

Création de cartes de zones climatiques locales pour le suivi des îlots de chaleur urbains à Strasbourg

■ Tania LANDES - Georges NAJJAR - Mathieu KOEHL - Olivier MONTAUBAN

Camille GOURGUECHON - Pierre KASTENDEUCH - Philippe SLISSE

Dans le contexte du réchauffement climatique, les vagues de chaleur récurrentes auxquelles nous faisons face ces dernières années tendront à s'intensifier sur notre territoire comme dans le reste du monde. L'urbanisation y est pour quelque chose. D'après le centre d'observation de la société, 50 millions de personnes, soit plus des trois quarts de la population française, habitent en ville (données de l'Insee, 2016). Les estimations des Nations Unies indiquent que 54 % des personnes dans le monde vivaient dans des zones urbaines en 2016, chiffre qui pourrait atteindre 70 % en extrapolant à 2050 (@Worldindata, 2019). Cette urbanisation croissante génère évidemment des changements non négligeables sur le climat urbain. L'étude de ce dernier et des paramètres qui l'influencent sont importants non seulement dans une optique de compréhension des mécanismes complexes qui régissent notre environnement, mais également dans une optique prédictive, afin de proposer à l'avenir des solutions alternatives de gestion de l'espace urbain en harmonie avec la nature, pour une optimisation de la qualité de vie dans nos villes et nos campagnes. Des études sont menées en ce sens par notre équipe, avec l'appui d'autres chercheurs (INRA Clermont-Ferrand) et de partenaires de collectivités territoriales, comme la Direction urbanisme et territoires de l'Eurométropole de Strasbourg (la mission Écologie des territoires et le Service géomatique).

MOTS-CLÉS

Climatologie urbaine, zones climatiques locales, cartographie, îlot de chaleur urbain, données 3D, classification.

(2014), durant la journée, en ville, les surfaces imperméables et les bâtiments se réchauffent, stockent l'énergie solaire et participent ainsi au réchauffement de l'air ambiant, tandis qu'à la campagne, l'énergie solaire est transformée par la végétation par photosynthèse et pour évaporer l'eau dans l'atmosphère, le sol et la végétation se réchauffant peu, l'énergie restante permet de chauffer l'air. La géométrie 3D de la ville est un facteur qui amplifie cet effet de stockage. À la nuit tombée, les surfaces urbaines limitent le refroidissement de l'air, contrairement à ce qu'il se passe à la campagne. Ainsi l'îlot de chaleur urbain se forme surtout parce que le refroidissement de l'air urbain est contrarié.

Contrairement au climat rural, le microclimat urbain est caractérisé par un flux de chaleur latente faible, un flux de chaleur sensible plus élevé et surtout, pendant la nuit, un flux de stockage qui est relargué dans l'atmosphère, ce qui, par conséquent, conduit à un ralentissement du phénomène de refroidissement nocturne. Entre la ville de Strasbourg, à l'Est de la France et la campagne alentour, la différence de température mesurée sur une moyenne annuelle est de 2° à 3° (Fischer, 2005). De façon générale, ces perturbations sont les conséquences d'une urbanisation croissante qui engendre une augmen-

L'îlot de chaleur urbain (ICU)

Comparé au milieu rural, les températures en milieu urbain sont généralement plus élevées, en particulier la nuit. L'étude des différences de températures dans l'espace constitue un indicateur important pour les climatologues et géographes, appelé "îlots de chaleur urbains" (ICU). Ce dernier traduit une augmentation localisée des températures nocturnes dans les agglomérations en comparaison avec les zones moins artificialisées et périurbaines à proximité (figure 1). Il est lié à différents paramètres comme la densité et la morphologie urbaine, les propriétés d'absorption et de stockage de la chaleur des matériaux,

les activités anthropiques ou encore la substitution des espaces végétalisés par des surfaces minérales. Le phénomène d'îlot de chaleur est accentué pendant la nuit. Comme l'explique le site du Centre national de recherches météorologiques

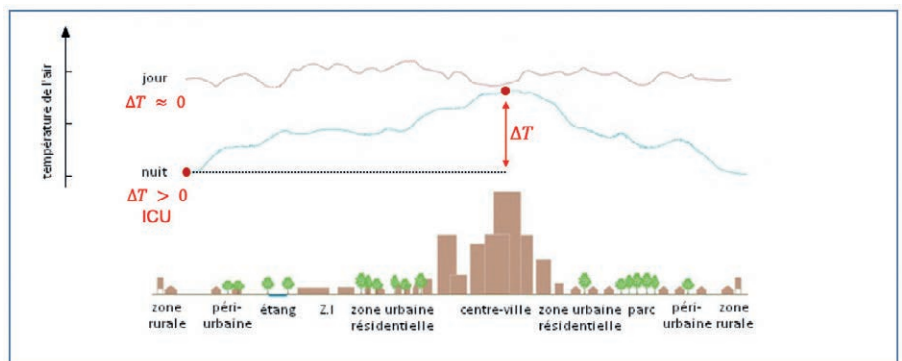


Figure 1. Illustration de l'îlot de chaleur urbain dans l'espace et le temps

(source : Bournez, 2018, inspiré de Voogt, 2000)



tation des zones imperméabilisées, une géométrie urbaine atypique avec de hauts bâtiments, un étalement des villes et une augmentation des activités anthropiques.

Pour les mêmes conditions météorologiques, l'ICU varie selon les quartiers étudiés. Une meilleure spatialisation de l'environnement urbain en particulier de la canopée urbaine pourrait donc être une des issues envisageables pour réduire ce phénomène et améliorer l'indice de confort de la population urbaine.

