester les limites des résultats obtenus par l'analyse de l'I de Moran local, nous aurait pu trouver la valeur de seuil qui définit les formes de regroupements homogènes en élargissant progressivement la zone d'étude. Le package R *spdep* sous lequel les analyses d'I local ont été produites ne possède pas les moyens de réaliser ces tests, à nos connaissances de ce jour, et nous ne nous disposions pas du temps nécessaire à rechercher une autre solution. Pour la GWR, nous avons étudié la possibilité de mener des tests selon la méthodologie de « One-factor-at-a-time » afin de recueillir et analyser les différentes fonctions de pondération et de largeur de bande-passante, mais cette piste n'a pas été explorée davantage.

Pour la covisualisation, nous n'avons pas encore tout à fait terminé la recherche, et d'autres rendus pourraient être présentés au jour de la soutenance. Néanmoins, une approche optimisée serait de créer un catalogue de visualisations qui serait intégré dans un test visuel qui aurait pour objectif de sélectionner le meilleur rendu, mais nous n'avons pas eu suffisamment de temps pour le mettre en place.

## Bilan personnel du stage

Ce stage a commencé normalement le 9 mars au sein de LASTIG, les échanges initiaux avec mes maîtres de stage étaient très agréables, ainsi que ceux avec les collègues au laboratoire. Ce bon début a été brutalement interrompu par l'aggravement de la crise du covid-19 et le confinement conséquentiel. Le reste du stage s'est passé en télétravail, et les échanges entre mes maîtres de stage et des collègues par visioconférence.

Après le choc initial de cet événement inédit, on a pu bien s'adapter au rythme du travail chez soi, avec des réunions hebdomadaires entre moi et Paul Chapron, des réunions de toute l'équipe GEOVIS, et celles composées de moi, Paul, Sidonie Christophe et Jacques Gautier. L'esprit de ces équipes est très fort, donc le stage s'est déroulé dans des bonnes conditions, même si le confinement n'était pas idéal, nous avons pu bien travailler ensemble.

Le stage m'a aussi permis d'approfondir mes compétences et connaissances du langage de programmation R et du logiciel R studio, ce qui était une expérience très enrichissante. Même si mes scripts sont moins factorisés qu'ils devraient l'être, je me sens que j'ai fait du progrès en programmation et que je deviens progressivement plus autonome, sachant que j'ai toujours énormément à apprendre en programmation et en algorithmie, ce stage m'a donné le désir d'aller plus loin. Je suis désormais bien plus à l'aise dans l'analyse statistique avec ce langage que j'ai découvert avec David Sheeren et Laurant Jégou en formation à l'ENSAT et à l'Université de Toulouse Jean-Jaurès.

Également, j'ai appris à mieux manipuler le plug-in Qgis2threejs du QGIS et de produire les rendus en 3D plus rapidement et finement, après le découvert initial de ce plug-in pendant ma formation dans le Master SIGMA à l'Université de Toulouse Jean-Jaurès avec Sébastien Le Corre. C'était aussi un grand découvert de la science et méthodologie de géovisualisation dont je connaissais vaguement, mais pas dans le fond. Je n'étais pas aussi conscient des principes de ce qu'on veut montrer et comment on veut le faire dans un rendu, et comment ces principes sont fondamentaux dans le domaine de géovisualisation, même s'ils paraissent simples.

Malgré la crise du coronavirus, mon stage était une expérience très enrichissante, très positive et m'a donné plus de goût pour la recherche en sciences de géographie.

## Annexes

Ces annexes ne sont pas exhaustives. Pour plus de rendus, graphiques, scripts R etc ... Le github [https://github.com/LukeKR84/indicateurs\\_UHI](https://github.com/LukeKR84/indicateurs_UHI) peut être exploiter.

## Bibliographie

### Ouvrages

Feuillet, T. Cossart, et E. Commenges, H. (2019) *Manuel de géographie quantitative : Concepts, outils, méthodes*. Armand Colin.

Fotheringham, A. S., Brunson, C. and Charlton, M. (2002) *Geographically Weighted Regression: the analysis of spatially varying relationships*. John Wiley & Sons, Ltd.

### Articles et rapports

Anselin L., 1995, "Local Indicators of Spatial Association – LISA", *Geographical Analysis*, 27(2): 93-115.

