

## TABLE DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>11</b>
<b>CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE .....</b>	<b>13</b>
1.1. CLIMATOLOGIE URBAINE.....	13
1.2. ECHELLES D'ÉTUDES .....	14
1.3. ILÔT DE CHALEUR URBAIN .....	16
1.4. VARIABLES DU PHÉNOMÈNE DE L'ILÔT DE CHALEUR.....	18
1.4.1. Facteur de vue du ciel.....	20
1.4.2. Méthodes d'obtention du facteur de vue du ciel.....	20
<b>CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE .....</b>	<b>25</b>
2.1. ETUDE DE CAS: LA VILLE DE SÃO PAULO, BRESIL .....	25
2.1.1. Planification de la ville de São Paulo.....	25
2.1.2. Choix des quartiers d'étude .....	28
2.2. MONITORAGE <i>IN LOCO</i> .....	34
2.3. PROCESSUS D'ANALYSE .....	35
2.3.1. 3D Sky View.....	35
2.3.2. Simulation avec 3D SkyView .....	36
2.3.3. Elaboration et analyse de la maquette virtuelle 3D .....	38
<b>CHAPITRE 3 RÉSULTATS.....</b>	<b>39</b>
3.1. MONITORAGE <i>IN LOCO</i> .....	39
3.2. 3D SKY VIEW ET MAQUETTE 3D .....	42
<b>CHAPITRE 4 DISCUSSION .....</b>	<b>49</b>
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES FUTURES .....</b>	<b>51</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>53</b>

## LISTE DE FIGURES

Figure 1 - Représentation schématique de la couche limite urbaine .....	15
Figure 2 - Génération de l'îlot de chaleur urbain .....	18
Figure 3 - Relation empirique entre la géométrie du canyon urbain et l'intensité maximale de l'îlot de chaleur .....	19
Figure 4 - Facteurs de vue du ciel de différents sites à Hong Kong (Chine) .....	21
Figure 5 - Comparaison entre les valeurs du facteur de vue du ciel fait sur terrain et simulé par le programme 3D Skyview.....	22
Figure 6 - Vue du centre ville de São Paulo.....	25
Figure 7 - Evolution de l'urbanisation de São Paulo .....	27
Figure 8 - Carte de température de surface - Satellite Landsat 5TM .....	28
Figure 9 - Carte topographique et localisation des régions d'étude.....	29
Figure 10 - Carte d'utilisation du sol - Jardim Paulista .....	30
Figure 11 - Carte d'utilisation du sol dans la région d'étude - Jardim Paulista.....	30
Figure 12 - Carte de hauteur de bâtiments dans la région d'étude .....	31
Figure 13 - Photo de la rue du point de monitoring - Jardim Paulista .....	31
Figure 14 - Carte d'utilisation du sol - Belém.....	32
Figure 15 - Carte d'utilisation du sol dans la région d'étude - Belém .....	32
Figure 16 - Carte de hauteur de bâtiments dans la région d'étude- Belém.....	33
Figure 17 - Photo de la rue du point de monitoring - Belém .....	33
Figure 18 - Station Météorologique - Jardim Paulista .....	34
Figure 19 - Projection Stéréographique d'un canyon urbain .....	35
Figure 20 - Stereonet ( Maille stéréographique) d'un plan équatorial.....	35
Figure 21 - Exemple de "shapefile" .....	36
Figure 22 - Interface de l'extension 3D Skyview .....	37
Figure 23 -Exemple de projection stéréographique réalisé à partir des données 2D et la scène 3D (fisheye) .....	37
Figure 24 - Interface d'outil "Extrude".....	38
Figure 25 - Facteur de vue du ciel dans les points de monitoring .....	42
Figure 26 - Maquette simplifiée de la topographie de la ville de São Paulo .....	42
Figure 27 - Perspective du quartier Belém.....	43
Figure 28 - Perspective du quartier Jardim Paulista .....	43
Figure 29 - Perspective de la région d'étude du quartier Belém avec les points d'observation.....	44
Figure 30 - Projection Stéréographique et trajectoire solaire du point d'observation 1 Belém.....	44
Figure 31 - Facteur de vue du ciel (FVC) du point d'observation 1 Belém .....	44
Figure 32 - Projection Stéréographique des points d'observation de la région d'étude Belém et les valeurs respectives du facteur de vue du ciel.....	45
Figure 33 - Perspective de la région d'étude du quartier Jardim Paulista avec les points d'observation .....	46
Figure 34 - Projection Stéréographique du point d'observation 1 Jardim Paulista ..	46
Figure 35 - Facteur de vue du ciel (FVC) du point d'observation 1 - J.P. ....	46
Figure 36 - Projection Stéréographique des points d'observation de la région d'étude Jardim Paulista et les valeurs respectives du facteur de vue du ciel .....	47
Figure 37 - Exemple de projection equidistant et projection stéréographique par rapport au trajectoire solaire .....	49
Figure 38 -Perspective de la simulation des nouveaux bâtiments dans la région d'étude Belém .....	50
Figure 39 -Facteur de vue du ciel pour la nouvelle configuration dans la région d'étude Belém.....	50

## LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1 - Variation de température en chaque point de monitoring pendant la journée du 23 février 2011 .....	39
Graphique 2 – Comparaisons entre l'îlot de chaleur diurne et les valeurs moyennes de température de l'air (T) récoltées sur place .....	40
Graphique 3 – Comparaison des valeurs moyennes de radiation solaire incidence (I) récolté sur place et les différences de ceux-ci en relation à la station de référence .....	40
Graphique 4 – Comparaison des valeurs moyennes d'humidité relative (UR) récolté sur place et les différences de ceux-ci en relation à la station de référence .....	40
Graphique 5 – Comparaison entre l'îlot de chaleur diurne et les valeurs moyennes de vitesse du vent récoltées sur place .....	41
Graphique 6 – Comparaison entre les valeurs de température de surface (Ts) .....	41

## LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1 - Données des quartiers Jardim Paulista et Belém.....	29
---	----

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
FVC	Facteur de vue du ciel <i>Sky view factor ( SVF)</i>
ICU	Îlot de Chaleur Urbain <i>Urban Heat Island (UHI)</i>
ICUS	Îlot de Chaleur Urbain de Surface <i>Surface Heat Island (SHI)</i>
ICUC	Îlot de Chaleur Urbain de la Canopée <i>Canopy Layer Heat Island (CLHI)</i>
ICUL	Îlot de Chaleur Urbain de la couche Limite <i>Boundary Layer Heat Island (BLHI)</i>
INMET	Institut National de Météorologie (Brésil)
ISO	International Organization for Standardization
PET	Température Equivalente Physiologique <i>Physiological Equivalent Temperature</i>
SIG	Système d'Information Géographique

## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

°C	degré Celsius (unité de température)
I	Radiation solaire incidente
j	jour (unité de temps)
h	heures (unité de temps)
ha	hectare
km <sup>2</sup>	kilomètre carré (= 1 000 000 m <sup>2</sup> )
m	mètre
m <sup>2</sup>	mètre carré
pop	population
s	seconde (unité de temps)
T	Température de l'air
Trm	Température Rayonnante Moyenne
UR	Humidité Relative de l'air
v	vitesse du vent
W/ m <sup>2</sup>	watts par mètre carré
ΔTu-r	intensité d'îlot de chaleur



## INTRODUCTION

Ce travail de recherche vise à aborder l'utilisation d'un Système d'information Géographique (SIG)<sup>1</sup> pour l'analyse de la géométrie urbaine comme outil d'aménagement du territoire. L'analyse de la géométrie urbaine est un facteur déterminant de la distribution de la température. C'est donc un indicateur de confort thermique et de la formation des îlots de chaleur urbains.

Selon Colombert (2008), plusieurs facteurs entrent dans la formation du climat urbain : des facteurs naturels (les conditions anticycloniques, la saison, les conditions météorologiques de la journée, la vitesse du vent, la couverture nuageuse, etc.) et des facteurs urbains, qui comprennent à la fois la couche superficielle du sol (présence plus ou moins importante de surfaces végétales ou d'eau), les activités humaines (rejets de chaleur anthropique et de polluants), et la structure urbaine (morphologie du cadre bâti, matériaux de construction).

Les recherches concernant la diminution du phénomène de l'îlot de chaleur urbain permettent de comparer l'influence des différents facteurs urbains en tenant compte de la possibilité de mettre en œuvre ces différentes modifications. Les premiers travaux sur l'îlot de chaleur ont été réalisés à l'échelle de toute une agglomération, mais ensuite les climatologues se sont progressivement intéressés à d'autres paramètres climatiques à plus petite échelle, mettant ainsi en valeur l'importance de la géométrie urbaine et des propriétés physiques des matériaux de construction.

L'utilisation des SIG dans le domaine des îlots de chaleur urbains (ICU) est relativement récente. Des études menées entre 2005 et 2007 ont prouvé que la géomatique pouvait être appliquée avec succès à l'étude des ICU pour mettre en évidence ce phénomène et la variabilité de son intensité. A partir des paramètres connus qui influent sur l'ICU, comme la géométrie urbaine, des données sont intégrées à un SIG afin de bâtir un modèle cartographique. Le modèle créé permet de visualiser les zones à risque, de détecter de nouvelles zones apparentes et de planifier où concentrer des projets de verdissement (de petite ou grande envergure). La qualité et la clarté des différents scénarios possibles produits à l'aide du SIG contribuent également à une meilleure analyse et une meilleure compréhension de ces enjeux afin de prendre des mesures d'adaptation du milieu urbain.

## PROBLÉMATIQUE

La morphologie urbaine transforme le climat local en provoquant l'augmentation des écarts de température dans les villes. L'analyse du comportement thermique de l'environnement urbain permet de mieux aménager et de minimiser l'impact de l'augmentation de température dans les villes. Dans ce travail, nous utiliserons l'outil 3D skyview du Système d'Information Géographique qui permet de simuler la géométrie urbaine par la représentation du facteur de vue du ciel (sky view factor - SVF) et de calculer sa valeur. Le facteur de vue du ciel indique la relation entre la zone visible du ciel et la région couverte par des structures urbaines. L'implantation de cet outil dans une extension 3D du SIG est utile non seulement car il permet une analyse de la géométrie urbaine de manière rapide et directe à partir des différents points d'observation, mais aussi car il peut aider à prévoir le facteur de vue du ciel dû à des futurs bâtiments sans le coût usuel associé aux caméras et aux manipulations des images. Ce travail vise à explorer la potentialité des SIG dans ses outils tri-dimensionnels qui pourraient être utilisés pour analyser et prévoir la géométrie urbaine et son analyse thermique.

---

<sup>1</sup> Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) offrent diverses possibilités des bases de données au travers d'une visualisation et d'analyse géographique propres aux cartes. Ils sont utilisés par un grand nombre d'applications comme dans les enjeux majeurs de l'environnement, démographie, santé publique, etc. et ils ont tous un lien étroit avec la géographie. De nombreux autres domaines tels que la recherche et le développement de nouveaux marchés, l'étude d'impact d'une construction, l'organisation du territoire, la gestion de réseaux, etc. sont aussi directement concernés par les SIG pour créer des cartes, pour intégrer tout type d'information, pour mieux visualiser les différents scénarios, pour mieux présenter les idées et pour mieux appréhender l'étendue des solutions possibles.<sup>1</sup> Source : [www.esrifrance.fr](http://www.esrifrance.fr), consulté le 31 mars 2010.



# CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

## 1.1. Climatologie urbaine

La croissance urbaine accélérée de ces derniers siècles a provoqué un changement significatif non seulement dans l'organisation de la superficie terrestre, mais aussi dans le milieu atmosphérique. Les altérations climatiques dues aux processus de l'urbanisation peuvent avoir des effets au-delà des limites de l'agglomération urbaine, affectant les régions dans la proximité des activités humaines (BRYSON & ROSS, 1970). Selon Assis (2000), les études de climatologie urbaine ont été de plus en plus utilisées pour orienter la conception de l'aménagement urbain local même à l'échelle du projet urbain. Les principaux aspects considérés sont généralement liés à la pollution de l'air et au confort thermique humain.

Olgay (1998) relate que pour l'homme, contrôler l'environnement physique et créer les conditions favorables au développement des activités humaines ont toujours été des questions liées à l'idée d'habiter. Selon Yoshino (1990), les premières études sur le climat urbain ou sur les conditions climatiques des villes datent d'avant Jésus Christ. Les civilisations grecques et romaines considéraient déjà les aspects climatiques pour établir leurs villes.

