

Analyse morphologique d'une ville méditerranéenne à partir des bases de données urbaines (BDU) et des outils SIG pour préparer la cartographie et la mesure des températures en période d'îlot de chaleur urbain (ICU)

Sébastien Bridier

Aix Marseille Université, LPED
3, place Victor Hugo, 13331 - Marseille Cedex 3,
France
sebastien.bridier@univ-amu.fr

LCZ

Canyon urbain

Marseille

L'objectif de cette étude est de préparer une campagne de mesures sur l'ensemble de la commune de Marseille en cartographiant, à partir du traitement de plusieurs couches de données numériques, les secteurs les plus favorables à la survenue d'îlots de chaleur urbains durant les situations atmosphériques favorables. Nous avons traité les couches : bâtiment, cadastre, voirie, végétation et Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour produire des indicateurs spatiaux similaires à ceux proposés dans la méthode des LCZ «Local Climate Zone» ainsi qu'un autre indicateur plus détaillé pour identifier les canyons urbains.

The objective of this study is to prepare a measurement campaign throughout the city of Marseille by mapping, from the treatment of multiple layers of digital data, the most favorable to the occurrence of urban heat island of sectors during favorable weather conditions. We treated the layers: building cadastre, roads, vegetation and terrain to produce spatial indicators similar to those proposed in the method of LCZ «Local Climate Zone» and one more detailed indicator to identify urban canyons.

Villes méditerranéennes et
changement climatique

Introduction

Cette étude repose sur l'hypothèse que durant les situations météorologiques radiatives, le climat urbain, et notamment la distribution des températures, est conditionné par les caractéristiques locales de la surface urbaine, à cause des interactions localisées entre le rayonnement solaire incident et celle-ci. Ce conditionnement est permis par la stabilité de la situation atmosphérique dite radiative (vent et nébulosité faibles ou nuls) qui limite le brassage horizontal et vertical dans la masse d'air. Il en résulte une variation spatiale et temporelle de la distribution des températures entre les différents secteurs de l'espace urbanisé.

Nous allons voir dans cet article comment exploiter les SIG et les bases de données urbaines (BDU) pour réaliser une spatialisation de différents indicateurs permettant de caractériser la mise en place et le maintien du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU).

La littérature scientifique a montré le lien très fort existant localement entre le relief, l'occupation du sol, la géométrie du bâti et des rues, la présence de la végétation et la distribution spatiale et temporelle des températures (Carrega, 1994, Stewart et Oke, 2012). Il est donc possible, à partir de l'analyse de données génériques (occupation du sol, MNT) et de la BDU de Marseille (couches SIG

cadastre, bâti, voirie, végétation, MNT/MNE) de cartographier les facteurs locaux de la distribution théorique des températures.

En climatologie la question de l'échelle est primordiale. Yoshino (1975), comme Stewart et Oke, ou Carrega ont montré qu'il existe un système d'échelles emboîtées qui permet de caractériser le phénomène selon son extension spatiale, son maintien dans le temps et son homogénéité dans les dimensions horizontale, verticale et temporelle (tableau 1).

Le climat urbain peut se définir comme une altération locale du climat régional. Il n'y a pas de climat typiquement urbain mais une modification du climat régional, dans l'espace urbanisé. La modification peut porter sur les températures, l'humidité, le vent, les précipitations, la nébulosité et la qualité de l'air. Cependant, c'est le choix de l'échelle qui va définir la nature et l'intensité de l'altération climatique observée. On peut détecter l'effet de l'espace urbanisé à l'échelle topoclimatique (100 m à 10 km) car la nature de la surface change entre l'espace urbanisé et les espaces naturels, agricoles ou aquatiques situés à proximité. Mais il est aussi possible d'observer des variations à l'échelle microclimatique (1 cm à 100 m) entre des secteurs présentant des variations de densité et de type de construction, de forme urbaine,

d'exposition, d'usage des espaces, de présence de végétation et d'eau en surface. De plus, puisqu'il s'agit principalement de l'interaction entre le rayonnement solaire et la « surface », la position du soleil dans le ciel va elle aussi contribuer à des variations temporelles conséquentes dans la journée (heure) et dans l'année (saison)¹⁶.