Des recherches à l'INSA Strasbourg

Depuis une dizaine d'années, des travaux de recherche sont effectués sur la thématique de la modélisation des arbres en villes et de la compréhension des ICU au sein du groupe PAGE de l'INSA Strasbourg (équipe TRIO, laboratoire ICube UMR 7357). Cet axe de recherche passionne une équipe pluridisciplinaire composée de topographes, de géographes-climatologues et est mené en collaboration avec une équipe de chercheurs en éco-physiologie et en bioclimatologie de l'INRA Clermont-Ferrand (Landes *et al.*, 2014). Nous pouvons en particulier citer la thèse de Elena Bournez qui a étudié le rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains (Bournez, 2018). Ce travail a permis de développer une approche combinée de mesures et de modélisations à différentes échelles des arbres en ville, témoignant de la complexité de modéliser le climat urbain. Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur la réintroduction de la végétation et plus particulièrement des arbres, qui semble être une des meilleures réponses pour minimiser le réchauffement en ville. En effet, le flux d'évapotranspiration (ou de chaleur latente) et les ombres portées provenant des arbres ont un impact significatif sur le bilan thermique de l'atmosphère aux alentours, créant des îlots de fraîcheur (Pons, 2019).

Depuis 2013, plusieurs sites de l'Euro-métropole de Strasbourg font l'objet d'études climatiques, pour mesurer et évaluer le climat urbain et plus particulièrement étudier le rôle de la végétation (Najjar *et al.*, 2015), analyser la variabi-

lité spatiale et temporelle de l'effet de l'ICU, comprendre les processus qui le contrôlent, analyser la contribution de la végétation et à terme mesurer l'indice de confort thermique de la population.

Les résultats présentés dans cet article sont le fruit de plusieurs projets de recherche menés depuis 2017. Les travaux de Camille Gourguechon (2017/2018), dans le cadre d'un projet de recherche technologique (PRT) de 5^e année à l'INSA spécialité topographie, ont esquissé les contours d'une classification de données images, vecteurs et de nuages de points, dans le but d'extraire des zones climatiques types dans des quartiers de Strasbourg. Ils ont été poursuivis par Olivier Montauban, durant son PRT puis son projet de fin d'études (PFE) (2018/2019). Ces travaux d'étudiants en master venaient en aide sur certains aspects à la thèse d'Elena Bournez (2015-2018) et d'une thèse en cours actuellement à l'Euro-métropole de Strasbourg, menée par Nathalia Philipps (2018-2021). Cette dernière a pour objet l'étude du rôle de la végétation et de la géométrie urbaine dans la réduction de l'îlot de chaleur urbain strasbourgeois. Les travaux de recherche de Nathalia Philipps visent à déboucher sur une série de propositions prescriptives pour améliorer les conditions de vie et de confort des citoyens et atténuer de manière plus efficace les effets négatifs de l'îlot de chaleur urbain.

L'Agence de développement et d'urbanisme de Strasbourg (ADEUS) a d'ores et déjà produit une carte d'ICU sur la base d'images satellites, mais celle-ci ne concerne qu'une seule journée. C'est pourquoi notre équipe a décidé de lancer un projet visant à explorer le potentiel d'images satellites ASTER et MODIS pour la détection et le suivi d'ICU au travers d'une collaboration avec l'Université de Salamanque, en Espagne. Nous envisageons, à moyen terme, de produire une cartographie des ICU strasbourgeois par saison.

Définition de zones climatiques locales

Un défaut majeur de la majorité des études sur le sujet des ICU est qu'elles manquent de métadonnées quantita-

tives permettant de décrire l'espace urbain considéré et qui influencent le climat (indicateurs quantitatifs concernant l'exposition, la rugosité, la couverture du sol, la hauteur des bâtiments, la densité, la typologie urbaine, etc.). Ce manque de données descriptives rend très difficile la comparaison des études menées de longue date en climatologie urbaine à travers le monde.

C'est dans ce cadre que les travaux de Stewart et Oke (2012) ont été développés. Ils ont proposé à la communauté de climatologues la mise en place d'une classification en zones climatiques locales ou "*Local Climate Zone*", que nous abrégons en LCZ par la suite. Cette classification, internationalement reconnue, a pour objet de permettre l'identification de zones considérées comme homogènes à l'échelle d'une ville et de son environnement proche. Son intérêt principal réside dans la comparaison entre des classes LCZ plutôt qu'entre des zones qualifiées, arbitrairement, comme "urbaines" ou "rurales", et ce sans consensus sur les définitions spatiales de ces termes. Elle constitue une étape fondamentale, mais toutefois complexe, dans tout projet de recherche portant sur l'étude du climat d'une ville et de sa répartition spatiale. Nous avons tenté, dans le cadre des travaux mentionnés précédemment, de produire une classification basée sur les LCZ, sur le territoire de l'Euro-métropole de Strasbourg. La *figure 2* fournit un aperçu des ambiances urbaines que l'on rencontre dans l'agglomération strasbourgeoise.

Une LCZ est une unité de surface décrivant le paysage en liant le principe d'homogénéité de composition urbaine à celui d'homogénéité climatique. Ce tramage du territoire, tel que suggéré par Stewart et Oke (2012), repose sur une description du paysage urbain en 17 classes (10 classes "bâties" ou "LCZ construites", numérotées de 1 à 10 et 7 classes "naturelles" ou "LCZ non construites" nommées de A à G), comme illustré en *figure 3*.

Les LCZ se distinguent premièrement par le type de couverture du sol. Elles seront dominées par des structures minérales pour les LCZ construites et à l'opposé par des éléments naturels



Figure 2. Différentes ambiances urbaines à Strasbourg, en octobre (Gourguechon, 2018)

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

Figure 3. Récapitulatif des LCZ définies par Stewart et Oke (2012)

pour les LCZ non construites. Les LCZ tiennent compte dans leurs définitions de la densité des éléments dominants du paysage (végétation et édifices compacts ou espacés). Enfin, pour les classes bâties, la hauteur des édifices est un critère important pour différencier les LCZ entre elles. En effet la hauteur des bâtiments ainsi que leur agencement ont un impact direct sur le climat local. La définition de ces classes a ensuite été enrichie par la quantification de facteurs descriptifs, c'est-à-dire de 10 indicateurs climatiques chiffrés, qui donnent à cette classification un caractère neutre vis-à-vis de la subjectivité de définitions des classes (voir figure 4). Ces indicateurs sont tous mesurables et indépendants du temps ou du lieu géographique. Ils peuvent être regroupés selon qu'ils soient relatifs à la morphologie urbaine, à l'occupation du sol, aux matériaux urbains présents dans chaque zone ou au métabolisme urbain, ce dernier concernant le niveau d'activité anthropique. Parmi ces quatre catégories d'indicateurs, les deux premières ont été retenues comme causes majeures des différences de température observées entre les classes.