Colombert (2008) mentionne que Vitruve ou Marcus Vitruvius Pollio (75-26 avant Jésus Christ), architecte et ingénieur romain, a écrit sur les relations entre l'aménagement des villes et les conditions climatiques. Postérieurement, Alberti a démontré comment les problèmes de salubrité des villes devaient être intégrés dans l'aménagement urbain. Manasara Silpasatra (avant JC), un indien, a écrit sur la prise en compte des conditions de luminosité et de ventilation pour la conception de l'aménagement. L'étude du climat urbain est également très liée à l'intérêt pour la pollution de l'air. C'est à partir de la fin du XVIIIème siècle que naît vraiment la climatologie urbaine, avec l'arrivée progressive de mesures instrumentales.

Selon Landsberg (1981), l'étude systématique du climat urbain a été initiée à partir de la deuxième partie du XIXème siècle avec l'étude de Luke Howard sur la différence de température entre la ville de Londres et ses alentours. Colombert (2008) relate qu'en 1927, Schmidt et Pepler effectuent la première traversée en voiture avec un équipement de mesures mobile, et la même année, Geiger publie un ouvrage sur les microclimats en incluant la climatologie urbaine. Enfin, en 1937, Kratzer publie le premier ouvrage sur la climatologie urbaine. La recherche en climatologie urbaine va alors s'accélérer durant la deuxième partie du XXème siècle. Assis (2005) rapporte que les recherches se multiplient grâce à l'expansion des réseaux d'observation météorologique.

Le climat urbain est défini par Monteiro (2003, p.19) comme « un système qui englobe le climat d'un espace terrestre déterminé et son urbanisation ». Pour Andrade (2005, p.70), le climat urbain résulte des interactions des « facteurs urbains avec le climat régional et avec le milieu physique pré-existant ».

Yoshino (1990-1991) estime que les progrès effectués dans cette discipline s'expliquent et sont mis en évidence par l'apparition progressive des éléments et événements suivants :

- 1) Les observations se sont élargies à la troisième dimension au-dessus de la ville.
- 2) Les méthodes de télédétection et d'interprétation des photographies aériennes ont été introduites.
- 3) Les simulations numériques ou les études de modélisation ont été employées en utilisant un ordinateur.
- 4) Les analyses et la cartographie ont été mises en relation avec la pollution atmosphérique et les conditions topoclimatiques.



- 5) Des ouvrages, articles à comité de lecture, et bibliographies en climatologie urbaine ont été publiés.
- 6) Les effets de la ville sur les précipitations ont été étudiés avec l'îlot de chaleur urbain.
- 7) Les îlots de chaleur sont considérés en relation à la densité bâtie, le paramètre de rugosité, le facteur de vue du ciel<sup>2</sup> (*sky view factor*), la population, etc.
- 8) La climatologie urbaine n'a plus été étudiée uniquement dans les pays développés, mais également dans les pays en développement.
- 9) Les problèmes environnementaux dans les villes sont réapparus.
- 10) Une importance a été donnée aux travaux portant sur les processus comme les études des bilans d'énergie et en eau.

Colombert (2008) résume que la connaissance en climatologie urbaine est issue à la fois des mesures sur sites, de la simulation en soufflerie ou en tunnel aérodynamique et des simulations numériques. Ainsi, grâce à de nombreuses campagnes de mesures et à la modélisation plus ou moins fine des phénomènes physiques en jeu, les climatologues ont pu décrire et comprendre avec de plus en plus de précision la formation du climat urbain. L'auteur mentionne que si les premiers travaux étaient avant tout concentrés sur l'îlot de chaleur urbain observé globalement sur toute l'agglomération, les climatologues se sont progressivement intéressés à des échelles inférieures mettant ainsi en exergue l'importance de la géométrie urbaine et des matériaux de construction. (AIDA et GOTOH, 1982 ; OKE, 1988 ; TAHA et al. ; 1988).

Aujourd'hui les échanges d'énergie entre l'atmosphère et la surface urbaine sont au cœur de nombreuses recherches sur la modélisation du climat urbain. Par contre antérieurement, la relation entre le milieu urbain et sa température a été largement simplifiée par les climatologues et les modèles des différents chercheurs ont principalement estimé la différence de température maximales entre zones urbaines et zones rurales la nuit (c'est le moment où l'îlot de chaleur est le plus conséquent).

## 1.2. Echelles d'études

L'îlot de chaleur urbain peut être examiné à différents niveaux au sein d'une ville (PIGEON, 2007). Il existe différentes façons de mettre en évidence les îlots de chaleur ainsi que leur intensité, en fonction de l'échelle d'étude. Il est nécessaire de comprendre les différentes échelles verticales et horizontales.

Les échelles verticales « Urban Boundary Layer» et « Urban Canopy Layer» (figure 1) se réfèrent à la chaleur de l'atmosphère urbaine et l'îlot qui leur est associé est mis en évidence par mesure directe de la température de l'air urbain à différentes hauteurs. Le « Urban Boundary Layer » (Couche urbaine limitrophe) se situe au-dessus du niveau moyen des toits des bâtiments entre l'atmosphère et l'espace urbain ; et le « Urban Canopy Layer » ( Couche intra-urbaine) comprend la couche entre le sol et le niveau moyen des toits des bâtiments ; soit entre l'atmosphère et les éléments urbains (canyons). Cependant, la première échelle d'observation des îlots de chaleur peut être mise en évidence par thermographie infrarouge par satellite (RINGENBACH, 2004). Parnetier (2010) remarque que l'utilisation d'images satellites permet de les observer à plus grande échelle, c'est-à-dire à l'échelle de la ville dans son ensemble et de sa banlieue, contrairement aux relevés de températures réalisés au sein des différents quartiers qui fournissent des données à plus petite échelle.

---

<sup>2</sup> Le facteur de vue du ciel correspond à la portion de ciel observable à partir de la surface considérée. Ce facteur est égal à 1 dans le cas d'une surface plane sans obstacle et varie entre 0 et 1. (COLOMBERT, 2008)

Il semble aussi pertinent de s'attarder sur les îlots de chaleur à l'échelle de la canopée (ICUC), dans la mesure où les infrastructures urbaines et les activités humaines influençant l'intensité du phénomène appartiennent à cette échelle.

Selon Parmentier (2010), l'observation des ICUC demande l'étude de paramètres qui n'ont pas le même « rôle » dans la définition du phénomène des îlots de chaleur. A l'échelle horizontale, trois échelles d'étude peuvent être distinguées: micro-échelle, échelle locale et méso-échelle (OKE, 2004) (figure 1) :

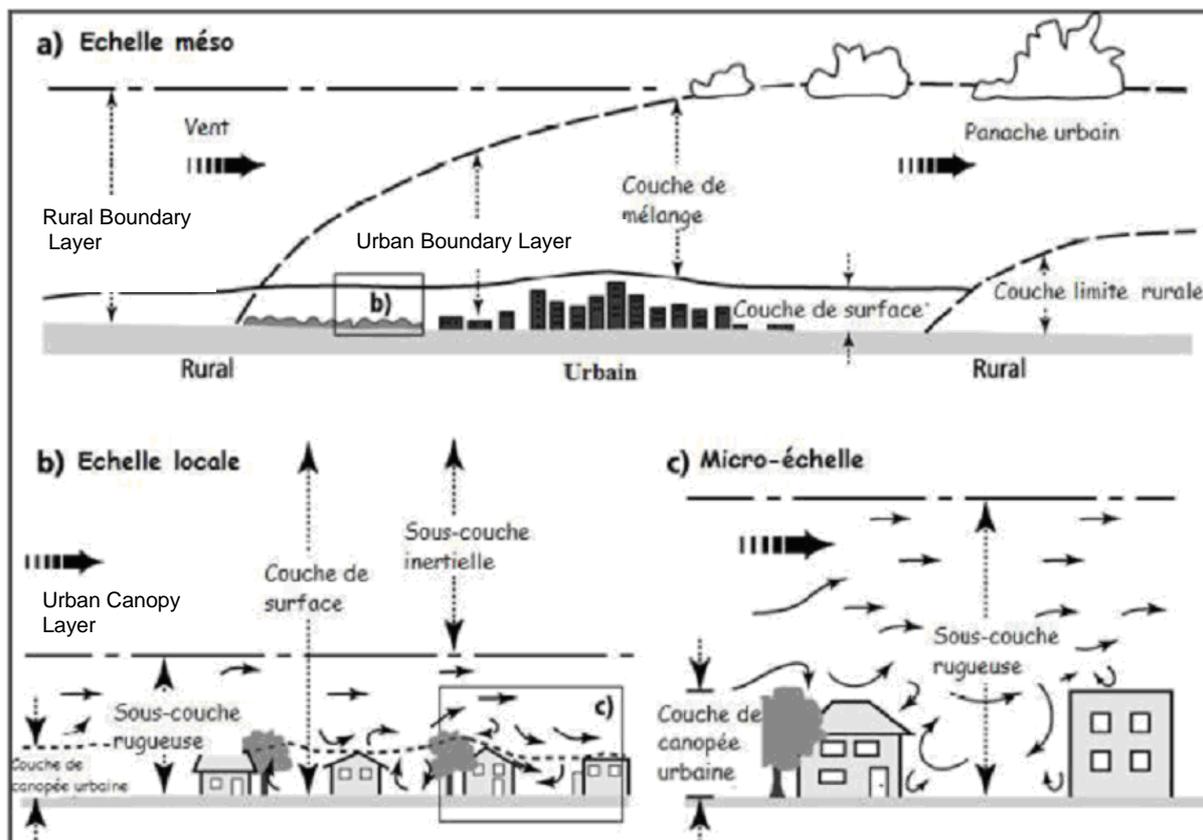
(1) La micro-échelle est une échelle typique du microclimat urbain et est liée aux dimensions individuelles des éléments urbains (au niveau d'un bâtiment, d'une rue, d'une arbre, d'un jardin, d'une cour, etc.). En effet, à faible distance on peut observer des différences de température de quelques degrés et le flux d'air est également, perturbé par le moindre objet (COLOMBERT,2008).

(2) L'échelle locale inclue les effets climatiques qui découlent de la forme du paysage, c'est-à-dire les caractéristiques de la zone étudiée, comme la topographie, mais exclue les effets micro climatiques. Dans le cas d'une zone urbaine, l'échelle locale correspond à un quartier pour lequel on peut observer une unité dans le développement urbain (unité architecturale, taille et espacement des bâtiments, activité, etc.) (COLOMBERT,2008).

(3) La méso-échelle correspond à l'influence intégrée de la ville dans le climat urbain. Une seule station ne peut pas représenter cette échelle car elle s'étend sur des dizaines de kilomètres.

Pour l'aménagement des villes d'un point de vue bioclimatique, la compréhension des altérations qui ont lieu à l'échelle de la canopée (ICUC) est fondamentale, étant donné que l'îlot de chaleur est la manifestation la plus significative du climat urbain.

**Figure 1** : Représentation schématique de la couche limite urbaine (CLU) à méso-échelle(a), à l'échelle locale (b) et à micro-échelle (c)



Source : Leroyer (2006), d'après Oke (1987).

Nous aborderons dans ce travail différentes échelles d'étude. A l'échelle méso, nous utiliserons une carte des températures de surface de la ville de São Paulo (Brésil) obtenue à partir d'une image satellite pour identifier les endroits les plus chauds et ceux de températures plus basses. A l'échelle locale, nous analyserons la géométrie urbaine de deux quartiers avec des températures distinctes. La recherche englobe aussi la récolte des données micro-climatiques.

La morphologie urbaine de la ville est un facteur essentiel de la particularité climatique du milieu urbain. Les rues et les hautes parois verticales forment ce que l'on nomme les canyons urbains (NUNEZ et OKE, 1977 ;OKE,1978) et constituent de véritables pièges radiatifs. Selon Santamouris (2001), la distribution de la température de l'air dans la couche intra-urbaine est affectée en grande partie par le bilan d'irradiation. Minella (2009) remarque que la géométrie urbaine et quelque autre élément qui obstrue la vue du ciel influent sur le contrôle de la température de superficie ( $T_s$ ) et de la température de l'air. La perte d'irradiation est plus lente dans les surfaces urbaines que dans les surfaces rurales, donc il y a effectivement plus de gain solaire que de perte. Cet effet est considéré comme la principale cause des îlots de chaleur urbains (CHAPMAN ;THORNES ;BRADLEY,2001).