Le but étant de couvrir l'ensemble de la commune à une échelle microclimatique, nous verrons ici comment tracer les grandes tendances de la structure thermique d'une ville (échelle topoclimatique), puis comment préciser les variations plus fines à l'échelle du quartier et de la parcelle (échelle microclimatique).

D'un point de vue strictement physique, on considère que le système atmosphérique tire uniquement son énergie du rayonnement solaire incident, par l'intermédiaire de l'exposition directe de la surface terrestre. Toute variation dans l'apport d'énergie se fait sentir et se traduit par des variations des caractéristiques atmosphériques (températures, humidité, vent, précipitation, pression). à échelle macroclimatique, des mécanismes de régulation et d'inertie contribuent à temporiser ces fluctuations (rotation du globe, présence de masse d'eau, transport d'énergie par les courants marins, stockage de l'énergie par effet de serre). Localement, les variations d'interaction entre le rayonnement solaire incident et la « surface » sont sous le même type d'influences. Lors des situations radiatives la stabilité favorise l'expression climatique des influences locales, alors que les situations perturbées engendrent l'homogénéisation des couches atmosphériques proches du sol.

Le rayonnement solaire disponible se distribue de manière équivalente à l'échelle locale lors des épisodes radiatifs. Les variations locales sont donc uniquement dues à des variations de nature et de forme de la « surface », tandis que les variations temporelles sont essentiellement sous l'influence de la date et de l'heure.

Bien que la méthode présentée dans cette étude ait été appliquée à différents types d'espaces urbains (départements de la région parisienne (75, 92, 92, 93), Lyon, grandes villes du Languedoc, Beyrouth), les villes bordant la mer Méditerranée présentent pour un grand nombre des caractéristiques particulières, à savoir d'être adossées à la fois sur le littoral et sur le relief. Dans le cas de Marseille, la ville est tournée vers la mer (évolution historique et activité économique) mais s'est aussi étendue dans les terres vers le nord-est et l'est, puisque le littoral est fermé au nord et au sud par des reliefs conséquents (massif de l'Estaque au nord, massif des Calanques au sud) (figure 1). Le relief est découpé par des vallées qui jouent un rôle important comme limites naturelles, puis comme axes de communication et comme source de force motrice hydraulique. L'ensemble de ces facteurs contribue à une extension spatiale de la ville qui n'est pas isotrope, ainsi qu'à une sectorisation et une fragmentation importante marquée dans le paysage.

On retiendra donc que cette ville est construite sur un site de vallées et de collines, encadrées par des massifs montagneux. La distribution de l'occupation du sol est grossièrement concentrique avec une diminution progressive de la densité construite et une présence croissante de la végétation en allant du

Echelles du climat	Echelles horizontales	Echelles verticales	Echelle temporelles
Microclimat	1 cm à 100 m	1 cm à 10 m	0,1 s à 10 s
Climat local	100 m à 10 km	10 cm à 1 km	10 s à 3 h
Mésoclimat	1 km à 200 km	1 m à 1 km	3 h à 27 h
Macroclimat	200 km à 50000 km	1 m à 10 km	27 h à 10 j

Tableau 1. Système d'échelle proposé par Yoshino, 1975.

¹⁶ La hauteur et l'azimut du Soleil dans le ciel sont liés à des données astronomiques déterminées par les lois de la trigonométrie sphérique. Elles dépendent de l'heure solaire (angle horaire), du jour de l'année (déclinaison solaire), et de la latitude.