Anselin L., "The Moran Scatterplot as an ESDA Tool to Assess Local Instability in Spatial Association" in Fischer, M. et al. (1996) *Spatial Analytical Perspectives on GIS*. Taylor & Francis.

Bernabé, Anne, et al., Dec. 2015. Radiative properties of the urban fabric derived from surface form analysis: A simplified solar balance model. (*Solar Energy*. 122.) pp. 156–168. issn: 0038092X. doi: 10.1016/j.solener.2015.08.031.  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X15004673>.

Berghauser-Pont, I. Haupt, P. The spacemate: Density and the Typo-morphology of the Urban Fabric, *Nordisk Arkitekturforskning (Nord Journal of Architectural Research)* 4 (2005) 55–68.

Besançon, L., Dragicevic, P., La Différence Significative entre Valeurs p et Intervalles de Confiance. *29ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, AFIHM*, Aug 2017, Poitiers, France. pp.10. hal-01562281v2

Bigorgne, J. Alba, D. et Blancot, C. « Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris ». *APUR*, décembre 2012.

Lac, C., Chaboureau, P., Masson, V., Pinty, P., Tulet, P., et al.. (2018) Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development, European Geosciences Union*, 11, pp.1929-1969. 10.5194/gmd-11-1929-2018. hal-01712969.

Emanuel, K. A., (1986) "Overview and definition of mesoscale meteorology. Mesoscale Meteorology and Forecasting". P. Ray, Ed., *Amer. Meteor. Soc.*

Geary, R.C., (1954), "The contiguity ratio and statistical mapping". *The Incorporated Statistician*, vol.5, n°3, pp.115–145.

Getis, A., and K. Ord (1992). "The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics." *Geographical Analysis* 24, pp189-206.

Keeling, S.J. (2010) "Visualization of the weather-past and present". *Meteorol Appl* 17(2):126–133. doi:[10.1002/met.208](https://doi.org/10.1002/met.208)

Luo, J., Zhang, W., Su, J., and Xiang, F. (2019) "Hexagonal Convolutional Neural Networks for Hexagonal Grids," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 142738-142749, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2944766.

Masson, V., Heldens, H., Bocher, E., Bonhomme, M., Bucher, B., Burmeister, C., de Munck, C., Esch, T., Hildalgo, J., Kanani-Sühring, F., Kwok, Y-T, Lemonsu, A., Lévy, J-P., Maronga, B., Pavlik, D., Petit, G., See, L., Schoetter, R., Tornay, N., Votsis, A., Zeidler, J. "City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges" in *Urban Climate* 31 (2020).

Masson, V., (2000) A Physically-based scheme for the Urban Energy Budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol.*, **94**, 357-397.

Moran, P.A.P., (1950), "Notes on continuous stochastic phenomena", *Biometrika*, Vol. 37, n°1/2, pp. 17-23.

Orlanski, I., (1975) "A rational subdivision of scales for atmospheric processes." *Bull. Amer. Meteor. Soc.*. 56. 527–530.

Petit, G. et Bocher, E. La base de données MApUCE : focus sur les données socio-économiques. 2<sup>ème</sup> Atelier Géo-Visu. Toulouse, 05/02/2019.

Pinson, L., Ruas, A., Masson, V., Chancibault, K., Reconstruction de l'objet canicule : modélisation et représentation graphique. SAGEO 2015, 11<sup>ème</sup> Conférence internationale Spatial Analysis and GEomatics, Nov 2015, Hammamet, Tunisie. *Actes de la 11<sup>ème</sup> Conférence internationale Spatial Analysis and GEomatics*, 13p, 2015. <hal-01476071>

Rodler, A. and Leduc T. Local climate zone approach on local and micro scales: Dividing the urban open space. *Urban Climate* 28 (2019).

Seipel, S., & Lim, N. J., (2017) "Color map design for visualization in flood risk assessment", *International Journal of Geographical Information Science*, 31:11, 2286-2309, DOI: 10.1080/13658816.2017.1349318.

Stewart, I.D. and Oke, T.R. "Local Climate Zones for Urban Temperature Studies". *American Meteorological Society*, 2012.