### 1.3. Ilot de chaleur urbain

L'apparition d'un îlot de chaleur<sup>3</sup> (ICU) est la manifestation climatique la plus connue de l'influence du milieu urbain sur son climat. Les îlots de chaleur urbains désignent des élévations localisées de températures, particulièrement des températures maximales diurnes et nocturnes, enregistrées en milieu urbain par rapport aux zones rurales ou forestières voisines PARMENIER(2010). De manière générale, l'ICU est défini lorsque la température au sol est plus élevée de 5 à 10 C en ville que dans la zone rurale environnante (CAMILLONI et BARRO,1997 ;CHARABI,2001). La différence de température atmosphérique entre les villes et les campagnes est un phénomène connu depuis le XIXème siècle. Selon Minella(2009), la différence maximale de température entre les superficies urbaines et rurales est nommée l'intensité de l'îlot de chaleur ( $\Delta T_{u-r}$ ). Parmentier (2010) remarque que cette différence présente à tout moment de la journée et de l'année, est généralement beaucoup plus perceptible le soir et la nuit sous un ciel clair. En effet, sous ce type de ciel, c'est en majorité du rayonnement direct (rayonnement solaire principalement) qui « frappe » les surfaces. Ce type de rayonnement selon Parmentier se caractérise par une plus grande intensité que le rayonnement diffus (BESSEMOULIN et OLIVIERI, 2000).

Les mécanismes à l'origine des îlots de chaleur urbains sont relativement bien connus<sup>4</sup> et il est possible d'en estimer l'amplitude en fonction de la morphologie urbaine et des caractéristiques thermo-hydriques des surfaces, à l'aide de modèles de bilan énergétique des surfaces à l'échelle d'un quartier. L'atteinte verticale de l'îlot de chaleur est de trois à cinq fois la hauteur moyenne des bâtiments, de hauteur proche de la voûte urbaine (GIVONI ;1998). Selon Oke (1973), l'intensité d'un îlot de chaleur est influencée par la densité de la population de la zone d'étude.

En effet, en général, plus un quartier est dense, plus les bâtiments sont proches les uns des autres, plus les surfaces sont imperméabilisées (asphaltées), et plus la morphologie du milieu est modifiée. Il est observé que les villes denses sont plus vulnérables aux fortes chaleurs que les villes vertes. Ceci ne serait pas dû majoritairement à l'activité industrielle ou à la circulation automobile, mais à la faible place que nos cités accordent aux zones humides et aux végétaux, lesquels ont la propriété d'évacuer par « évapotranspiration » la chaleur du soleil emmagasinée dans les sols. Les îlots de chaleur ont des conséquences sur la qualité de l'air, ainsi que sur la santé et le bien-être des populations.

Selon Assis (2007), dû à la quantité d'énergie consommée, les villes constituent les principales sources indirectes de gaz à effet de serre. En échelle réduite, les altérations climatiques se traduisent soit par des îlots de chaleur, soit par des différences de température

---

<sup>3</sup> Les **îlots de chaleur urbain** désignent le fait que la modification des sols et les activités humaines réchauffent artificiellement la température d'une ville et de ses alentours. (<http://climat-sceptique.com>, consulté le 29/11/2009)

<sup>4</sup> Des activités humaines intenses dans la ville : usines,transport, climatisation, eaux chaudes circulant dans les égouts, etc. et l'urbanisation (matériaux utilisés :brique, pierre, ciment) qui fait de la ville un milieu qui absorbe plus de calories solaires. ([www.wikipedia.fr](http://www.wikipedia.fr), consulté le 29/11/2009)

entre les centres plus concentrés et leurs alentours. De manière générale, la configuration de l'espace des régions plus concentrées est marquée par des bâtiments implantés le long de l'axe des rues, nommée canyon urbain, terme défini par Oke (1978). Les canyons urbains sont représentés par la relation entre la hauteur des bâtiments (H) et la largeur de la rue (W). Dans ce cas, les changements micro-climatiques dus aux altérations dans le bilan énergétique, hydrique et thermique et dans les flux aérodynamiques de l'environnement urbain sont beaucoup plus perceptibles.

Les altérations dans le bilan de radiation sont dues à la décroissance de radiation reçue en zones d'ombres, à l'augmentation de radiation solaire reçue et au reflet interne dans les canyons urbains, à la captation et au stockage de chaleur par les matériaux de construction et à la réduction de l'onde longue émise par les régions urbaines dans l'atmosphère due à l'obstruction locale (OKE,1978, SOUZA ;RODRIGUES,MENDES,2003). En relation à ces obstructions, la quantité de ciel visible d'un point déterminé, soit le ciel disponible pour la dispersion d'énergie thermique, peut être déterminé par le facteur de vue du ciel (FVC). Par conséquent, la forme des canyons affecte aussi bien le confort interne que le confort externe aux bâtiments.

Johanson (2006) affirme que, en climat chaud et sec, les canyons assurent le confort thermique des piétons, en apportant de l'ombre. Sous l'aspect climatologique, Ali-Toudert (2005) affirme que la principale difficulté pour établir le dessin des rues est le conflit des besoins à différentes époques de l'année, comme fournir la protection adéquate pendant l'été et garantir l'accès solaire en hiver. Souza et al. (2008) mentionne qu'il est nécessaire d'établir une limite maximum à la diminution du facteur de vue du ciel, sans qu'il y ait une intensification des îlots de chaleur, en profitant de la propre masse bâtie des édifices pour pourvoir de l'ombre dans les zones piétonnes.

Plusieurs études ont été réalisées afin de relier l'intensité de l'îlot de chaleur nocturne avec les éléments météorologiques suivants : la nébulosité, la vitesse du vent, la température et l'humidité spécifique. Oke (1981) a établi une corrélation entre l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain et la géométrie du canyon urbain, exprimée en fonction de la hauteur des bâtiments et de la distance entre les bâtiments. Il a également utilisé le facteur de vue du ciel (sky view factor) pour caractériser cette géométrie. Ainsi, l'auteur suppose en quelque sorte que l'îlot de chaleur urbain est principalement lié à une perte de chaleur moindre dans les rues étroites et encaissées par rapport à des milieux plus ouverts. Selon Givoni (1998), Taha (1988) a également essayé de corréler l'îlot de chaleur urbain avec le facteur de vue du ciel.

Park (1987, cité par Nakagawa,1996) a analysé les données de 20 villes japonaises, prenant en compte la relation entre l'intensité maximum observée des îlots de chaleur urbains locaux et la population, ainsi que le facteur de vue du ciel dans le centre de chaque ville et l'indice d'imperméabilisation de la superficie urbaine. On observe que l'augmentation de la population, la réduction du facteur de vue du ciel et l'augmentation de l'imperméabilisation urbaine ont provoqué une croissance soudaine de l'intensité de l'îlot de chaleur, mais à des niveaux plus bas que ceux enregistrés dans les villes américaines et européennes (OKE,1982). Park (1987, cité par Nakagawa,1996) a aussi découvert des développements différents des îlots de chaleur, en fonction des diverses conditions topographiques et climatiques.

Les premières recherches sur les îlots de chaleur urbains au Brésil ont été développées par Danni (1987). Il a étudié les variations de température de l'air dans la ville de Porto Alegre et leur relation avec l'îlot de chaleur. Il a analysé 15 jours de mesures dans l'été entre 9h, 15h et 21h. Les résultats ont indiqué des îlots de chaleur avec une intensité moyenne de 5°C, liée aux zones les plus urbanisées. Lombard (1985), dans son travail sur la ville de São Paulo, a constaté des différences de température de l'air moyennes de 10°C entre la zone urbaine et la zone rurale. Son travail englobe l'analyse des images des satellites NOAA-6 et 7 pour le traitement du champ thermique et des images Landsat pour l'identification de l'usage du sol, ainsi que des mesures fixes et mobiles. On a sélectionné 18 points de monitoring, les résultats indiquent que la formation des îlots de chaleur était liée à la superficie la plus polluée et la plus bâtie.

Oliveira (1988) a étudié, dans une approche conceptuelle liée au projet urbain, les caractéristiques de morphologie urbaine qui conditionnent le climat. Ce travail est la première recherche au Brésil qui a pris en compte les caractéristiques morphologiques de la ville et ses variables climatiques comme base pour l'aménagement urbain.

Sakamoto (1995) a analysé la relation entre la température de l'air et la configuration du ciel dans la ville de São Paulo (Brésil). Il a utilisé des photos « fisheye » pour le calcul du pourcentage de ciel obstrué. Les points de mesure ont été choisis en prenant en compte la structure urbaine, la géomorphologie et le plan directeur de la ville. Les résultats ont démontré que la relation entre la configuration du ciel et la température de l'air varie selon l'horaire, et est influencée par d'autres variables comme le vent, l'orientation du système routier, le degré d'urbanisation, la situation topographique et la nébulosité.

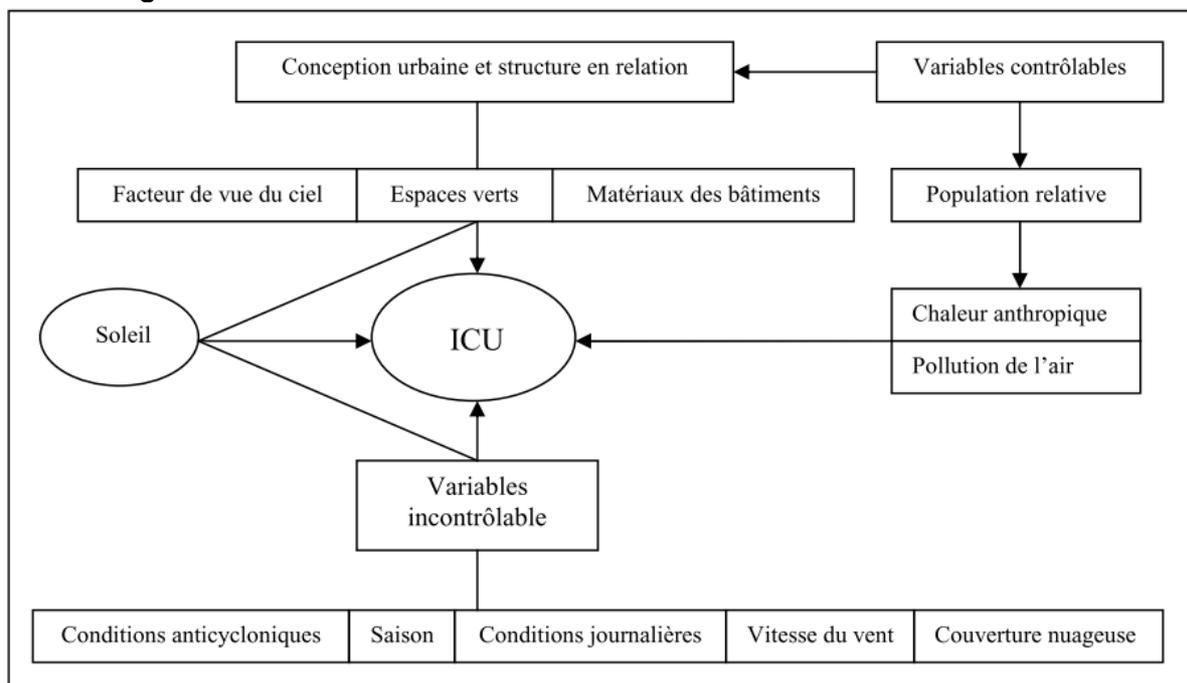
La recherche de Dines (1991) dans la ville de São Paulo (Brésil) englobe une approche selon les unités géoclimatiques, c'est-à-dire les superficies urbaines homogènes par rapport à la densité d'occupation et l'affectation du sol, et les caractéristiques du relief et des espaces verts liées aux valeurs de température de l'air et aux conditions de circulation du vent. Selon l'auteur, cette approche permettrait une analyse plus détaillée des conditions environnementales locales et l'identification des interventions prioritaires, ayant un impact dans l'équilibre de la relation entre les espaces verts et la superficie bâtie densément occupée.

Les recherches sur les îlots de chaleur urbains montrent l'influence de la morphologie urbaine sur le confort thermique. Les études indiquent qu'il est fondamental de prendre en compte les facteurs qui modifient le climat urbain comme outils de l'aménagement du territoire.

#### 1.4. Variables du phénomène de l'îlot de chaleur

Différentes variables sont à la source du phénomène d'îlot de chaleur au sein d'un milieu urbain. Rizwan *et al.* (2007) signale qu'un îlot de chaleur urbain est le résultat combiné de plusieurs facteurs qui peuvent être répartis entre ceux qui sont contrôlables et ceux qui ne le sont pas (figure 2). « Les facteurs contrôlables et incontrôlables peuvent également être classés comme des variables à effet temporaire, comme la vitesse du vent et la couverture nuageuse, des variables à effet permanent comme les espaces végétalisés, les matériaux des bâtiments et le facteur de vue du ciel, et des variables à effet cyclique comme le rayonnement solaire et les sources de chaleur anthropique » (RIZWAN *et al.*, 2007).