I. Méthodes et données

centre vers la périphérie. Les espaces plats sont construits et utilisés en totalité, alors que les reliefs et les pentes sont moins densément occupés. De larges espaces naturels sont situés en périphérie sur les massifs environnants. Ainsi, le centre ville apparaît globalement très fermé et minéral, alors que la périphérie est très ouverte et végétale. On peut donc s'attendre à une distribution concentrique des températures (ICU) mais l'effet de la mer, ainsi que celui des brises thermiques, peut altérer cette distribution théorique. Toutefois, au sein de cette organisation générale, il existe des variations locales de la température dues à la présence de végétation et à la diversité de la forme urbaine, notamment dans les quartiers en rénovation au centre, ou en construction en périphérie.

Nous ne développerons pas ici la variation temporelle de l'ICU même si c'est un des éléments permettant de définir le phénomène (gradient thermique entre centre et périphérie, et effet de stockage différant la baisse des températures durant la nuit dans les secteurs les plus chauds (Kastendeuch et al, 2010). Le but est ici d'analyser la distribution des températures en période d'ICU sur l'étendue d'une grande ville méditerranéenne française. Or les représentations statiques d'un phénomène dynamique (variations horaires significatives des températures) posent des problèmes sur une cartographie simple.

I.1. Les facteurs principaux

Concernant la variation spatiale de l'ICU, nous allons analyser le relief, l'occupation du sol, la présence de la végétation et de l'eau en surface et la géométrie des structures bâties, en passant de l'échelle topo-climatique à l'échelle microclimatique. Il existe simultanément des effets à l'échelle du territoire urbanisé et de sa périphérie, et des effets très locaux à l'échelle de l'îlot morphologique et de la rue.

Les facteurs principaux se manifestent à l'échelle topo-climatique. Ils concernent la structure de l'espace (relation terre/eau, relief, occupation du sol). Ils définissent grossièrement les grandes tendances de la variation spatiale des températures entre la ville et sa périphérie.

Le **premier facteur** reconnu de la variation des températures est la répartition terre/eau, pour des questions de vitesse de réchauffement et de chaleur spécifique des

matériaux. En effet la terre change rapidement de température sous l'action du rayonnement solaire direct alors que les masses d'eau sont plus stables thermiquement à cause de la chaleur spécifique de l'eau qui est plus élevée (eau : 4,18 kJ/kg/°C ; béton 0,84 kJ/kg/°C).

Le **deuxième facteur** reconnu est la distribution du relief, à cause des effets d'orientation et d'inclinaison entre la surface et le rayonnement solaire direct. Pour une ville méditerranéenne en bord de mer, adossée au relief, la combinaison du contraste terre/mer et des effets d'exposition différentielle dans le relief constitue une grande part des caractéristiques du climat local de jour comme de nuit (gradient thermique, brises de compensation et gravitaire¹⁷).

Le **troisième facteur** reconnu est la nature de l'occupation du sol. Les différences entre les structures et les matériaux présents à la « surface » occasionnent des différences dans l'albédo (fraction du rayonnement incident visible réfléti), donc dans l'absorption éventuelle de l'énergie solaire.

La chaleur spécifique des matériaux est là encore différente selon que les matériaux soient naturels ou artificiels. Enfin, la présence/absence d'eau évaporable (végétation, plan d'eau) contribue à une restitution de l'énergie absorbée sous forme de flux de chaleur latente (évaporation accompagnée d'une baisse des températures) ou de flux de chaleur sensible (échauffement perceptible de la surface pour dissiper l'énergie absorbée).

¹⁷ **Brisés de compensation** : mouvements d'air horizontaux résultants d'un gradient de pression induit par un gradient de température local. Ces phénomènes ont lieu le jour et la nuit.

Brisés gravitaire : mouvements d'air horizontaux résultant de l'effondrement vertical de la masse d'air en contact avec le sol. Ces phénomènes ont lieu durant la nuit et au lever du jour jusqu'à ce que le soleil commence à réchauffer la surface.