Tobler, W. (1970) "A computer movie simulating urban growth in the Detroit region", *Economic Geography*, vol. 46, n°2, pp234-240.

Sites web

ERA-NET - <http://www.france-europe-innovation.fr/era-net.php>

Geoclimate chain : <https://github.com/orbisgis/geoclimate>

GIEC – <http://www.ipcc.ch>

IGN - <http://www.ign.fr/>

LASTIG - <https://www.umr-lastig.fr/>

JPI NET - <http://www.jpi-climate.eu/home>

URCLIM - <http://urclim.prod.lamp.cnrs.fr/>

Site officiel de la ville de Paris concernant des informations caniculaires -  
<https://www.paris.fr/pages/la-canicule-5469/>

### Articles de presse

Beiser, V., Feeling the Heat? Blame Concrete. *Time*, 20/08/2019.  
<https://time.com/5655074/concrete-urban-heat/> (dernier accès : 30/08/2020).

Les Décodeurs. A partir de quelles températures peut-on parler de canicule ? *Le Monde*, 24/06/19. [https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/06/21/a-quelles-temperatures-peut-on-parler-de-canicule\\_5479799\\_4355770.html](https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/06/21/a-quelles-temperatures-peut-on-parler-de-canicule_5479799_4355770.html) (dernier accès : 21/08/20).

Galindo, S. Breakdown: Urban Heat Island Effect, why it's hotter in the city. *WMC Action News 5*, 28/08/2020. <https://www.wmcactionnews5.com/2020/08/28/breakdown-urban-heat-island-effect-why-its-hotter-city/> (dernier accès : 30/08/2020).

Harvey, C. Urban Heat Islands Mean Warming Will Be Worse in Cities. *Scientific American*, 21/11/2019. <https://www.scientificamerican.com/article/urban-heat-islands-mean-warming-will-be-worse-in-cities/> (dernier accès : 24/08/2020).

Herzberg, N. La canicule de 2003, un tournant démographique. *Le Monde*, 27/06/19. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/06/27/la-canicule-de-2003-un-tournant-demographique\\_5482310\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/06/27/la-canicule-de-2003-un-tournant-demographique_5482310_3244.html) (dernier accès : 17/08/20).

Spangrud, D. Thematic Mapping with Hexagons. *Medium*, 8/04/2015. <https://medium.com/esri-insider/thematic-mapping-with-hexagons-61f995c0e795> (dernier accès : 1/09/2020).

## Table des matières

Sommaire .....	1
Résumé.....	2
Remerciements .....	3
Première Partie : contexte, introduction et présentation du stage.....	4
1.1. Introduction et les hypothèses de départ.....	4
1.2. Présentation du laboratoire LASTIG à l'IGN .....	4
1.3. Diagramme de Gantt recensant le calendrier du stage .....	6
1.4. Contexte et l'état de l'art de la recherche sur les îlots de chaleur urbains (ICUs).....	6
1.4.1. Présentation du projet URCLIM .....	6
1.4.2. Les îlots de chaleur urbains (ICU) .....	7
1.4.3. Courte revue de la littérature scientifique sur la recherche et l'analyse et exploration des ICUs.....	8
1.4.4. La problématique du stage.....	12
1.5. Présentation de la zone d'étude, données et indicateurs morphologiques utilisés pendant l'étude .....	13
1.5.1. L'UCM, la zone d'étude et l'échelle d'analyse.....	13
1.5.2. Données.....	13
1.5.3. Critères de sélection des indicateurs morphologiques .....	14
1.5.4. La « Building Surface Fraction » (BSF) .....	16
1.5.5. La « Impervious Surface Fraction » (ISF) .....	16
1.5.6. La « Pervious Surface Fraction » (PSF) .....	16
1.5.7. La « Height of Roughness Elements » (HRE) .....	17
1.5.8. Les indicateurs présents dans la couche de MApUCE.....	17
1.5.9. Une note sur l'albédo et son importance dans l'analyse des ICUs .....	17
1.6. Présentation des données de température : le modèle de simulation MesoNH de Météo-France .....	17
1.6.1. Délimitation de la zone d'étude et l'intégration des données Meso-NH .....	19
1.7. Outils .....	20
1.8 Chemin de traitement .....	20
Deuxième partie : Analyses statistiques.....	21
2.1. Analyse statistique I : l'auto-corrélation spatiale des indicateurs .....	21
2.1.1. Présentation des cartes des indicateurs brutes .....	21
2.1.2. Présentation d'I de Moran local .....	24
2.1.3. Méthodologie .....	25
2.1.4. Résultats .....	29