Dans la littérature, deux méthodes cohabitent pour la mise en place d'une classification de LCZ. Une première méthode est basée sur la classification d'images satellites en partant du principe que chaque LCZ correspond à des valeurs de luminances distinctes. On parlera d'approche image. La seconde



Propriétés	Indicateurs climatiques
Géométrie et morphologie urbaine	- Facteur de vue du ciel (SVF) - Rapport d'aspect (H/W) - Hauteur des éléments de rugosité (HRE) - [m] - Classe de rugosité des terrains (TRC)
Couverture des sols	- Pourcentage de surface imperméable (ISF) - Pourcentage de surface bâtie (BSF) - Pourcentage de surface perméable (PSF)
Composition des matériaux	- Effusivité thermique - $[J.m^{-2}.s^{-1/2}.K^{-1}]$ - Albédo de surface
Métabolisme urbain	- Flux d'origine anthropique - $[W.m^{-2}]$

Figure 4. Indicateurs climatiques associés à chaque LCZ



est basée sur les Systèmes d'information géographique (SIG). Il s'agit de l'approche vecteur. Le principe est de calculer ou collecter les valeurs des différents paramètres caractéristiques définis dans les travaux de Stewart & Oke (2012), et d'en déduire le périmètre des LCZ. Ces deux approches ont été étudiées et ont permis de mener à deux cartes LCZ, qui seront comparées à la suite de leur présentation.

(World Urban Database and Access Portal Tool). Ce portail est une initiative internationale ayant pour objectif la création et la diffusion d'une base de données à l'échelle internationale relative à l'aspect, la forme mais aussi les activités des villes à travers le monde, ce portail permettant la mutualisation des informations pour l'étude du climat urbain. L'initiative WUDAPT décompose le niveau d'information selon trois échelles, comme le décrit la figure 5.

Carte de LCZ par approche image

Une première carte LCZ par approche image a été réalisée au cours du projet de recherche technologique de Camille Gourguechon (2017/2018). Le raisonnement suivi a consisté à s'inspirer des travaux de Bechtel *et al.* (2015) qui suggèrent une méthodologie créée dans le cadre d'un projet WUDAPT

Processus de classification développé pour l'approche image

Dans cette approche, la ville étudiée est divisée en LCZ par rapport à la réponse spectrale des éléments qui la composent, distinguant ainsi plusieurs classes de couvertures et d'occupations des sols. Ainsi après avoir défini, pour

chaque LCZ, des zones d'apprentissage contenant des pixels caractéristiques de la zone, les pixels peuvent être associés à une LCZ par comparaison de leurs comptes numériques dans chaque bande spectrale avec les valeurs caractéristiques de chaque LCZ. On parle de classification supervisée puisque l'opérateur connaît *a priori* les classes souhaitées qui correspondent aux 17 classes de LCZ. Parmi les différents processus de classification supervisée existants, c'est celui des forêts d'arbres décisionnels (*random forest classification*) qui est apparu comme compromis idéal entre précision et performance de calcul d'après Bechtel *et al.* (2015).

L'imagerie satellite en libre accès, telle que Sentinel-2 ou Landsat 8, de même que les logiciels accessibles gratuitement tels que *Google Earth Pro*, pour la définition de la zone d'intérêt et des polygones d'apprentissage, et le logiciel libre de SIG, *System for Automated Geoscientific Analyses SAGA-GIS*, pour procéder à la classification, soutient la philosophie et l'initiative du projet WUDAPT. N'importe quel territoire peut être ainsi décrit en termes de zones climatiques locales, car cette approche repose sur le traitement d'images satellites à couverture mondiale et gratuites.

La figure 6 présente un diagramme récapitulatif des étapes de traitements mises en place pour produire une carte de LCZ de Strasbourg et ses environs à partir d'images satellites.



Le **niveau 0** correspond à l'échelle de la ville et de ses alentours. Une cartographie de la ville est réalisée selon le schéma des 17 zones décrites dans la classification Local Climate Zone (LCZ) de Stewart & Oke (2012). L'espace est alors découpé selon l'apparence globale à partir de vues au niveau du sol, aériennes ou satellites.



Dans le **niveau 1**, qui concerne l'échelle du quartier, des attributs de formes et de fonctions sont associés à chacune des zones extraites au précédent niveau.



Dans le **niveau 2** le système d'informations est complété avec des données à l'échelle du bâtiment, comme par exemple, l'albédo, les matériaux de construction, la date de construction, le ratio surface vitrées surface en dur...

Figure 5. Décomposition de l'espace en niveaux d'informations dans l'initiative WUDAPT, appliquée à Strasbourg

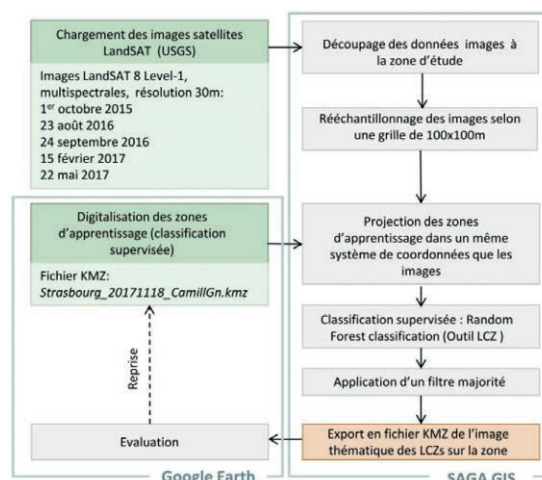
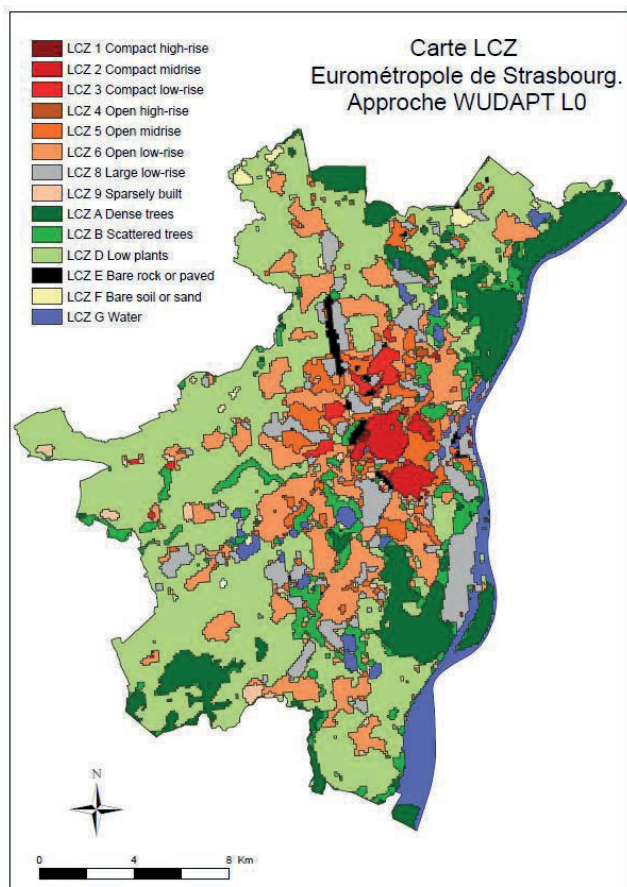