I.2. Les facteurs secondaires

Les facteurs secondaires, mais très importants à l'échelle de l'individu, se manifestent à l'échelle microclimatique. Ils concernent la géométrie des espaces construits et la distribution de la végétation.

I.3. Les données

En termes de méthode, les SIG font référence pour à la fois organiser, analyser, traiter et produire les données utilisées pour l'étude climatologique. Cette étude se fonde aussi bien sur des données au format vectoriel (occupation du sol, cadastre, bâti, voirie, végétation, MNT/MNE par photogrammétrie ou LIDAR) que raster (images satellites, MNT par radar). L'ensemble de ces données est disponible pour le grand public (Shuttle Radar Thematic Mission - SRTM-, LANDSAT, CORINE LANDCOVER) ou dans le cadre de convention avec les collectivités locales (ville de Marseille, Marseille Provence Métropole - MPM -, Base de Données Altitudes - BD Alti - de l'IGN, et du Centre Régional de l'Information Géographique - CRIGE - PACA.

Les facteurs principaux sont étudiés à l'échelle topoclimatique à partir de données génériques. Il est aussi possible de réaliser ces traitements à partir de la BDU de la ville de Marseille et de MPM.

II. Traitements

II.1. Le premier et le second facteurs : le rapport terre/eau et le relief

Le rapport terre/mer et le relief peuvent être visualisés dans une même figure (figure 1). On utilise aussi bien des données génériques SRTM ou la BD Alti de l'IGN pour cartographier le relief, les pentes et les expositions. Le contraste terre/mer favorise la mise en place de brises de compensation s'établissant sur des distances assez importantes – de plusieurs dizaines de kilomètres – selon des interactions avec l'arrière pays et les Alpes du sud, alors que les vallées canalisent localement les brises de compensation et gravitaires (programme ESCOMPTE, 2001, Durand et Cros, 2004; Pigeon, 2007). On distingue donc les grands éléments du relief, soit le massif de l'Etoile au nord, le Garlaban à l'est, Marseilleveyre et les

Calanques au sud. Trois vallées découpent ce relief : les Aygalades au nord, le Jarret vers le nord-est et l'Huveaune vers l'est. Les effets d'exposition des versants élevés et bien orientés favorisent des gradients thermiques importants, occasionnant la mise en place des brises thermiques de compensation le long des vallées (figure 1).

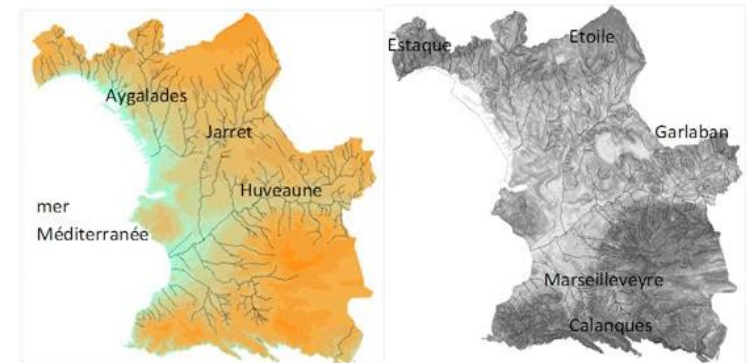


Figure 1. Réseau hydrographique, distribution des altitudes, et distribution des pentes. (sources : SRTM à 90m, BD Topo IGN - traitements S.Bridier)