2.1.5. Discussion des résultats .....	32
2.2. Analyse statistique II : la régression linéaire entre la température et les autres indicateurs ...	32
2.2.1. Méthodologie .....	32
2.2.2. Résultats .....	33
2.2.3. Discussion des résultats .....	34
2.3. Analyse statistique III : GWR ( <i>geographically weighted regression</i> / la régression géographiquement pondérée) .....	34
2.3.1. Présentation de « GWR » .....	34
2.3.2. Méthodologie .....	35
2.3.3. Résultats .....	37
2.3.4. Discussion des résultats .....	40
Troisième partie : Co-visualisation des indicateurs morphologiques et les données de température	41
3.1.1. Introduction.....	41
3.1.2. Méthodologie .....	43
3.1.3. Résultats .....	46
3.1.4. Discussion des résultats .....	51
Conclusion .....	52
Perspectives.....	53
Bilan personnel du stage .....	53
Annexes .....	54
Annexe-I : Organigrammes de flux.....	55
Annexe-II : Cartes associées à l'I local de Moran .....	58
Annexe-III : cartes associées à l'analyse GWR (Stratégie 2).....	66
Bibliographie.....	72

## Figures et tableaux

Figure 1 : Logos des équipes de recherche au LASTIG. ....	5
Figure 2 : Diagramme de Gantt.....	6
Figure 3 : Aperçu de la classification générale des LCZs. ....	9
Figure 4 : Le processus de génération des USRs de MAPUCE .....	10
Figure 5 : Le maillage MAPUCE de Paris avec sa classification des USRs. ....	12
Figure 6 : Un exemple du placement d'un capteur au centre d'une place dans l'étude de Rodler et Leduc. ....	14
Figure 7 : un exemple du placement d'un capteur au centre d'une place dans l'étude de Rodler et Leduc.....	15
Figure 8 : Une illustration de comment les bâtiments empêchent l'énergie solaire de repartir dans l'espace la nuit. ....	15
Figure 9 : Une illustration d'un cube Meso-NH qui est formé par 4 points. O représente la simulation des données de température et de pression atmosphérique. U pour la vitesse du vent en direction UO, V pour la vitesse du vent en direction VO, et W pour la vitesse de vent en direction WO. ....	18
Figure 10 : Une illustration d'un cube TEB. Pour le centre, C, les données de température, de pression atmosphérique et du vent en toutes directions sont simulées. ....	18
Figure 11 : A gauche, Paris (75) en jaune superposée sur les départements de l'Île de France qui l'entourent (92, 93, 94). A droite, la grille de Meso-NH placée par-dessus Paris et quelques USRs des départements qui l'entourent.....	19
Figure 12 : Première stratégie d'échantillonnage des données Meso-NH dans les mailles de MAPUCE. ....	19
Figure 13 : Deuxième stratégie d'échantillonnage.....	20
Figure 14 : Chemin du traitement du projet .....	20
Figure 15 : La carte de valeurs brutes de la BSF (Building Surface Fraction).....	21
Figure 16 : La carte de valeurs brutes de HRE (Height of Roughness Elements). ....	22
Figure 17 : La carte de valeurs brutes d'ISF (Impervious Surface Fraction). ....	22
Figure 18 : La carte de valeurs brutes de PSF (Pervious Surface Fraction).....	23
Figure 19 : La carte de valeurs brutes de TEB_T1 (Stratégie 1).....	23
Figure 20 : La carte de valeurs brutes de TEB_T1 (Stratégie 2).....	24
Figure 21 : La mesure des indices d'association locale de BSF suite au calcul des valeurs locales de l'I de Moran.....	26
Figure 22 : Le diagramme de Moran pour les observations de BSF. ....	26
Figure 23 : La carte de p-values pour les indices de l'I de Moran local. Si l'on compare cette carte avec celles des indices de l'I de Moran local, on commence à savoir où précisément nos clusters homogènes vont apparaître et comment ces regroupements homogènes seront classifiés en regardant la distribution dans les quadrants du diagramme de Moran. ....	28
Figure 24 : La carte des quadrants pour les indices de BSF. ....	28
Figure 25 : La classification de la légende selon Anselin. ....	29
Figure 26 : La carte des quadrants pour les indices de HRE. La distribution des clusters ressemble à celle de la BSF, sauf qu'on remarque quelques « High-high » à La Défense (a). ....	29
Figure 27 : La carte de quadrants pour l'ISF. On remarque bien la forme de la périphérique (a), la rive droite à côté du musée du Louvre (b) et les Jardins des Tuileries, et la Défense (c). Les clusters sont clairement dispersés de manière plus éparpillée que ceux de la BSF et la HRE. ....	30
Figure 28 : La carte des quadrants pour les indices de PSF. Les zones boisées sont très fortement auto-corrélées. Beaucoup d'USRs contiennent aucune valeur de PSF, ce qui explique leurs absences de la carte. ....	30
Figure 29 : La carte de quadrants pour le TEB_T1 (Stratégie 1). Les valeurs élevées et basses de température sont très fortement auto-corrélées entre elles. ....	31
Figure 30 : La carte de quadrants pour le TEB_T1 (Stratégie 2). Comme pour la première stratégie (Figure 26), on aperçoit des trous dans le grand cluster de « High-high » probablement par conséquent des présences importantes de surfaces perméables comme le Champ de Mars et les Jardins des Champs-Élysées (cf. Figure 28).....	31
Figure 31 : La régression linéaire des valeurs de TEB_T1 (Stratégie 1) contre celles de HRE. ....	33