Figure 2 : Génération de l'îlot de chaleur urbain



Source : Adaptée de Rizwan, 2007.

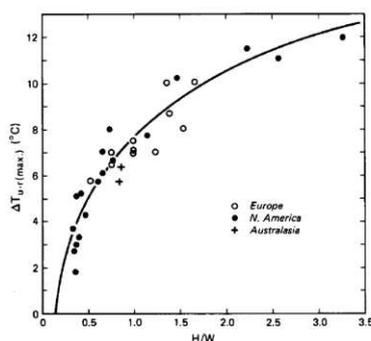
Givoni (1998) a également effectué cette distinction soulignant ainsi que certains des facteurs qui influencent l'îlot de chaleur urbain sont météorologiques et ne peuvent donc a priori pas être modifiés par des interventions humaines. Parmi les variables incontrôlables se trouvent :

- les conditions atmosphériques ;
- la saison
- les conditions nocturnes ;
- la vitesse du vent ;
- le couvert nuageux.

Les paramètres les plus significatifs sont le vent et la nébulosité. Tout d'abord, l'intensité d'un îlot de chaleur urbain diminue avec la vitesse du vent (ELIASSON et SVENSSON,2003). Ce phénomène est dû au fait que l'augmentation de l'intensité du vent induit une augmentation du mélange horizontal. Selon les auteurs, en ce qui concerne la nébulosité, l'intensité de l'îlot de chaleur diminue lorsqu'elle augmente. En effet, les nuages interviennent en modifiant le rayonnement infrarouge incident et, par conséquent, influencent le bilan net de la surface et le refroidissement radiatif nocturne pendant lequel se forme l'îlot de chaleur urbain.

En revanche, selon Colombert (2008), d'autres facteurs liés à certaines pratiques dans l'aménagement urbain et l'architecture peuvent être améliorés. Il s'agit de facteurs urbains dits variables contrôlables. Ces facteurs incluent les couleurs des bâtiments (qui déterminent en partie la fraction de rayonnement solaire réfléchi), la quantité et la distribution de la végétation urbaine, l'utilisation d'énergie pour le chauffage et l'air conditionné (influencés par l'architecture des bâtiments et le comportement des occupants), la densité construite et les forme, type et nature des bâtiments (qui influencent la quantité de rayonnement solaire atteignant le sol et la perte radiative nocturne), ainsi que l'orientation des rues (qui influence, avec la direction prédominante du vent, la vitesse du vent près du sol). Le rôle relatif de ces facteurs dans la formation de l'îlot de chaleur dépend par ailleurs du climat (sec ou humide), de la saison, et de la nature des activités de la ville. Ainsi, les facteurs urbains contrôlables dans la formation du climat urbain comprennent à la fois :

- La nature de la surface urbaine : bâtiments, pavage, taux de végétation, sol naturel ou surface d'eau.
- Les activités humaines, sources de pollution atmosphérique et de rejets de chaleur ;
- La structure urbaine ou encore le tissu constructif dans lesquels sont inclus la morphologie du cadre bâti, la géométrie urbaine (facteur de vue du ciel, hauteur et largeur des bâtiments, espacement entre ces derniers, largeur des rues, etc) et les matériaux de construction.



**Figure 3** :Relation empirique entre la géométrie du canyon urbain (H /W dans le centre urbain) et l'intensité maximale de l'îlot de chaleur (Source : OKE,1988)

Parmi ces variables contrôlables, dans ce travail, nous aborderons le facteur de vue du ciel comme outil d'analyse de la géométrie urbaine. La morphologie ou géométrie urbaine accroît l'absorption du rayonnement solaire du fait des multiples réflexions, réduit les transferts hors du canyon des flux de chaleur sensible et diminue les pertes de rayonnements infrarouges du fait de l'effet écran des murs des bâtiments (COLOMBERT, 2008). Elle influence ainsi le climat urbain et modifie l'albédo global de la ville en piégeant le rayonnement.

### 1.4.1. Facteur de vue du ciel ( $\psi$ )

Une cause de variation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain est la structure géométrique tridimensionnelle de la surface urbaine. Selon Parmentier (2010), les rues en milieu urbain peuvent être caractérisées de manière quantitative par le rapport d'aspect (rapport entre la hauteur des bâtiments  $H$  et la largeur des rues  $W$ ) qui est inversement proportionnel au facteur de vue du ciel des éléments de la rue.

Le facteur de vue du ciel varie entre 0 (zéro) et 1, où 1 correspond à une surface sans aucun obstacle qui s'interpose entre le point choisi et le ciel. Pour Souza, Rodrigues et Mendes (2003, p.671), une obstruction du ciel correspond à « quelque bâtiment, élément ou équipement urbain, qui appartient au plan de l'observateur positionné dans la couche intra-urbaine ».

Le bilan d'irradiation dans un canyon urbain dépend du facteur de vue du ciel. Bien que les paramètres comme la chaleur libérée par les activités humaines et les propriétés thermiques des matériaux aient une relation avec l'intensité de l'îlot de chaleur nocturne, des simulations réalisées par Oke (1991) indiquent que le facteur de vue du ciel peut, isolément, produire une ( $\Delta T_{u-r}$ ) intensité d'îlot de chaleur de 5 à 7°C.

Yamashita *et al.* (1986) ont mis en avant pour plusieurs villes de la banlieue ouest de Tokyo le fait que le facteur de vue du ciel est un indicateur pertinent pour mesurer l'effet de l'urbanisation sur l'intensité de l'îlot de chaleur. Colombert (2008) souligne que l'intensité de l'îlot de chaleur a ainsi tendance à croître, plus ou moins fortement selon la ville, avec la diminution du facteur de vue du ciel (FVC).

Au Brésil, Souza (2007) a déterminé le FVC de 40 points de mesurage en utilisant une simulation numérique. On a collecté les données de température de l'air, et ensuite ces données ont été comparées avec les valeurs du FVC. Selon l'auteur, les valeurs maximums de température de l'air, en été comme en hiver, correspondent aux surfaces avec le FVC le plus bas et thermiquement inconfortable.

Pour conclure, plusieurs études ont été faites sur la relation entre la température de l'air et le facteur de vue du ciel. Selon ces recherches, la géométrie urbaine, définie par le facteur de vue du ciel, est un facteur déterminant pour la distribution de température de l'air dans la ville, même dans les conditions du temps les moins favorables.

### 1.4.2. Méthodes d'obtention du facteur de vue du ciel

Le calcul du FVC est un défi pour les climatologues (CHAPMAN ; THORNES ,2004). Différentes méthodes ont été présentées pour le calcul du FVC. Il pourrait être obtenu par des méthodes analytiques (OKE,1981), des méthodes photographiques (CHAPMAN ; THORNES ;BRADLEY,2001), les systèmes d'information géographique (SIG) avec une base 3D (SOUZA ;RODRIGUES ;MENDES ;2003), par utilisation d'un GPS (CHAPMAN ; THORNES ,2004) ou par une méthode plus récente, des images avec un dispositif qui montre les différences thermiques entre l'obstruction et le ciel (CHAPMAN et al.,2007).

Minella (2009) souligne que les recherches développées par Oke (1981) et Johnson et Watson (1984) étaient basées sur des modèles géométriques de canyons urbains, prenant en compte le ratio entre la hauteur et la largeur du canyon ( $H/W$ ). D'après Chapman et Thornes (2004), les méthodes développées dans les années 80 considéraient des canyons aux dimensions « idéales » (canyon symétrique de profondeur infinie), et les résultats étaient donc estimés.

Les méthodes photographiques utilisent une lentille convexe œil de poisson (*fisheye*) afin de projeter sur la voûte céleste une image plane circulaire. Cette méthode a été présentée par Steyn et al (1986), dans les années 80. Les images imprimées étaient divisées dans un graphique de coordonnées polaires, formé par 40 *annuli* (anneaux) et le FVC était calculé pour un angle azimut de chaque *annulus* (STEYN et al.,1986). Ce travail manuel prenait beaucoup de temps pour être réalisé (MOIN,TSUTSUMI,2004).

Selon Bradley, Thornes et Chapman (2001), les méthodes d'obtention du FVC au travers de photos œil de poisson (*fisheye*) ont l'avantage d'une vision en perspective (3D) par opposition aux méthodes qui considèrent la relation H/W (2D) pour exprimer la géométrie urbaine. Minella (2009) mentionne aussi l'avantage de cette méthode de pouvoir calculer le FVC dans les canyons asymétriques, donc la représentation semblant aussi plus réaliste dans les espaces ouverts.

**Figure 4** : Facteurs de vue du ciel de différents sites à Hong Kong (Chine)

Wah Fu I SVF = 0,24	Wah Fu II SVF = 0,19	Taikoo IV SVF = 0,11	Taikoo XI SVF = 0,26	Repulse Bay 101 SVF = 0,28	Repulse Bay 109 SVF = 0,58	Ma Hang Estate SVF = 0,19	Heng On Estate SVF = 0,39	We Che Estate SVF = 0,21
Heng Fa Podium SVF = 0,39	Heng Fa Sea Front SVF = 0,32	Tsui Ning Garden SVF = 0,43	Siu Lun Court SVF = 0,22	Butterfly Estate SVF = 0,34	Wu King SVF = 0,30	Sunshine City SVF = 0,42	Newton Plaza SVF = 0,19	

source : Giridharan et al., 2007.

L'apparition de nouvelles technologies a permis d'améliorer les techniques d'obtention du FVC. Chapman, Thornes et Bradley (2001) ont présenté une technique d'obtention du FVC complètement automatisée en utilisant des images numériques, ainsi qu'une méthode pour déterminer l'impact des surfaces géométriques dans les radiations des ondes courtes. Le programme développé par l'auteur s'appelle SKYVIEW, et à partir d'un point de départ (DN) il compte les « sky pixels » et « non-sky pixels ».

Assis, Lima, Santos (2003) ont obtenu le FVC d'une surface urbaine de la ville de Belo Horizonte (Brésil) grâce à la combinaison de deux programmes de production graphique, Autocad et MapInfo. Selon Minella (2009), cette méthode utilise un grille polaire pour réaliser des projections équidistantes, élimine les calculs mathématiques, et répand l'utilisation de programmes développés spécialement pour le calcul du facteur de vue du ciel. (ASSIS ;LIMA ;SANTOS,2003).

Plusieurs recherches ont été menées sur le calcul du FVC, mais avec le développement des systèmes d'information géographique (SIG), « une technologie qui permet le stockage, l'analyse et le traitement des données spatiales et non spatiales », il est possible de faire « une corrélation entre les informations en analysant les données d'une manière rapide et précise ». (SOUZA ;RODRIGUES ;MENDES ;2003, p.670).

Selon Brown, Grimmond et Ratti (2001), les bases de données en 3D de haute résolution sont devenues de plus en plus accessibles. Le grand avantage des SIG est d'avoir la possibilité de faire une prédiction des scénarios futurs pour une prise de décisions.

Souza, Rodrigues et Mendes (2003) ont développé une extension 3DskyView, qui a été incorporée dans le SIG à travers le programme ArcView GIS et son extension 3D Analyst ; les deux sont du *Environmental Systems Research Institute* (ESRI). Le problème de la « détermination angulaire des points d'obstruction en relation à la position de l'observateur » dans la projection stéréographique ou « dans la projection orthographique de la voûte céleste » est éliminé car il n'est pas nécessaire d'utiliser des

appareils photographiques ni des équipements topographiques, une fois que les bases de données contiennent les dimensions x,y,z (SOUZA ;RODRIGUES ;MENDES,2003).

**Figure 5 :** Comparaison entre les valeurs du facteur de vue du ciel fait sur terrain et simulé par le programme 3D Skyview

Case Nr.	SVF Field Data	3DSky View SVF	Actual urban geometry	3DSkyView 2D Stereographic Scene
1	0.59	0.62		
2	0.24	0.28		
3	0.67	0.70		
4	0.19	0.25		

On a comparé la simulation faite par l'extension 3DSkyView et les photos *fisheye* prises sur place de deux points d'étude. L'estimation de la valeur du FVC a été faite en utilisant la méthode graphique élaborée par Johnson et Watson (1984). De cette manière, il est possible d'évaluer la forme du canyon urbain dans une représentation 2D, ainsi que la valeur du FVC. La figure 5 compare la valeur prise sur le site d'étude à la valeur simulée par le logiciel. Il est important de souligner que les valeurs du FVC prises sur le site d'étude sont toujours estimées. Les méthodes disponibles sont basées sur quelques simplifications et approximations de la géométrie du canyon urbain détaillé par Johnson et Watson (1984). Cependant, cette étude valide l'utilisation du programme.

source : Souza, Rodrigues et Mendes (2003)

Selon la figure 5, il est possible d'affirmer que le 3DSkyView a une bonne performance dans le calcul de la valeur du FVC tout comme dans la représentation 2D. On remarque cependant un manque de représentation de la végétation dans le programme ; ceci altérant de manière non négligeable la valeur du FVC. Malgré la bonne performance de 3DSkyview, il serait plus adapté aux éléments urbains avec une section horizontale constante ou des sections plus étroites dans la partie supérieure. Selon Souza ;Rodrigues et Mendes (2003), le programme prend en charge une simplification des polygones dans l'ébauche automatique du ciel et considère la partie supérieure et large du polygone comme référence. Cependant, si la forme est large dans le sommet, il pourrait produire un faux calcul du FVC et une représentation constante de la section de l'élément. Ceci pourrait arriver, par exemple, avec des éléments urbains comme des arbres.