II.2. Le troisième facteur : l'occupation du sol

La ville est née au bord de la mer Méditerranée sur le site grec correspondant au Vieux Port et au quartier du Panier. Elle est longtemps restée confinée dans ses murs puis s'est étendue progressivement à partir de la fin du Moyen âge, puis à la Renaissance et à l'ère industrielle (Roncayolo, 1996). Elle couvre actuellement 242 km² mais comporte encore de grands espaces naturels protégés sur les massifs. Les données CORINE LANDCOVER 2012 (CLC 12) (figure 2) permettent de visualiser la distribution de l'occupation du sol. Le tissu urbain continu (trait noir) est limité au centre de la ville alors que le tissu urbain discontinu (aplat rouge) constitue l'essentiel de la surface de la commune avec les espaces naturels (aplat vert). Il y a cependant de grandes surfaces industrielles et d'activité (port autonome, gares, usines et espaces de stockage du port, zones d'activité). On verra avec les données de la BDU qu'il est possible

de définir très précisément l'extension des zones les plus densément construites et de les caractériser avec beaucoup de détails. La classification CLC 12 permet aussi de connaître la nature des matériaux et notamment de faire la part entre l'artificiel et les espaces végétalisés, susceptibles de capter le rayonnement incident, de le refléter, de chauffer ou d'évaporer.

II.3. Les facteurs secondaires

Les facteurs secondaires sont étudiés à l'échelle microclimatique à partir des données de la BDU. On utilise les couches cadastre, bâti, voirie, végétation, MNT et MNE. Alors que les facteurs principaux permettent de dégrossir la structure thermique moyenne de la ville, l'approche microclimatique va approfondir au niveau local la distribution des facteurs influençant la distribution des températures. L'extension spatiale reste identique, il ne s'agit pas de zoomer sur un

quartier mais bien d'augmenter la résolution sur tout le territoire communal. Pour se donner un ordre d'idée la couche occupation du sol de CORINE LANDCOVER comporte 187 objets en 44 postes, entre type artificiel, agricole, naturel et eau de surface. La couche « bâti » comporte quant à elle plus de 300 000 objets (bâtiments). Le MNT est constitué de 676 000 points courants et 70 000 points sommets bâti et 128 000 points façades. La couche cadastre comporte 118 000 parcelles qui sont regroupés en 25 000 îlots morphologiques. La couche végétation comporte 12 000 objet (arbres, bosquet, espaces verts, pelouse). L'ensemble de ces données a été traité pour cartographier différents indices spatiaux.

Selon les travaux récents faisant autorités (Stewart et Oke, 2012), il est possible d'identifier différents types de zones climatiques (LCZ ou «Local Climate Zone») dans l'espace urbain. Les auteurs proposent 10 indicateurs permettant de classer les espaces dans 17 types de LCZ, dont 10 pour

l'espace urbain (5 indicateurs liés à la géométrie et 5 aux caractéristiques de la surface). Un bon exemple de mise en application de ces indicateurs est présenté par la carte interactive de l'IAU (<http://carto.iau-idf.fr/webapps/imu/>). Nous avons construit certains des indicateurs proposés par la méthode des LCZ et nous en proposons de nouveaux.

II.4. Le taux de construction

La cartographie du taux de construction par îlot (figure 3) permet de localiser les secteurs les plus densément construits au centre et la diminution progressive de la densité vers la périphérie. Sur le zoom, on remarque que le centre est très dense et que le Jarret constitue une limite à l'est au delà de laquelle les densités diminuent significativement.

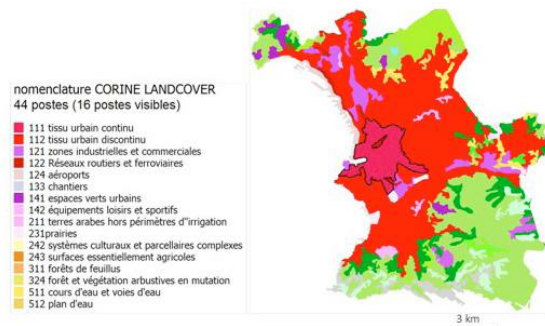


Figure 2. Occupation du sol selon CLC 2012 (tissu urbain continu cerné en noir). (Sources : Corine Landcover 2012)