Figure 32 : La régression linéaire des valeurs de TEB_T1 (Stratégie 1) avec celles de PSF. ....	33
Figure 33 : L'histogramme de la distribution des résidus de la régression linéaire des valeurs de TEB_T1 (Stratégie 2) avec celles de HRE. ....	35
Figure 34 : La carte des résidus de la régression linéaire des valeurs de TEB_T1 (Stratégie 2) avec celles de HRE. ....	36
Figure 35 : Exemple d'une bande passante gaussienne (Feuillet, Cossart, Commenges, p.203) .....	37
Figure 36 : Les valeurs de coefficient locales pour la HRE avec une bande passante non-adaptative de 700m. ....	38
Figure 37 : La cartes des R2 locaux de la GWR entre les valeurs de TEB_T1 (Stratégie 2) et celles de HRE. ....	39
Figure 38 : La cartes des erreurs standards locales de la GWR entre les valeurs de TEB_T1 (Stratégie 2) et celles de HRE.....	40
Figure 39 : Une carte du monde d'après la description de Ptolémée réalisée par Johannes Schnitzer d'ouvrage de Ptolémée intitulé Géographie traduit par Holle et publié en 1482. On note les têtes qui soufflent le vent, une très ancienne géovisualisation de la météo.....	42
Figure 40 : La vue aérienne sur la Défense avec un échantillon de ses valeurs de BSF extrudées. ....	43
Figure 41 : L'Echantillon en profile avec une vue sur les différentes valeurs extrudées. ....	43
Figure 42 : La HRE communiqué par la gamme de couleur jaune-vert avec des exemples de différentes valeurs de cet indicateur.....	44
Figure 43 : Les classes de température séparées par des frontières. ....	45
Figure 44 : Carte en 2D du maillage des USRs de MApUCE avec la température en courbes de niveau. Il est clair que l'intégration du BSF dans ce rendu serait très difficile voire impossible.....	46
Figure 45 : Carte en 2D du maillage avec des hexagones de 650m de large .....	46
Figure 46 : Carte en 2D des hexagones d'aires de 19.818,4m2 .....	47
Figure 47 : (a) Visualisations 3D de la zone d'étude avec les mailles de MApUCE extrudée selon leurs valeurs de BSF, les valeurs de HRE sont classées par une gamme de couleur en vert-jaune, les classes de température sont délimitées par les courbes de niveau et classées selon une gamme de couleur divergente bleu-rouge. ; (b) Vue sur la zone du sud-ouest, le grand espace jaune étant le Bois de Boulogne. ; (c) Vue sur l'hypercentre où les températures sont les plus élevées. ....	48
Figure 48 : Vue sur la zone du sud-est avec le Bois de Vincennes au premier plan où les températures sont parmi les plus fraîches. ....	49
Figure 49 : Vue aérienne du maillage d'hexagones de 650m de large. ....	49
Figure 50 : Vue aérienne du modèle en 3D composé de mailles de 19.818,4m2 .....	50
Figure 51 : Vue de l'ouest sur la Défense. (a) On remarque les différences entre les valeurs de BSF extrudées et celles de HRE colorées. Le vert foncé indique une mesure importante de HRE, alors que la hauteur des hexagones extrudées mesure la valeur de BSF. ....	50
Figure 52 : (a) Vue du nord-est, on remarque des points de bascule où la température descend* au même point que la densité de la morphologie se diminue. ; (b) Vue sur le coin du sud-est où les températures dans le Bois des Vincennes sont parmi les plus fraîches de la zone d'étude. Même si l'on a décidé de ne pas intégrer la PSF (Pervious Surface Fraction) dans le rendu, la manque total des extrusions délimité par la frontière bleue foncée nous donne un indice d'une couverture importante de végétation. ; (c) Vue sur le centre où on remarque que au niveau des Jardins de Luxembourg (-) la température descend globalement par 1° de 300,5K à 299,5K° par rapport à la zone la plus chaude(+); (d) Vue sur l'hypercentre, de loin (cf : 49c) la frontière de température paraît en 2D, mais vu de près elle paraît comme des panneaux fins, avec l'altitude de chaque panneau réglée au sommet de l'hexagone qu'il délimite. Parfois les panneaux obturent des hexagones de certains angle et l'utilisateur doit manipuler la vue pour révéler ces hexagones cachées. ....	51
Figure 53 : Organigramme de flux de prétraitement de la végétation qui servira pour le calcul de la PSF. ....	55
Figure 54 : Phases de prétraitement pour les zones imperméables qui se serviront pour ce calcul de la PSF. ....	56
Figure 55 : Création des "courbes de niveau" de température ou frontières entre les classes de température. ....	57
Figure 56 : La mesure des indices d'association locale de HRE.....	58
Figure 57 : La diagramme de Moran pour la HRE .....	59
Figure 58 : La carte de p-values pour la HRE .....	59