Dans l'étude de Gál et al. (2007), l'obtention du FVC à travers un système de base de données 3D a été comparée à une méthode par photographie en utilisant le programme BMSky-view. Il a été observé qu'il y a des différences dans les résultats, probablement en fonction de la présence de végétation dans les lieux de mesures.

Cependant, Chapman et al. (2007) ont étudié le potentiel d'un prototype thermique d'appareil photographique avec une lentille œil de poisson (*fisheye*) qui permet d'enregistrer les différences de température entre les obstructions et le ciel, et pourrait ainsi calculer le FVC. Une des limitations de ce prototype pour la mesure du FVC est qu'il demande un ciel clair pendant la recherche.

Les différentes méthodes d'obtention du facteur de vision du ciel ici présentées démontrent que la technologie a été un allié des chercheurs pour améliorer les techniques de calcul du FVC. Dans cette recherche, nous utiliserons les programmes Arcview GIS (version 3.3) et ArcGIS (version 9) et leur extension 3D Analyst ainsi que l'extension 3DSkyview

développée par Souza, Rodrigues et Mendes (2003) pour l'obtention du facteur de vision du ciel dans une zone d'étude.

Comme mentionné auparavant, l'analyse de la géométrie urbaine est un facteur déterminant dans la distribution de la température. C'est donc un indicateur de confort thermique et de la formation des îlots de chaleur urbains.



## CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE

Plusieurs méthodes peuvent être mises en œuvre afin d'analyser les îlots de chaleur urbains et les différentes manières de lutter contre ce phénomène. Le but de ce travail est d'utiliser un outil 3D des systèmes d'information géographique (SIG) qui permet de simuler la géométrie urbaine par la représentation du facteur de vue du ciel (*sky view factor - SVF*) et de calculer sa valeur.

La recherche englobe aussi la récolte de données micro-climatiques dans deux régions d'étude afin de comparer les résultats avec la valeur du facteur de vue du ciel obtenue à partir du modèle 3D. Les données obtenues *in loco* seront aussi comparées avec la carte des températures de surface de la ville de São Paulo élaborée à partir du satellite Landsat 5TM en 1999.

La méthodologie est divisée en 3 étapes : tout d'abord la présentation de la région d'étude, ensuite la description du monitoring *in loco* et finalement, un descriptif des programmes de simulation utilisés pour la représentation 3D et le calcul du facteur de vue du ciel (FVC).

### 2.1. Etude de cas : la ville de São Paulo, Brésil

#### 2.1.1. Planification de la ville de São Paulo

**Figure 6** : Vue du centre ville de São Paulo



source : Jonathan Olsson, décembre, 2006.

São Paulo est considéré comme la quatrième plus grande agglomération urbaine du monde, avec approximativement 20 millions d'habitants, admettant que 11 millions habitent dans la capitale. Par sa complexité territoriale, la ville possède un excellent champ de recherche pour plusieurs phénomènes urbains, en considérant des impacts socio-économiques et environnementaux.

La ville de São Paulo est traversée par le tropique du Capricorne, et est localisée à 23°37' latitude sud et 46°39' longitude ouest (FROTA et SCHIFFER, 1995). Bien qu'elle se trouve à 802 mètre d'altitude, elle est à environ à 45km de la côte, dans une région nommée plateau Atlantique, influencée par les conditions océaniques (TARIFA et AZEVEDO, 2001). São Paulo est localisée dans le bassin du fleuve Tietê, et sa morphologie est structurée par le fleuve et ses affluents, tels que le fleuve Pinheiros et le fleuve Tamanduateí, et par la configuration topographique résultante (São Paulo, 2002). Selon le SVMA (2002), ce cadre physique définit un ensemble de contrôles climatiques qui, dans l'interaction avec la succession habituelle des systèmes atmosphériques, permettent de différencier les climats locaux entre le climat tropical humide d'altitude du plateau Atlantique, le climat tropical humide montagnard et le climat tropical sub-océanique. Antonucci (2005) affirme que l'occupation des terres hautes et des flancs des collines du diviseur d'eaux a été un important facteur dans la détermination de la structure radiale de la ville et que l'histoire de l'occupation urbaine de la ville, outre les déterminants socioéconomiques, se trouve donc étroitement rapportée aux conditions naturelles de son territoire.

La ville a été établie par les missions jésuites du XVIème siècle, et par d'importants passages de "bandeirantes" dans son exploration à l'intérieur du pays. Jusqu'au début du XXème siècle, l'urbanisation s'est concentrée dans les terrains sédimentaires du bassin de São Paulo, de relief en collines et plaines avec des caractéristiques favorables à l'occupation, localisée entre les plaines cultivées des fleuves Pinheiros et Tietê. Selon le SVMA (2002), cette situation a duré jusqu'au début des années 50, quand la ville comptait environ 2 millions d'habitants. Somekh (2002) souligne que l'histoire de la ville de São Paulo peut être

vue comme un équilibre continu entre les pressions de la croissance et les propositions urbaines visant à conduire, structurer ou contrôler l'expansion urbaine. Le XX<sup>ème</sup> siècle a été marqué par de grandes transformations sociales et économiques qui ont entraîné des modifications dans l'utilisation de l'espace urbain (Figure 6). On retrouve d'importantes traces de l'évolution urbaine de la ville: le plan des avenues de 1930, le rapport Moses de 1950, le Plan Urbanístico Basic (PUB) de 1968 et la proposition pour le plan directeur de 1985. La structure urbaine est devenue complexe, avec la pression de l'augmentation du flux d'automobiles dans les secteurs centraux conduisant à d'importantes interventions dans le secteur routier, et fortifiant ainsi l'industrie comme moteur économique de la ville. Le fleuve Tiête a été rectifié dans son parcours urbain et des voies rapides ont été implantées dans ses marges.

La concentration des activités dans la région centrale a fait prendre de la valeur aux terrains, en provoquant la nécessité de verticalisation (MENNEH, 1997). Les propositions du plan d'affectation urbain pour la ville cherchaient à protéger les valeurs immobilières des régions les plus riches et à consolider la ségrégation socio-territoriale construite depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle (FELDMAN, 2005). La région sud-est de la ville a commencé à développer une occupation périurbaine étalée inspirée du modèle européen de cités-jardins (ANTONUCCI, 2005). Dans les décennies suivantes, un intense processus d'occupation urbaine s'est produit dû au grand flux migrateur, en consolidant la formation d'une périphérie pauvre. Selon Brandão (2009), à partir de 1964, la verticalisation s'est développée dans les quartiers périphériques et s'est graduellement intensifiée dans d'autres quartiers de la région sud-ouest.

En 1972, il a été créé pour la première fois une loi générale de zoning affectation (7.805/72) pour la ville, en incluant toutes ses régions (FELDMAN, 2005). Selon Macedo (1988), la législation a renforcé le modèle architectural diffusé par le mouvement moderne, avec la consolidation de la tour centralisée isolée dans le terrain, avec une grande hauteur et peu de recul concernant les lots voisins. Brandão (2009) souligne que cette typologie a servi de base pour une occupation verticale dans de diverses villes brésiliennes. Selon quelques spécialistes, le développement de la maille urbaine de la ville de São Paulo est typique de quelques métropoles globales: les noyaux originaux se présentent verticalisés, avec des bâtiments commerciaux et de services et les périphéries se développent de forme générale, avec des bâtiments de deux à quatre étages. À São Paulo, les plus grands bâtiments atteignent rarement quarante étages et la moyenne des bâtiments résidentiels est de vingt étages. La croissance désordonnée et une politique environnementale ont provoqué une réduction drastique de la végétation à São Paulo. On peut observer que la surface urbaine continue à se développer dans des régions industrielles, comme les secteurs de protection de sources en eau, avec un effet négatif sur qualité environnementale. Le SVMA (2004) mentionne que, entre 1991 et 2000, la ville de São Paulo a fait disparaître 5 345 hectares d'espace vert dû à l'occupation urbaine, 56% de la ville est concentrée sur seulement 10 districts de la périphérie, où existe une haute croissance de la population.



## 2.1.2. Choix des quartiers d'étude

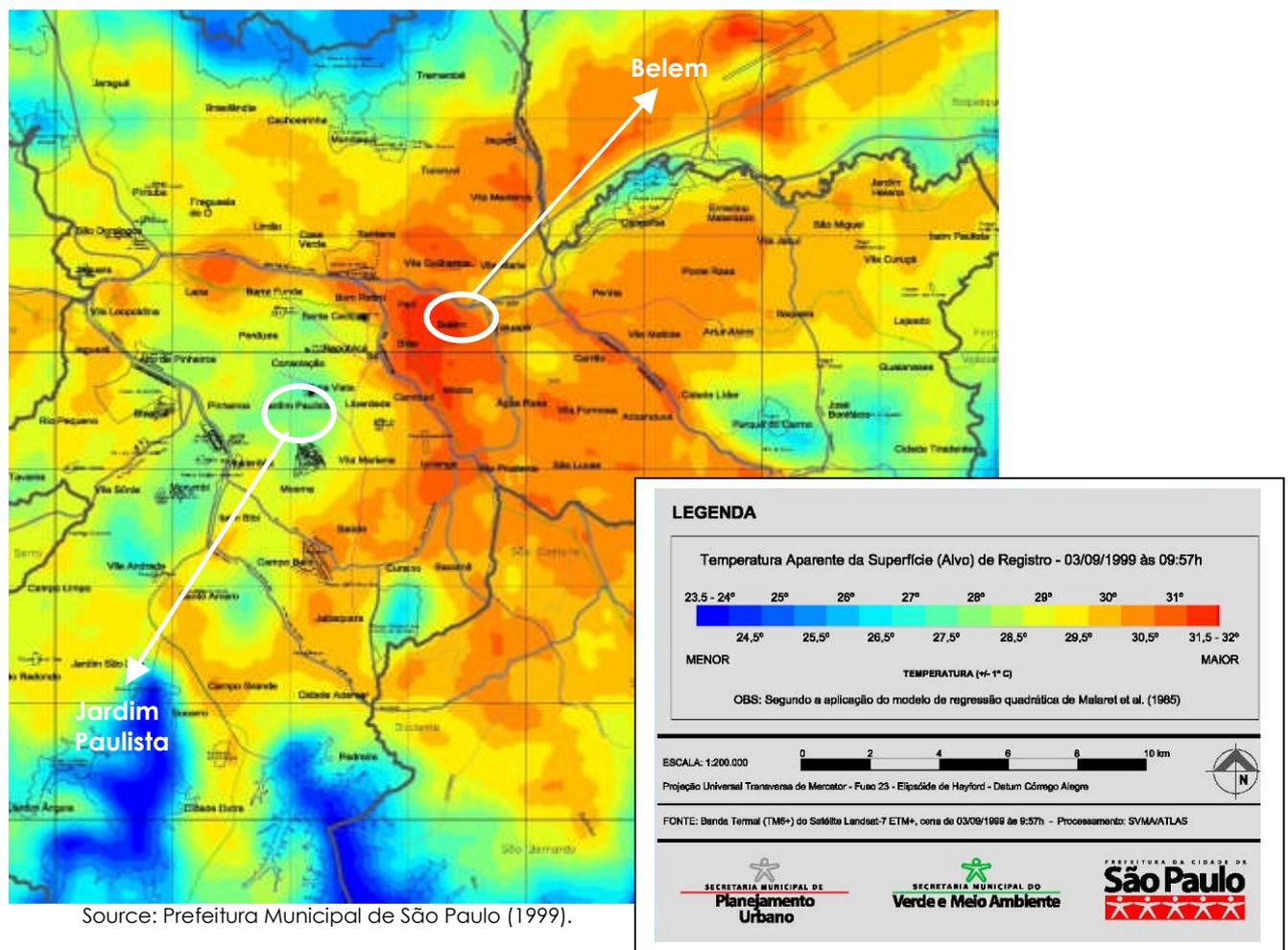
Le choix des points d'étude a été basé sur la carte des températures de surface de la ville de São Paulo (Figure 8). Cette carte, élaborée à partir d'images du satellite Landsat 5TM, indique clairement les variations de la température de surface de l'agglomération.