Figure 6. Diagramme récapitulatif des étapes de traitements mises en place pour produire une carte de LCZ de Strasbourg et ses environs à partir d'images satellites (Gourguechon, 2018)



Analyse de la carte LCZ produite par approche image

La figure 7 présente la classification résultant de l'approche image appliquée au territoire de l'Eurométropole de Strasbourg.

Cette méthode trouve cependant ses limitations dans le fait qu'elle ne prenne en compte que l'apparence globale des zones, sans considération objective des valeurs que prendrait chaque facteur descriptif décrit par Stewart et Oke (2012) pour chacune de ces zones. Elle est fortement liée à l'appréciation de l'opérateur puisque c'est lui qui définit des zones d'apprentissage pour chaque classe. Enfin, elle ne fournit qu'un niveau 0 d'information selon l'échelle du WUDAPT (figure 5).

Nous avons alors cherché à évaluer la qualité de cette carte par la quantification des différents facteurs descriptifs dans les zones définies par cette méthode basée sur la classification d'images satellites. Pour les différents traitements réalisés, nous avons utilisé les logiciels ArcGIS et QGIS. Ce dernier, un logiciel libre, est largement répandu pour les études de climat urbain. Les

paramètres calculés lors de cette étude ont été la fraction de superficie bâtie, la hauteur des éléments de rugosité, le pourcentage de surface imperméable et perméable, l'albédo et le *sky view factor* (SVF). Pour chacun de ces paramètres, les écarts avec les intervalles de référence donnés dans les travaux de Stewart & Oke (2012) ont été évalués.

Ces écarts doivent cependant être interprétés avec précaution. En effet certains de ces écarts sont dus à un manque de données. C'est le cas notamment pour les zones situées au-delà de la frontière française et les paramètres en lien avec la végétation. Par manque de données de hauteur de végétation, la hauteur des éléments de rugosité sera de manière générale sous-évaluée et le *sky view factor*, au contraire, surévalué.

Carte de LCZ par approche vectorielle

Parallèlement aux approches raster, il existe d'autres approches qualifiées de vectorielles. Elles permettent d'affiner la représentation spatiale des LCZ tout en calculant directement certains indi-

Figure 7. Carte de LCZ de Strasbourg et ses environs, par approche basée sur l'image (Montauban, 2019), après redéfinition des zones échantillons définies initialement dans Gourguechon (2018). WUDAPT LO, cellules de 100 m x 100 m.

cateurs climatiques avec des techniques basées sur les outils de SIG. Cependant, elles ne sont pas aussi directes et universelles dans leur mise en place que l'approche image ou WUDAPT de niveau 0, abordée ci-dessus. En effet, elles nécessitent que le territoire d'étude bénéficie d'une diversité de données permettant de traduire la géométrie des bâtiments, des rues, de la végétation ou l'occupation et la couverture des sols en différents comportements climatiques locaux. Bien que les principes définissant ces méthodes puissent être généralisés, la stricte application de ces approches est plus complexe, car elle dépend pour beaucoup de la richesse et de la qualité de la description d'un territoire à l'aide de données vectorielles au niveau local, régional ou national. Les travaux effectués dans le cadre du PFE d'Olivier Montauban (2019) se sont concentrés sur une zone d'étude qui correspond au territoire de l'Eurométropole de Strasbourg. La connaissance 3D du territoire existe sur l'emprise de l'Eurométropole de Strasbourg ; les données 3D sont pour la plupart disponibles en opendata sur la plateforme "data.strasbourg.eu". La stratégie des travaux ne fut donc pas de produire mais plutôt de trouver des données fiables en leur appliquant des traitements spatiaux, afin de calculer directement le plus d'indicateurs climatiques utiles pour procéder à une classification LCZ.

C'est ainsi que ses travaux nous ont permis de développer une approche vectorielle de la classification LCZ à Strasbourg et d'aboutir à une carte LCZ équivalente au niveau 1 de l'initiative WUDAPT avec :

- l'intégration de caractéristiques géométriques de la végétation dérivées de données LiDAR ;
- l'approfondissement et l'amélioration du calcul des indicateurs climatiques décrivant la morphologie urbaine par l'introduction de nouvelles sources de données.