Figure 59 : Les indices d'association locale pour l'ISF.....	60
Figure 60 : le diagramme de Moran pour l'ISF .....	60
Figure 61 : La carte de p-values pour l'ISF.....	61
Figure 62 : Les indices d'association locale pour la PSF. ....	61
Figure 63 : le diagramme de Moran pour la PSF .....	62
Figure 64 : La carte de p-values pour la PSF. ....	62
Figure 65 : Les indices d'association locale pour TEB_T1 (Stratégie 1) .....	63
Figure 66 : Les indices d'association locale pour TEB_T1 (Stratégie 2) .....	63
Figure 67 : le diagramme de Moran pour TEB_T1 (Stratégie 1) .....	64
Figure 68 : le diagramme de Moran pour TEB_T1 (Stratégie 1).....	64
Figure 69 : La carte de p-values pour TEB_T1 (Stratégie 1). ....	65
Figure 70 : La carte de p-values pour TEB_T1 (Stratégie 2). ....	65
Figure 71 : carte des résidus pour la BSF (Stratégie 2) .....	66
Figure 72 : carte des résidus pour l'ISF (Stratégie 2) .....	66
Figure 73 : carte des résidus pour la PSF (Stratégie 2).....	67
Figure 74 : carte de coefficients BSF (Stratégie 2). ....	67
Figure 75 : carte de coefficients ISF (Stratégie 2). ....	68
Figure 76 : carte de coefficients PSF (Stratégie 2). ....	68
Figure 77 : carte de R2 locaux BSF (Stratégie 2). ....	69
Figure 78 : carte de R2 locaux ISF (Stratégie 2). ....	69
Figure 79 : carte de R2 locaux PSF (Stratégie 2). ....	70
Figure 80 : carte des erreurs standards BSF (Stratégie 2). ....	70
Figure 81 : carte des erreurs standards ISF (Stratégie 2). ....	71
Figure 82 : carte des erreurs standards PSF (Stratégie 2). ....	71