La zone, considérée critique du point de vue thermique se localise dans l'ancienne région industrielle de la ville, le long du chemin de fer et dans les vallées des fleuves Tietê et Tamandateí (Figure 9). Il a été observé que l'absence d'espaces verts et l'arborisation urbaine alliée à une occupation homogène dans ces régions peuvent être citées comme des causes de ce phénomène. Selon le SVMA (2002), les matériaux des couvertures des bâtiments composés de tuiles de fibrociment/ciment amiante et métallique dans les zones industrielles contribuent à l'augmentation de la température dans ces endroits.

On trouve des températures de surface plus agréables dans les zones avec une couverture végétale significative, dans les quartiers où prédomine une occupation résidentielle horizontale avec une arborisation intra-îlot et urbaine/routière, et près des corps d'eau. Selon décrit par SVMA (2002), la formation de quelques zones froides est provoquée par la projection des ombres des bâtiments dans les zones avec une occupation verticale plus importante conjointement avec d'autres variables, comme la vitesse du vent.

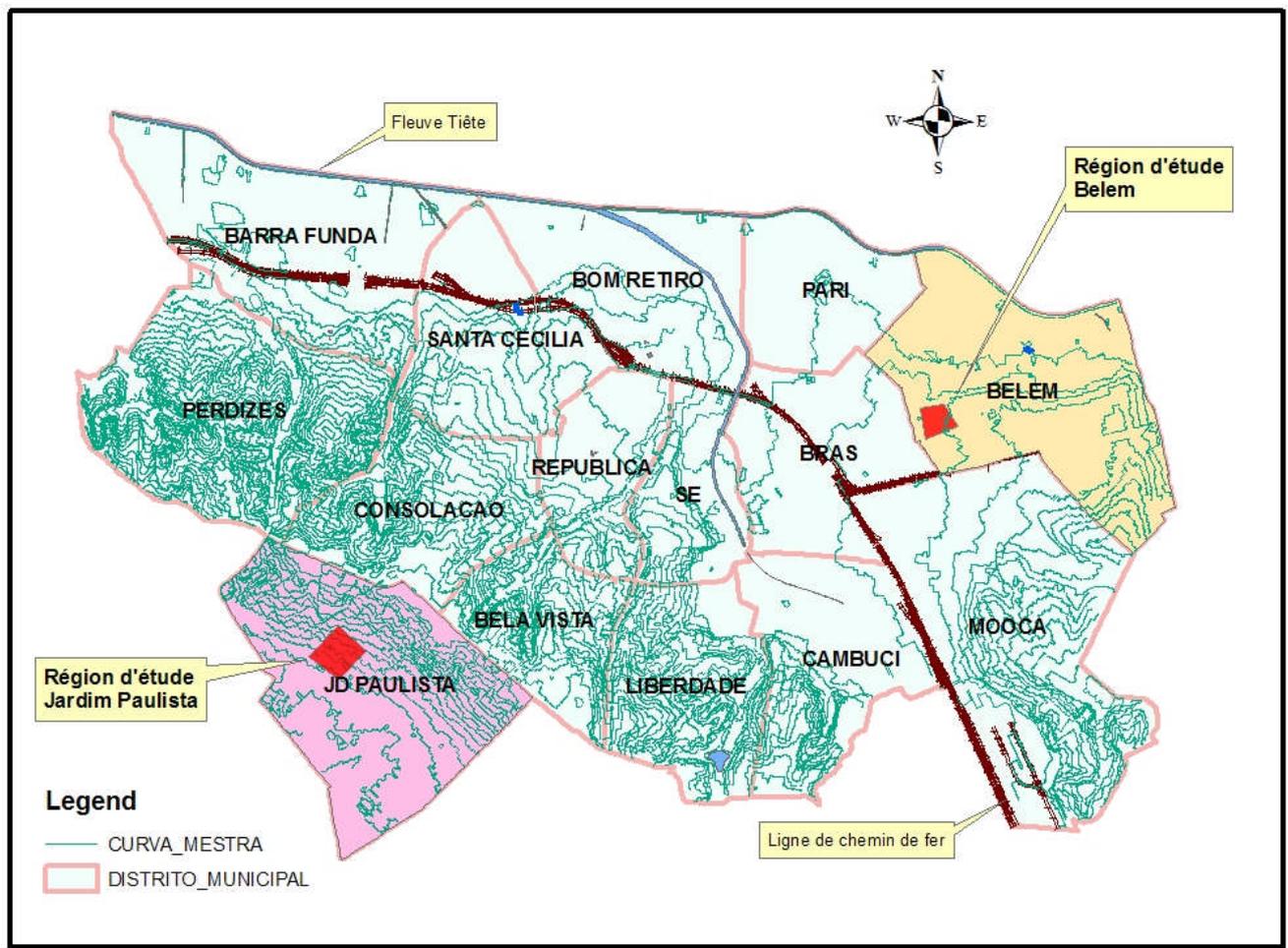
Afin d'analyser deux régions avec des températures distinctes, on a sélectionné le quartier Jardim Paulista (sous-préfecture de Pinheiros) et le quartier Belém (sous-préfecture de Mooca) (Figure 9). Dans ces régions, les points d'étude ont été disposés dans des endroits avec une typologie de bâtiments similaire, composés d'immeubles de 2 étages sans recul frontal.

Figure 8 : Carte de température de surface – Satellite Landsat 5TM)



Source: Prefeitura Municipal de São Paulo (1999).

**Figure 9** : Carte topographique et localisation des régions d'étude dans la ville de São Paulo.



Source: Réalisé avec le programme ArcGis 9 à partir des données cadastrales, 2011.

**Tableau 1** – Données des quartiers Jardim Paulista et Belém

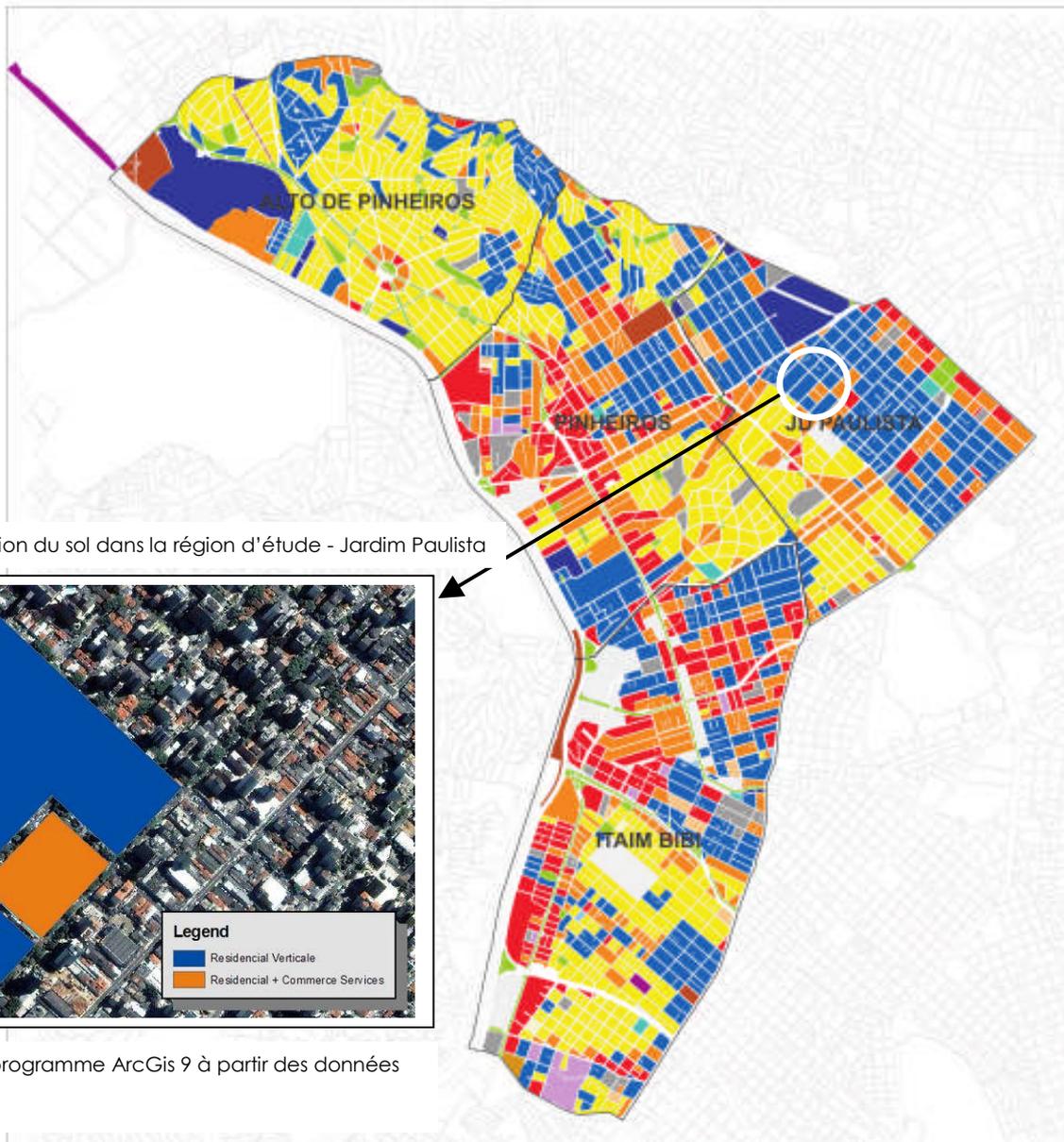
Quartier	Surface (ha)	Couverture Végétal (m <sup>2</sup> )	Population (2000)	Population (2009)	Densité Démographique (pop/ha) (2009)
Jardim Paulista	610	910.800	83.667	76.883	126,04
Belém	600	416.700	39.622	36.505	60,84

Source: DIPRO (2010)

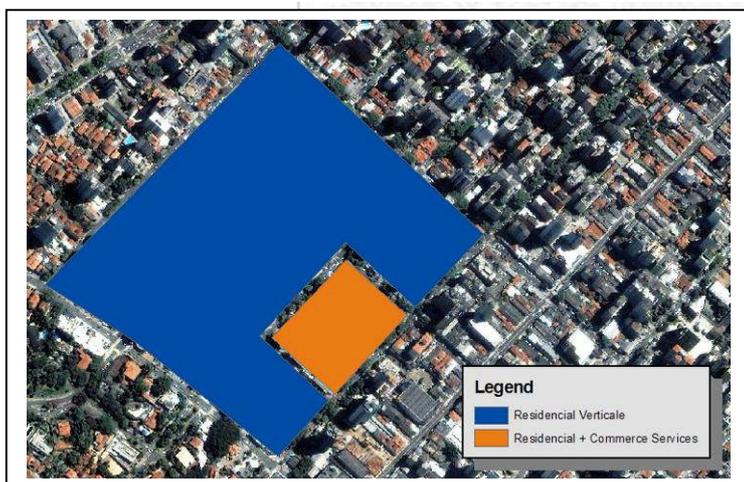
Le *Jardim Paulista* a été inspiré du modèle urbain moderne de cité-jardin. Néanmoins, au contraire des sinueuses rues arborisées des quartiers voisins (*Jardim Europe* et *Jardim Amérique*) avec des lots de 1000m<sup>2</sup>, le *Jardim Paulista* présente des rues droites et perpendiculaires. Le quartier est localisé dans une des régions les plus hautes de la ville, connue sous le nom de *Espigão Paulista*, avec des courbes de niveau variant entre 740 et 744 mètres au-dessus du niveau de la mer. Les premiers habitants étaient de classe moyenne supérieure, principalement des industriels et de grands commerçants. Après la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, le quartier a acquis des caractéristiques commerciales, se traduisant par une typologie plutôt verticalisée, avec la construction d'immeubles de bureaux et commerces, due à la proximité de l'Avenue Paulista, axe principal reliant les quartiers de la zone sud au plus grand centre financier du Brésil. Actuellement le quartier possède un profil à la fois résidentiel (standard moyen et haut) et commercial, avec une haute densité démographique (Figure 10). D'après le SVMA (2002), malgré la bonne qualité environnementale du quartier, celui-ci présente une grande verticalisation et des couloirs routiers avec un trafic intense. La température de surface selon la figure 8 se montre

favorable dans cette région, néanmoins il faut considérer, outre l'arborisation urbaine, l'influence résultant de l'ombrage et de la présence de canyons urbains dans cette région.