Stratégie de détermination des indicateurs climatiques

L'approche développée s'appuie sur des outils disponibles dans le logiciel ArcGIS (ESRI) et d'autres développés en Python



Diffuseur	Nom Produit	Format	Accessibilité	Échelle / Résolution	Usage
IGN	BD TOPO®	Vecteur-ESRI Shapefile	Licence gratuite pour la recherche publiable	Du 1 : 5 000 au 1 : 50 000	Îlot de polygones, BSF, PSF, ISF, HRE, SVF
IGN	BD Parcellaire®	Vecteur-ESRI Shapefile	Licence gratuite pour la recherche publiable	Du 1 : 250 au 1 : 10 000	Îlot de polygones
IGN	BD Carto®	Vecteur-ESRI Shapefile	Licence gratuite pour la recherche publiable	Du 1 : 50 000 au 1 : 200 000	Îlot de polygones
IGN	Registre Parcellaire Graphique	Vecteur-ESRI Shapefile	Licence ouverte Etalab	Du 1 : 2 500 au 1 : 10 000	Îlot de polygones
CES OSO	Occupation des sols	Raster-GeoTIFF	Open Data Commons Attribution License	20 m	ISF, PSF
EODC, BOKU	Albedo	Raster-JPEG 2000	Aucune limite légale	10 m	Albédo de surface
EMS	Raster d'élévation du sol	Raster-TIFF	Licence ouverte Etalab	0,5 m	SVF
EMS	Raster des hauteurs de végétation	Raster-TIFF	Licence ouverte Etalab	0,5 m	HRE, SVF, ISF, PSF
EMS	Raster des hauteurs de toiture	Raster-TIFF	Licence ouverte Etalab	0,5 m	HRE, SVF

Figure 8. Inventaire des données vectorielles et raster¹ utilisées (Montauban, 2019)

pour le calcul des indicateurs climatiques notamment. Dans un souci de reproductibilité et de coût, nous prôtons l'usage de données images et vectorielles *Open Source* et/ou gratuites, prêtes à l'emploi. Le tableau de la figure 8 résume les données retenues qui ont été produites soit par des institutions, des organismes publics ou par des experts scientifiques. Ces données permettent d'atteindre, sur notre zone d'étude, un niveau de détails allant de quelques mètres à une vingtaine de mètres.

Un effort particulier a été réalisé par l'ajout des données de meilleure résolution ou qui n'avaient pas été encore employées dans nos précédents travaux (carte d'albédo, une nouvelle carte d'occupation du sol, rasters dérivés d'acquisitions Lidar). Nous obtenons ainsi une représentation des LCZ adaptée à l'échelle du quartier qui intègre pleinement la morphologie urbaine et les caractéristiques géométriques des surfaces et de la végétation.

À partir de ces données, nous ne calculons pas nos indicateurs climatiques en nous appuyant sur le découpage

1 CES OSO : Centre d'expertise scientifique occupation des sols.

EODC : Centre de données d'observation de la Terre.

BOKU : Université des ressources naturelles et des sciences de la vie de Vienne.

2 IGN : Institut national de l'information géographique et forestière.

de notre zone d'étude en une grille régulière ou bien en utilisant des polygones de Thiessen. À l'instar des travaux de Hidalgo *et al.* (2019), nous avons retenu, pour le calcul direct des indicateurs climatiques, l'idée d'un découpage de la zone d'étude en îlots de polygones issus du traitement du

parcellaire cadastral et d'autres bases de données vectorielles de l'IGN². En effet, c'est en prêtant attention à l'organisation thématique ou à l'objectif de ces bases que nous nous sommes rendu compte que certaines classes LCZ pouvaient être prédétectées directement. En procédant de la sorte, nous sommes en mesure de capter, avec pertinence, la diversité d'occupations des sols et la géométrie du paysage urbain du fait des modifications anthropiques. Les données à notre disposition nous permettent de déduire 6 indicateurs climatiques sur les 10 (listés dans la figure 4) pour chaque polygone de calcul.

Processus de classification développé pour l'approche vectorielle

Parmi les différentes études qui ont permis de créer une carte LCZ par notre approche vectorielle telle que présentée dans la figure 9, deux autres méritent d'être citées. En effet, nous nous sommes, d'une part, inspirés des travaux de Unger *et al.* (2014) et de leur méthode de classification

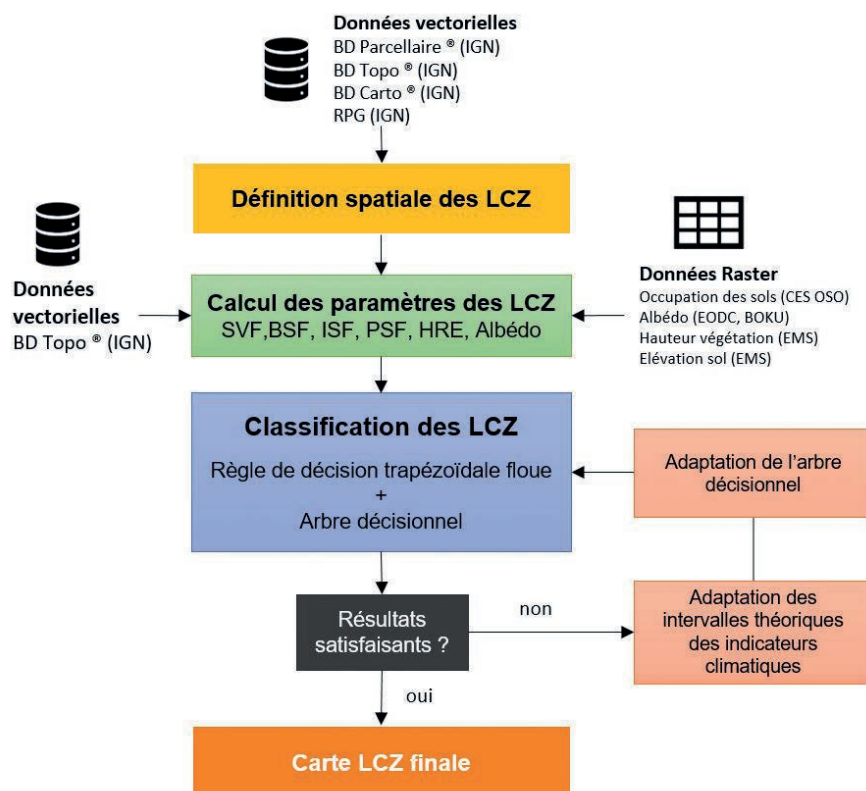


Figure 9. Diagramme synthétisant l'approche vectorielle développée (Montauban, 2019)

basée sur la logique floue à l'aide d'une fonction trapézoïdale comme règle de décision d'appartenance à une classe LCZ. D'autre part, afin de mieux distinguer les classes bâties et non bâties entre elles, nous avons amélioré notre processus discriminatoire par l'introduction d'indicateurs supplémentaires et l'usage de certains indicateurs climatiques à différents niveaux dans un arbre de décision, comme suggéré par Geletic et Lehnert (2016). Ce dernier est constitué de deux branches principales de traitements. L'une se compose d'une succession de tests et de décisions qui permettent d'attribuer, essentiellement, une classe bâtie en sortie (LCZ 1 à 10). L'autre branche fait un travail analogue pour les classes d'occupation des sols (LCZ A à G).