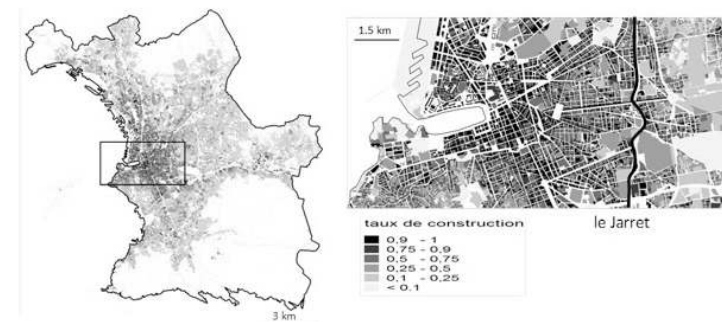


Figure 3. Taux de construction par îlot. (sources : cadastre et bâti de la BD Topo IGN - traitements S. Bridier)

II.5. Les cœurs d'îlots

Il est aussi possible d'analyser la distribution du vide. On s'intéresse alors aux cœurs d'îlot. Cet espace est délimité par les bâtiments formant la façade de la rue (dans la figure 4 les cœurs d'îlot sont en gris).

L'ouverture du tissu urbain est un indicateur aussi important que son remplissage. La structure des centres anciens des villes méditerranéennes est souvent très fermée. La fermeture empêche le soleil d'entrer dans le maillage urbain et donc d'échauffer façades et voiries. En déterminant la surface et la forme des espaces vides, il est possible d'identifier les espaces susceptibles de piéger le rayonnement. On distingue les puits de lumières, les cours, les cœurs d'îlot et les îlots ouverts.

Le fait que les immeubles forment une continuité affecte à la fois la rue et le cœur d'îlot.

Au niveau de la rue la continuité de la façade constitue le canyon urbain, lieu théorique où le captage et le piégeage sont les plus importants, et qui seront associés avec une restitution différée de l'énergie stockée.

Au niveau du cœur d'îlot, le fait que cette partie soit totalement fermée, partiellement ou totalement ouverte, détermine à la fois la captation, le piégeage et la restitution de l'énergie solaire, mais aussi la ventilation. La construction de cet indicateur ouvre donc des pistes pour la compréhension du confort à l'échelle de l'îlot et de la parcelle.

Figure 4. Répartition des cœurs d'îlot dans différents quartiers de la ville. (Sources : cadastre et bâti de la BD Topo IGN - traitements S. Bridier)

Une carte à l'échelle de la commune ne présente pas d'intérêt particulier, par contre, en zoomant, il est possible d'identifier des variations intéressantes. On peut remarquer que dans les quartiers de l'hyper centre (Belsunce) les cœurs d'îlot sont très petits, voire absents. Sur le quartier de la Plaine, les cœurs d'îlot sont fermés mais suffisamment étendus pour occuper plus de surface que les bâtiments. Au delà, dans le quartier de la Blancarde, les cœurs d'îlot ne sont plus fermés et représentent une majorité de la surface des îlots.



II.6. Les agrégats ou «cluster» de bâti

Pour travailler sur la continuité du bâti, nous avons créé un indicateur « agrégat de bâti » (figure 5). Il est construit en calculant la taille des clusters de bâtiments mitoyens. En fixant un seuil de taille, on peut identifier les secteurs les plus compacts. Les tronçons de voirie bordant ces gros clusters sont considérés comme des rues canyons, les plus susceptibles de capter, piéger et chauffer.



Figure 5. Distribution spatiale des agrégats de bâti (Marseille, centre ville, Vieux port et La Plaine). (Sources : cadastre et bâti de la BD Topo IGN - traitements S. Bridier)

Conclusion

Les différents traitements présentés peuvent être mis en œuvre à partir des outils SIG et des bases de données disponibles (générique ou BDU). Ils ont été réalisés depuis 2011 sur plusieurs villes et départements et mettent toujours en évidence les mêmes structures spatiales, que ce soit à l'échelle d'une commune, d'une agglomération ou d'un département. Alors qu'il est possible de rentrer dans des calculs très détaillés, il ressort que les couches comme le bâti, le cadastre, la voirie, la végétation et le MNT/MNE sont largement suffisantes pour cartographier en tout point d'une agglomération les facteurs de l'échauffement en période d'ICU.