**Figure 10** : Carte de l'utilisation du sol – Jardim Paulista



**Figure 11** - Carte de l'utilisation du sol dans la région d'étude - Jardim Paulista



Source : Réalisé avec le programme ArcGis 9 à partir des données cadastrales, 2011.

### Predominância de Uso

- |   |  |
|---|--|
| Distritos Municipais                        | Parques Estaduais/Parques Municipais/ Áreas Públicas |
| Residencial Horizontal de Baixo Padrão      | Comércio/Serviços + Indústria/Armazéns               |
| Residencial Horizontal de Médio/Alto Padrão | Garagens   |
| Residencial Vertical de Baixo Padrão        | Equipamentos Públicos                                |
| Residencial Vertical de Médio/Alto Padrão   | Escolas  |
| Comércio e Serviços                         | Terrenos Vagos                                       |
| Indústria e Armazéns                        | Outros   |
| Residencial + Comércio/Serviços             | Sem Predominância                                    |
| Residencial + Indústria/Armazéns            | Sem Informação                                       |



Fonte: Secretaria Municipal de Finanças/  
Departamento de Rendas Imobiliárias - TPCL 2008  
Elaboração: Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano  
Departamento de Estatística e Produção de Informação - Dipro

Source: Secretaria Municipal de Finanças, Departamento de Rendas Imobiliárias, 2008.

Figure 12 : Carte de hauteur de bâtiments dans la région d'étude – Jardim Paulista

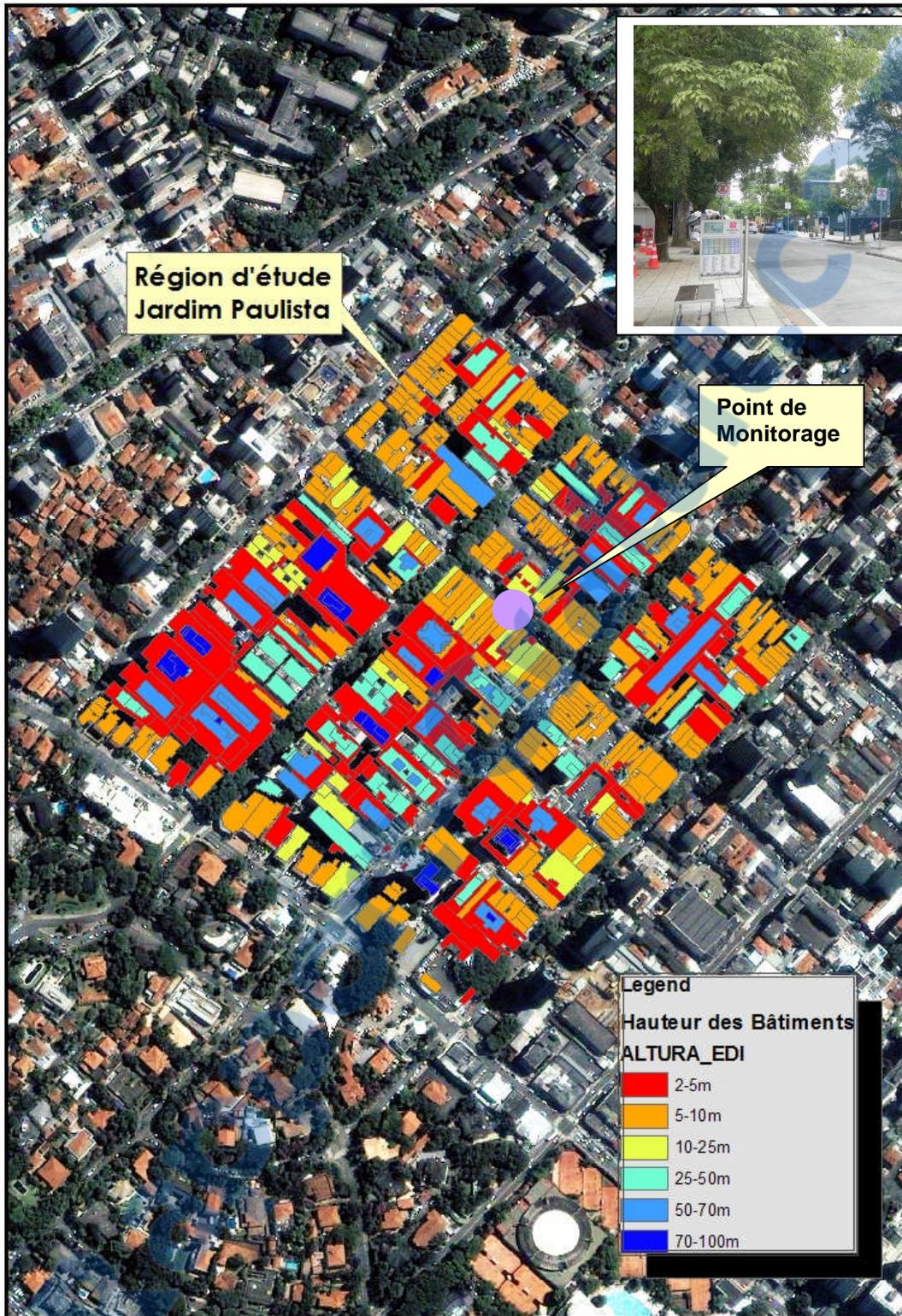


Figure 13 - Photo de la rue du Point de Monitoring – Jardim Paulista. (22 février 2011)

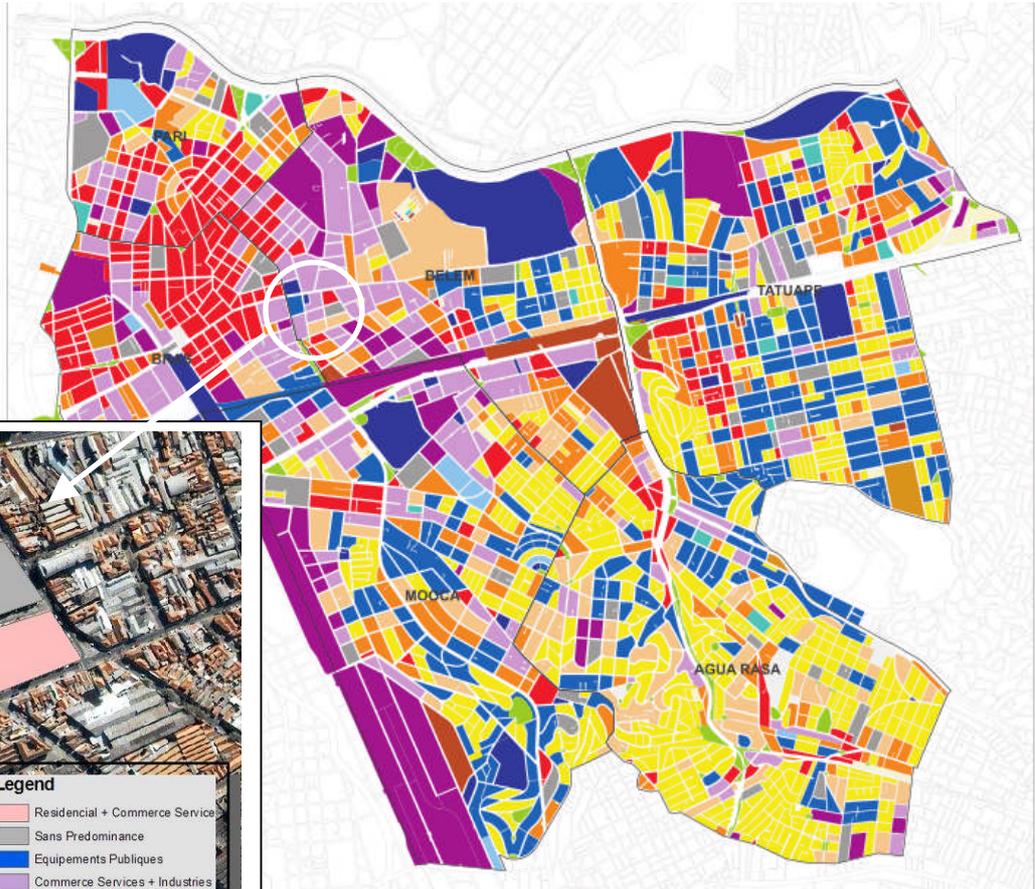
Source: Réalisé avec le programme ArcGis 9 à partir des données cadastrales, 2011.

Le Belém est un quartier localisé dans la région Centre-Est de la ville de São Paulo, traversé par le fleuve Tietê. Le développement urbain du quartier est associé à l'histoire économique de la ville, car c'est dans cette région qu'a commencé l'industrialisation de la ville, dans les dernières décennies du XIXème siècle, avec l'implantation de fabriques de tissu et du premier village ouvrier du Brésil : le Village Maria Zélia. D'après São Paulo (2002), un important facteur dans l'évolution de la Zone Est a été l'installation de deux voies ferrées : en 1868 la São Paulo Railway (chemin de fer Santos-Jundiaí) en liant São Paulo au port de Santos et en 1875, le chemin de fer du Nord en liant São Paulo à Rio de Janeiro. Les zones

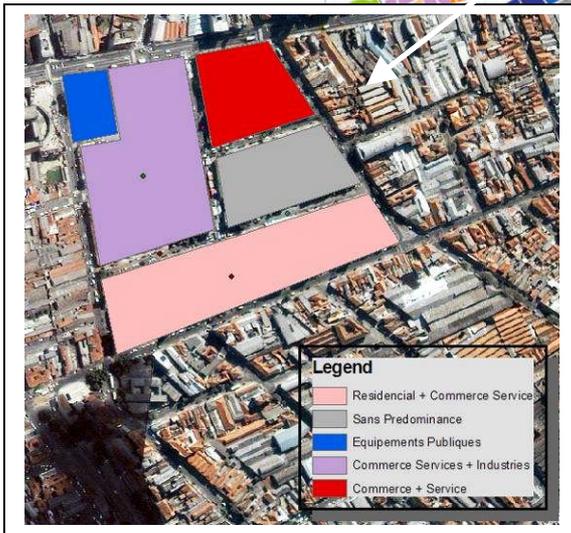
proches des voies ferrées étaient privilégiées par les industries qui bénéficiaient du transport des matières premières, de la production et des combustibles importés. Ces industries utilisaient la main d'œuvre immigrée qui arrivait au port de Santos. Les ouvriers s'installaient à proximité des industries, en favorisant le commerce local. Après la Première Guerre mondiale l'industrialisation de São Paulo a explosé, ainsi le parc industriel de cette région s'est élargi.

Actuellement le quartier possède un profil de zone commerciale / de services avec des bâtiments résidentiels (standard bas /moyen) de 2-5 étages et une basse densité démographique (Tableau 1). Il y a encore des sites industriels et de stockage dans la région. La végétation urbaine est précaire presque inexistante, et la température de surface selon la figure 8 se montre donc critique dans cette région. Néanmoins, il faut aussi considérer l'influence des matériaux des couvertures des bâtiments industriels /de service composés par des tuiles de fibrociment /ciment amiante et métalliques comme observé sur place.

**Figure 14** : Carte de l'utilisation du sol – Belém



**Figure 15** - Carte de l'utilisation du sol dans la région d'étude - Belém



Source : Réalisé avec le programme ArcGis 9 à partir des données cadastrales, 2011.

### Predominância de Uso



Fonte: Secretaria Municipal de Finanças/  
Departamento de Rendas Imobiliárias - TPCL 2008  
Elaboração: Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano  
Departamento de Estatística e Produção de Informação - Dipro

Source: Secretaria Municipal de Finanças, Departamento de Rendas Imobiliárias, 2008.