Cependant, ce processus semi-automatique ne permet pas de classer toutes les zones du paysage dans les classes LCZ souhaitées. En effet, Stewart et Oke (2012) décrivent 17 classes LCZ aux comportements uniques avec 10 paramètres. Or dans notre étude, si nous considérons uniquement les intervalles théoriques de valeurs pour les 6 paramètres retenus, certaines classes n'ont alors plus de comportement "suffisamment unique". Il devient par exemple difficile de distinguer, sans le paramètre du flux de chaleur anthropique, les classes LCZ 8 et 10. Les premières correspondent à des zones commerciales ou d'entrepôts tandis que les secondes correspondent à des zones d'industries lourdes.

Afin de mieux discriminer les classes présentant une grande confusion entre elles, certaines classes LCZ ont vu quelques intervalles théoriques d'indicateurs être ajustés empiriquement, afin de calculer le degré d'appartenance d'un îlot de polygone à une classe LCZ. L'objectif de notre travail n'est pas de redéfinir les valeurs des intervalles des indicateurs de la classification proposée par Stewart et Oke (2012). Cependant, dans le contexte d'une ville type européenne de taille moyenne comme Strasbourg, et compte tenu de la connaissance partielle des 10 indicateurs climatiques, notre travail montre la nécessité d'adapter locale-

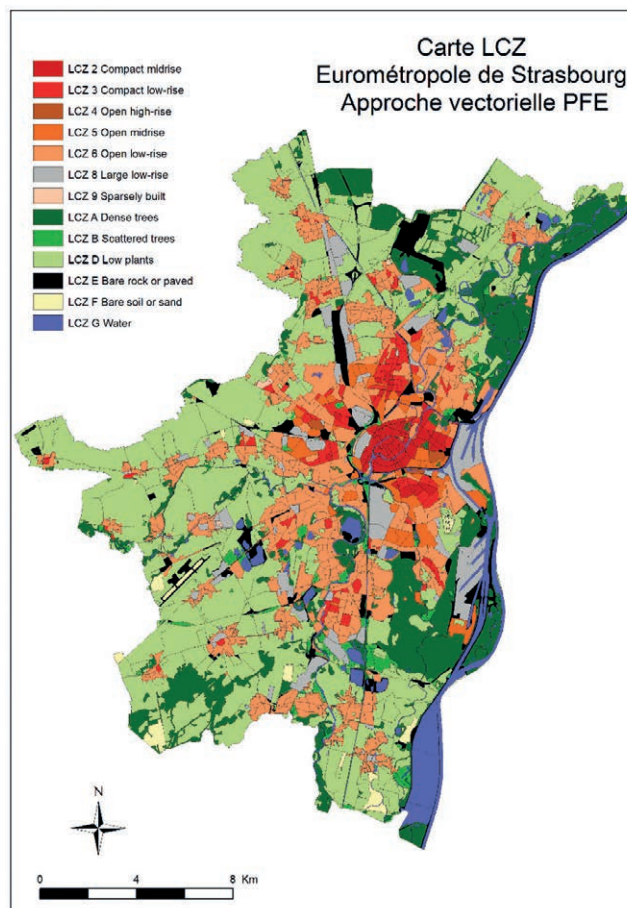


Figure 10. Carte de LCZ couvrant Strasbourg et ses environs, par approche vectorielle (Montauban, 2019).

ment un certain nombre de valeurs d'indicateur. Cela est nécessaire afin d'obtenir une carte de LCZ cohérente et tenant compte à la fois de la variabilité, des spécificités régionales et des descriptions globales des classes LCZ. Ainsi, deux classifications LCZ ont été produites sur le territoire d'étude : une carte de LCZ respectant les intervalles théoriques et une LCZ "adaptée" aux spécificités locales de l'Eurométropole de Strasbourg.

La *figure 10* présente la carte LCZ obtenue en suivant le raisonnement décrit précédemment.

Analyse de la carte LCZ produite par approche vectorielle

Il n'existe pas de cartographie de référence pour notre zone d'étude, ce qui implique que nous ne pouvons pas évaluer l'exactitude de notre classification. Cependant, une comparaison qualitative de notre approche vectorielle de niveau 1 avec l'approche raster WUDAPT de niveau 0 est inté-

ressante. Une telle comparaison fait ressortir à la fois des tendances climatiques communes et des différences subsidiaires dans la représentation des LCZ (*figure 11*).

Nous constatons ainsi que d'un point de vue spatial les classes non bâties (LCZ A-G) correspondent mieux entre les deux approches que les classes bâties (LCZ 1-10). Cela s'explique notamment par le fait que notre approche introduit des informations à la fois sur la hauteur des édifices et sur celle de la végétation. Cela permet de mieux représenter les classes de "faible" ou "moyenne hauteur". Nous arrivons à capturer les spécificités locales de la morphologie urbaine en nous affranchissant des problèmes de "pixels mixtes" inhérents à l'approche WUDAPT de niveau 0.