L'objectif de ces traitements est à la fois de disposer d'éléments pour comprendre la répartition des températures dans un milieu urbain très hétérogène, mais aussi de pouvoir caractériser les sites susceptibles d'être équipés avec des capteurs météorologiques. Le milieu urbain est en effet trop complexe pour pouvoir être équipé selon les règles standards de l'Organisation Météorologique Mondiale. Il faut donc, à défaut de disposer d'un site idéal, être en mesure de comprendre les influences locales exercées sur les capteurs et pouvoir décider en conscience de l'emplacement des instruments de mesures.

II.7. La végétation accessible ou captive

Si on considère maintenant la végétation, on peut ajouter aux indicateurs de base – comme le taux de végétation par parcelle ou par îlot – un indicateur sur la présence de la végétation au niveau de la voirie mais aussi au niveau des cœurs d'îlot. On dispose alors d'une information sur la végétation accessible et la végétation captive. Un traitement par SIG (figure 6) permet de distinguer les surfaces de végétation en milieu ouvert (espace public, rue) ou en milieu fermé (cœurs d'îlot).



III. Résultats

L'ensemble des indicateurs se recoupe assez logiquement. Les taux de surface construite sont associés avec les limites du type 111 de CLC 12 (tissu urbain continu). De même avec la répartition des agrégats bâtis de plus de 25 individus par cluster. La présence de la végétation augmente avec la distance au centre et, plus en détail, la végétation du centre est souvent dans l'espace public car les cœurs d'îlots sont très étroits ; dans la proche périphérie la végétation est plus captive à l'intérieur des îlots, alors qu'en périphérie plus lointaine elle est plus fréquente sur l'espace public ou devient accessible du fait de l'ouverture totale des îlots.

Seule l'interface SIG permet d'exploiter au mieux le résultat de tels traitements car il permet à la fois d'avoir une vue d'ensemble, mais aussi d'avoir une vue détaillée en tout point de l'espace étudié.

D'autres calculs encore plus fins ont été réalisés à partir de ces données, comme le bilan d'énergie radiative sur les façades et les toitures, la caractérisation des rues canyons (hauteur, largeur, orientation, exposition) pour chaque brin du réseau routier disponible, le système de brise thermique tenant compte des pentes et des rues. Au delà de l'approche théorique, seules les mesures peuvent venir confirmer les hypothèses liant l'espace géographique et les températures de l'air.

Figure 6. Répartition de la végétation dans les rues et les cœurs d'îlots dans différents quartiers de la ville. (Sources : cadastre, bâti et végétation de la BD Topo IGN - traitements S. Bridier)

Carrega P., 1994 : *Topoclimatologie et habitat. Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée*. In *Revue de Géographie du laboratoire d'analyse spatiale Raoul Blanchard*, 408p.

Durand P. et Cros B., 2004 : Le programme ESCOMPTE. *La Météorologie*, 44,16-27

Kastendeuch Pierre P., Najjar G., Lacarrere P. et Colin J., 2010 : Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg. *Climatologie*, 7, 21-37.

Pigeon G., 2007 : *Les échanges sol-atmosphère en zone urbaine : projet CLU-ESCOMPTE et CAPITOU*. Thèse Université Paul Sabatier Toulouse III, 172p.

Stewart I. D. and Oke T. R., 2012 : Local climate zones for urban temperature studies, *Bulletin of the American Meteorological*, 12. <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

Roncayolo M., 1996 : *Marseille : les territoires du temps*. Paris, Éd. locales de France

Yoshino M., 1975 : *Climate in a small area*. Tokyo univ. Press, 549p.