En considérant une grille régulière ayant des mailles de 100 m de côté et en s'intéressant uniquement aux mailles recouvertes par une unique classe LCZ, nous quantifions alors, à l'aide d'une matrice de confusion, la précision globale totale entre les deux

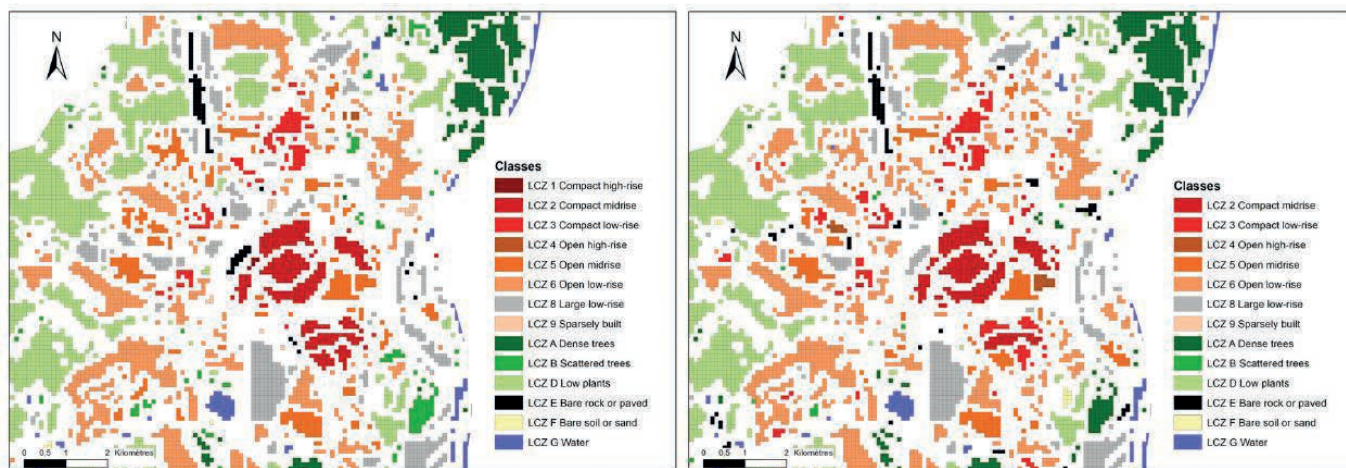


Figure 11. (gauche) Mailles pour l'approche WUDAPT ; (droite) Mailles pour l'approche vectorielle développée au cours du PFE de (Montauban, 2019).



classifications à 91 %. Cela confirme la pertinence de nos deux stratégies de classification.

Evidemment, l'approche vectorielle nécessite davantage d'efforts pour être mise en œuvre comparée à l'approche WUDAPT de niveau 0. Cependant elle a le mérite d'aboutir à une cartographie qui lui est comparable spatialement tout en parvenant à quantifier 6 des indicateurs climatiques au lieu de simplement décrire les indicateurs des LCZ en donnant les intervalles de valeurs théoriques.

Ainsi, si un utilisateur a besoin d'informations spatiales pour décrire qualitativement des zones climatiques locales, et en l'absence de données décrivant la morphologie urbaine et la végétation, nous recommandons d'utiliser l'approche globale WUDAPT de niveau 0. Pour une connaissance quantitative plus détaillée des LCZ de territoires possédant de telles données, nous recommandons le recours à une cartographie par une approche vectorielle, qui permet d'atteindre aisément le niveau 1 de l'initiative WUDAPT.

En collaboration avec Clara Bernhard, qui a réalisé son PFE au sein du service géomatique et connaissance du territoire de l'Eurométropole de Strasbourg en 2019, la classification LCZ finale a été intégrée à une plateforme d'accès sur internet Web3D Cesium, qui permet à tout utilisateur de consulter facilement et gratuitement la donnée 3D (Bernard, 2019). Elle permet par exemple de visualiser, sur l'ensemble de la ville,

la classification LCZ en 3D, comme l'illustre la figure 12.

Conclusion

La cartographie des zones climatiques locales du territoire de l'Eurométropole de Strasbourg est indispensable à l'analyse spatiale de la dynamique de l'îlot de chaleur strasbourgeois et à la définition des ambiances climatiques locales pour la recherche en climatologie urbaine.

Nos travaux nous ont donné l'occasion de développer une approche image et une approche vectorielle permettant de décrire des zones climatiques locales à Strasbourg ou "Local Climate Zones". Au regard des résultats obtenus, cet article a prouvé que les deux approches, aussi bien l'approche image que l'approche vectorielle, sont pertinentes. Toutefois, lorsque l'utilisateur a la chance de disposer de données chiffrées comme celles dont nous disposons sur Strasbourg, malgré l'effort important à déployer

pour produire une carte de LCZ, l'approche vectorielle est recommandée. Les traitements algorithmiques mis en place et les données à notre disposition ont permis d'améliorer la définition des paramètres climatiques en intégrant des informations sur la végétation notamment. Par la prise en compte des paramètres descriptifs pour produire le périmètre des LCZ, l'approche vectorielle est plus objective que l'approche image, qui est tributaire de la définition des zones d'apprentissage. Cependant elle nécessite de disposer d'une grande quantité de données qui ne sont pas forcément disponibles partout.

La démocratisation de la connaissance 3D du territoire, aussi bien de la part des institutionnels que des collectivités locales, devrait faciliter à l'avenir l'extension de nos travaux à toute autre ville intéressée par cette problématique.

Le projet MAPUCE (Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Énergie), coordonné par le CNRM (Centre national de

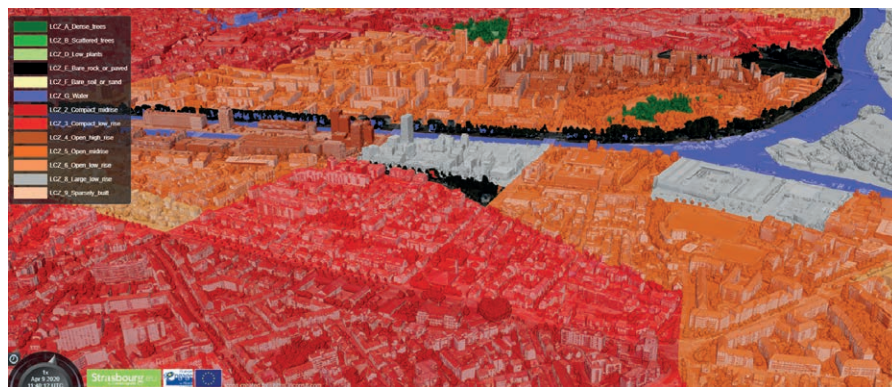


Figure 12. Illustration 3D obtenue avec la visionneuse Web 3D Cesium de l'Eurométropole de Strasbourg (Bernhard, 2019).



recherche météorologique) visait à intégrer dans les politiques urbaines et dans des documents juridiques des données quantitatives de microclimat urbain, climat et énergie, dans une démarche applicable à toutes les villes de France. Cette communauté d'experts français a mis au point une méthode vectorielle de cartographie LCZ sur plusieurs villes de France entre 2014 et 2018 (Paris, Bordeaux, Lyon, Nancy, Mulhouse, etc.), comme en atteste le site <http://mapuce.orbisgis.org/>. Toutefois, la ville de Strasbourg n'a pas pu être étudiée sur ce court laps de temps. En revanche, et en parallèle à nos travaux, une carte LCZ a été produite dans le cadre du projet PAENDORA (Planification, Adaptation et Énergie : Données territoriales et accompagnement) impliquant notamment MétéoFrance. Dans un futur proche, il sera intéressant de confronter les deux résultats et de comparer les approches mises en place respectivement. ●

Remerciements

Les auteurs remercient l'Eurométropole de Strasbourg, en particulier le Service géomatique et connaissance du territoire, représenté par Olivier Banaszak, pour la mise à disposition des données sur la zone d'étude mentionnée dans cet article.

Références

- Bechtel, B., Alexander, P., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., Mills, G., See, L., Stewart, I. (2015). *Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 4(1) : 199-219.
- Bernhard C. (2019). *Webmapping 3D : un outil pour l'aménagement du territoire*. Travail de Master II d'étudiante topographe INSA Strasbourg, à l'Eurométropole de Strasbourg, Strasbourg.
- Bournez, E. (2018). *Étude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains. Approche combinée de mesures et de modélisations à différentes échelles*. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.
- Fischer, L. (2005). *Phénomènes radiatifs et îlot de chaleur urbain dans l'agglomération de Strasbourg*. Revue Géographique de L'Est, 45(2), 13 pages. <http://journals.openedition.org/rge/473>
- Geletic, J. et Lehnert, M. (2016). *GIS-based delineation of local climate zones: The case of medium-sized Central European cities*. Moravian Geographical Reports, 24(3) : 2-12.
- Gourguechon, C. (2018). *Classification de données images et vecteur et de nuages de points, dans le but d'extraire des zones climatiques types dans des quartiers de Strasbourg*. Projet de recherche technologique, INSA Strasbourg, Spécialité topographie.
- Hidalgo, J., Dumas, G., Masson, V., Petit, G., Bechtel, B., Bocher, E., Foley, M., Schoetter, R., Mills, G. (2019). *Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations*. Urban Climate, 27 : 64-89.
- Landes, T., Hayot, C., Najjar, G., Kastendeuch, P., Saudreau, M., Colin, J., Luhahe, R., Guillemin, S. (2014). *Modélisation 3D d'arbre pour comprendre le climat urbain. Un projet multidisciplinaire ambitieux*. Revue XYZ de l'Association française de topographie (AFT), XYZ n°141, pp. 61-68, ISSN 0290-9057.
- Montauban, O. (2019). *Une approche vectorielle pour classer des données images et vecteurs dans le but d'extraire une cartographie des zones climatiques locales des quartiers de Strasbourg*. Travail de Master II à l'INSA Strasbourg, spécialité topographie.
- Najjar, G., Colin, J., Kastendeuch, P., Ngao, J., Saudreau, M., Landes, T., Améglio, T., Luhahe, R., Guillemin, S., Schreiner, G., Kleinpeter, J., Nerry, F. (2015). *A three years long fieldwork experiment to monitor the role of vegetation on the urban climate of the city of Strasbourg, France*. In 9th International Conference on Urban Climate (p. 6). Toulouse, France.
- Pons, A., Mertz, L., Brolly, S., De Cadenet, P., Martin, S., Muller, C., 2019. *Adaptation au dérèglement climatique. Analyse des îlots de chaleur à l'échelle bas-rhinoise et transfrontalière*. Les Notes de l'ADEUS, 280, 4 pages : http://www.adeus.org/productions/note-280-adaptation-au-dereglement-climatique/files/note-280_ilots-chaleur-urbains_web.pdf
- Stewart, I. D., Oke, T. R. (2012). *Local climate zones for urban temperature studies*. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12):1879-1900.
- Unger, J., Lelovics, E., Gál, T. (2014). *Local climate zone mapping using GIS methods in Szeged*. Hungarian Geographical Bulletin, 63(1):29-41.
- Voogt, J. A. (2000). *Image Representations of Complete Urban Surface Temperatures*. Geocarto International, 15(3), 21-32.
- @Worldindata, 2019. *World Bank population estimates and urban ratios from the United Nations World Urbanization Prospects*. (https://ourworldindata.org/grapher/urban-population-share-2050?tab=chart&country=OWID_WRL)

Contacts

Tania LANDES¹, Georges NAJJAR¹, Mathieu KOEHL¹, Olivier MONTAUBAN², Camille GOURGUECHON², Pierre KASTENDEUCH¹, Philippe SLISSE³

1 Groupe PAGE/INSA Strasbourg, équipe TRIO, laboratoire ICube UMR 7357, Université de Strasbourg, CNRS (tania.landes ; georges.najjar ; mathieu.koehl ; kasten@unistra.fr)

2 Élèves ingénieurs topographes INSA Strasbourg à l'époque de l'étude. Aujourd'hui salariés dans des cabinets de géomètres-experts (montauban.olivier@gmail.com ; camille.gourguechon@laposte.net)

3 Chef de projet SIG3D, Service géomatique et connaissance du territoire, ville et Eurométropole de Strasbourg (Philippe.Slisse@strasbourg.eu)

ABSTRACT

This article presents two approaches aiming to produce a map of local climate zones in Strasbourg: an image approach and a vector approach. These "Local Climate Zones" were developed by Stewart and Oke in 2012 and have been validated internationally by the climatologists' community. Regarding the results obtained, this study has shown that both the image approach and the vector approach, are relevant since they led to similar LCZ maps. However, when a large database is available, as it was the case in Strasbourg, despite the significant effort needed to produce an LCZ map, the vector approach is recommended. Based on this database and a processing chain the definition of climatic parameters has been improved by integrating information particularly on vegetation. Furthermore, by taking into account the descriptive parameters to produce the spatial LCZ limits, the vector approach is more objective than the image approach, which is dependent on the definition of training areas.