Figure 16 : Carte de hauteur de bâtiments dans la région d'étude – Belém

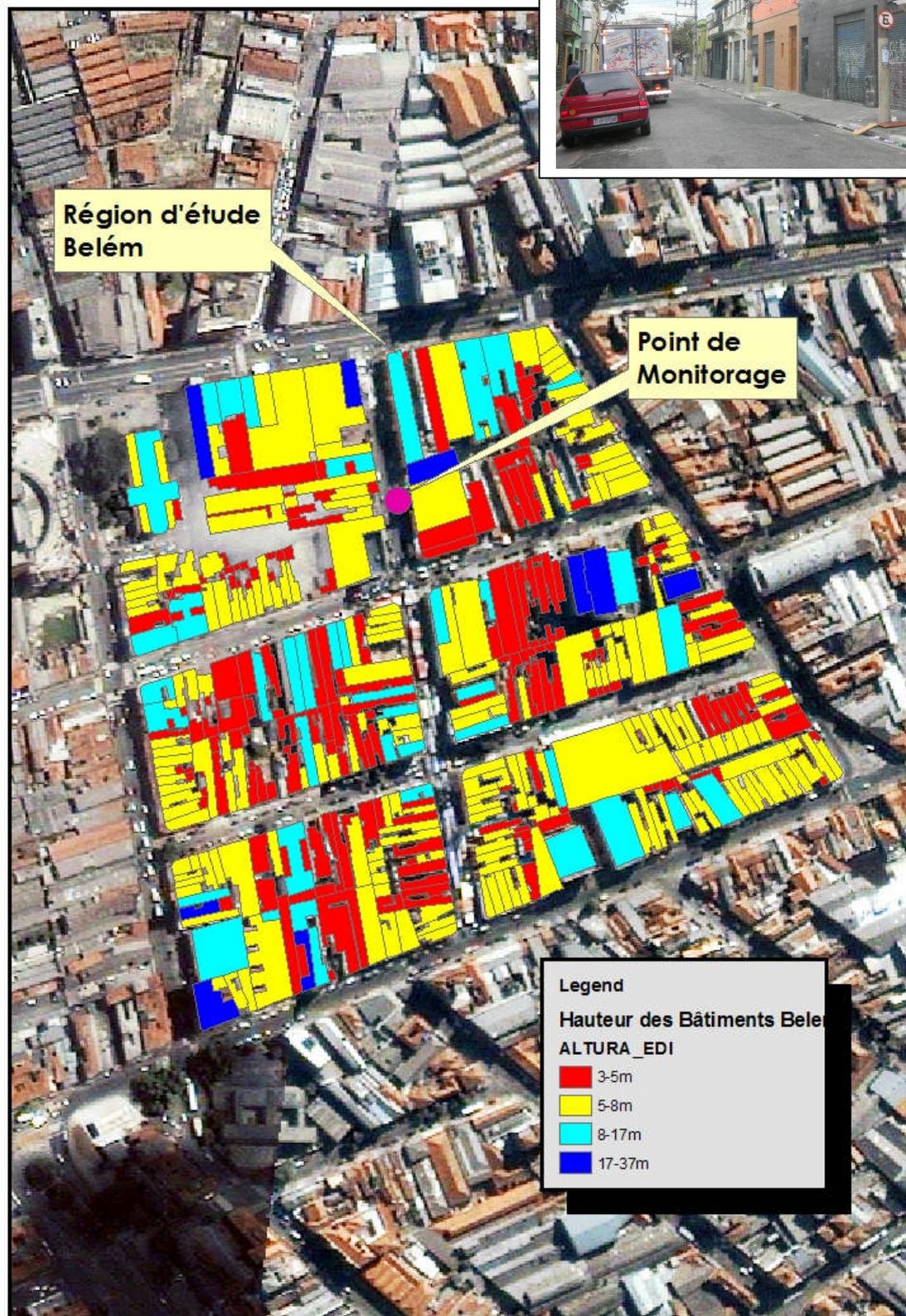


Figure 17 - Photo de la rue du Point de Monitoring (22 février 2011)

Source: Réalisé avec le programme ArcGis 9 à partir des données cadastrales, 2011.

Le quartier de Belém se trouve dans la sous-préfecture de Mooca (Figure 9) où il y a actuellement des projets de revitalisation urbaine des sites industriels en zones résidentielles

de haute densité. Il y a aussi un projet pour l'aménagement urbain des sites industriels/services localisés le long du chemin de fer qui prévoit un parc linéaire (transposition du chemin de fer), des logements sociaux ainsi que des centres culturels.

## 2.2. Monitoring *in loco*

Le monitoring *in loco* a été réalisé simultanément sur les deux sites, et les données micro-climatiques ont été rassemblées chaque minute. En relation à l'axe de la rue, la station météorologique a été placée près de la façade tournée vers l'ouest.



**Figure 18** – Station météorologique (Jardim Paulista) (22 février 2011)

La période de monitoring le 22/02/2011 était de 6 heures (de 9h01 jusqu'à 15h00). Le 23/02/2011, la période de monitoring était de 7 heures (de 7h01 jusqu'à 14h00). Pour chaque point, on a utilisé une station météorologique de la marque HOBO modèle H21-001 (Figure 18). Chaque station était équipée avec les instruments suivants: détecteur de température et d'humidité (S-THB-M002); pyranomètre de silicium (S-LIB-M003); et détecteur de direction et vitesse du vent (S-WCA-M003). Les bandes de précision de ces instruments suivent les recommandations de la norme ISO 7726 (1998), qui convient des instruments pour la mesure de variables physiques. Les détecteurs de température de l'air et d'humidité relative ont été fixés à une hauteur de 110 cm, selon ISO 7726 (1998). Le pyranomètre a été fixé à 150 cm, au-dessus des autres détecteurs et orienté vers le nord. L'anémomètre a été fixé à 210 cm, comme recommandé par Campbell (1997).

Pour obtenir la température rayonnante moyenne ( $T_{rm}$ ), on a utilisé des thermomètres de globe en cuivre, avec  $\varnothing=2$  ", peints de couleur RAL-7001 (THORSSON et al., 2007). A chaque station, on a fixé le thermomètre de globe à 110 cm du sol, selon ISO 7726 (1998). La  $T_{rm}$  a été calculée par la formule pour convection forcée, définie par l'ISO 7726 (1998).

Les stations météorologiques étaient positionnées selon le Nord géographique. La température de surface de chaque point de mesure a été obtenue avec un thermomètre infrarouge en forme de piston de la marque RayTemp 38 placé à 1m du sol. La récolte des données a été réalisée toutes les 30 minutes. Bien que les conditions idéales pour faire des mesures micro climatiques incluent un ciel clair, la difficulté liée à remplir cette condition propice au mois de février a fait que les mesure ont dû être réalisées pendant des journées avec un ciel clair jusqu'à 10 heures et un ciel partiellement nuageux dans le reste de la journée dans les deux points de monitoring.

Pour l'obtention des photos œil de poisson (*fish-eye*) nécessaires au calcul du facteur de vue du ciel, on a utilisé un appareil Nikon D-80, avec une lentille *Sigma Fisheye* 8mm F-35 monté sur un trépied. Comme cet appareil n'a pas de sensor *full-frame*, il ne permet pas un enregistrement complet de la voûte céleste; c'est pourquoi on a élaboré une composition de deux images superposées du point d'étude. La première image a été obtenue avec l'appareil en direction du Nord et la deuxième en direction de l'Est. A l'aide du programme d'édition d'image Adobe Photoshop, on a réalisé le montage de ces deux photos afin de former l'image complète de la voûte céleste. A partir de l'image complète de chaque point, le calcul de FVC a été calculé par le programme RayMan développé par Andreas Matzarakis (<http://www.mif.unifreiburg.de/RayMan>).

## 2.3. Processus d'analyse

### 2.3.1. 3D SkyView

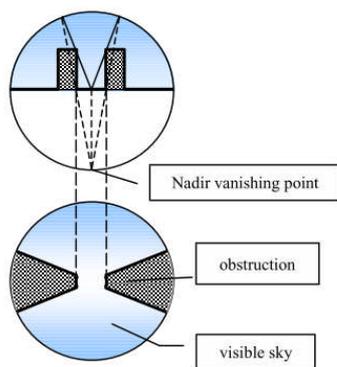
Ce travail vise à explorer l'utilisation des SIG pour des simulations spatiales qui représentent les obstructions du canyon urbain sur la voûte céleste et déterminent le facteur de vue du ciel. L'outil présenté dans ce travail sera le programme 3DSkyView qui remplace l'utilisation d'appareils photographiques coûteux avec les lentilles œil de poisson (*fisheye*).

Le 3DSkyView a été conçu dans le langage *scripting Avenue* dans l'environnement du programme ArcView 3.3. avec son extension *3D Analyst*, tous deux de ESRI (Environmental Systems Research Institute products<sup>5</sup>). Cet outil a été développé dans le cadre d'une collaboration entre l'Université de São Paulo (Brésil) et l'Université de Minho (Portugal) (SOUZA; RODRIGUES; MENDES (2003).

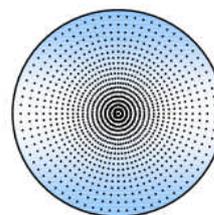
Le but de 3DSkyView est d'identifier un nouveau système de coordonnées tri-dimensionnelles des éléments urbains pour qu'ils puissent être représentés par une projection stéréographique dans un plan bi-dimensionnel. Ceci permet le calcul du facteur de vue du ciel. Il est important de souligner le fait que la projection stéréographique de cartes disponibles dans l'*ArcView GIS* ne produit pas le résultat désiré dans ce travail. Selon Souza ;Rodrigues ;Mendes (2003), cette fonction de l'*ArcView GIS* a été développée afin de permettre la réalisation des cartes en deux dimensions où l'observateur est au-dessus de la surface de la terre, l'encadrement étant donc centré sur la surface de la terre. Dans l'extension de 3DSkyview, la position du point de vue est mobile pour chacune des trois dimensions et peut être fixée au niveau du canyon urbain, l'encadrement étant donc centré au niveau du canyon urbain (SOUZA;RODRIGUES;MENDES, 2003). La représentation bi-dimensionnelle de cette vision dépend de la configuration tri-dimensionnelle du canyon. La projection stéréographique est plus appropriée pour la représentation de la relation spatiale entre les bâtiments et la surface de ciel visible. (SOUZA;RODRIGUES;MENDES, 2003)

La projection stéréographique d'un canyon urbain étant une projection azimutale, les points des éléments urbains sont projetés sur la surface de la voûte céleste (qui est une surface hémisphérique) et ensuite transférés sur le plan équatorial de la même sphère. Selon Souza ;Rodrigues ;Mendes(2003), ce transfert est possible par l'union de chaque point dans la partie haute de la surface de la sphère au « *Nadir vanishing point* » (Figure 19) . Ainsi, chaque point de la sphère est projeté sur le cercle qui représente la voûte céleste dans la projection plane.

**Figure 19** – Projection stéréographique d'un canyon urbain



**Figure 20** – Stereonet (Maille stéréographique) d'un plan équatorial



Source : SOUZA;RODRIGUES;MENDES, 2003

Pour estimer le facteur de vue du ciel, la sphère peut être divisée de façon homogène et ses parties projetées stéréographiquement sur le plan équatorial, résultant à un « *stereonet* » ou maille stéréographique (Figure 20). Par superposition de la maille stéréographique à la projection du plan équatorial des obstructions, leurs parties (i.e. ciel et

<sup>5</sup> <http://www.esri.com>

surfaces d'obstructions) peuvent être comparées à la surface totale de ciel, permettant ainsi de déterminer leur *ratio* (i.e. le facteur de vue du ciel).

### 2.3.2. Simulation avec 3DSkyView

Afin de projeter le canyon urbain d'un point d'étude, il est nécessaire que les éléments urbains soient représentés par des polygones et que leurs attribut d'élévation (niveau du polygone) et hauteur (coordonnées Z du polygone) soient pré-définis. Les points d'observation doivent également avoir une table d'attribut avec les données (hauteur et élévation). Comme mentionné auparavant, le 3D SkyView calcule le facteur de vue du ciel et permet aussi la visualisation de la projection stéréographique 2D (Figure 30), la projection orthographique 2D et la scène en 3D (Figure 23) de la vision du canyon urbain sélectionné par l'utilisateur.

Le processus de simulation de 3D SkyView est décrit ci-dessous, d'après Souza; Rodrigues; Mendes (2003):

- a) Les données d'entrée pour la simulation sont basées sur un thème de polygones qui représentent les bâtiments et un thème de points qui représentent l'observateur. A travers ces thèmes, l'extension 3Dskyview identifie les coordonnées X,Y de l'observateur et des sommets des polygones;
- b) Selon les coordonnées de l'observateur, les coordonnées xy des polygones sont transformées en projections stéréographique et orthographique;
- c) Les nouvelles coordonnées des polygones sont graphiquement réunies;
- d) Les frontières entre le ciel visible et l'obstruction causée par les bâtiments sont ébauchées automatiquement, en créant deux nouveaux thèmes;
- e) Avec l'outil SIG, les points de la maille stéréographique de tout le ciel sont spatialement comparés à chacun de ces nouveaux thèmes, ainsi il est possible de calculer leur surface et la valeur du FVC ;
- f) Il est créé une scène avec la simulation de la réflexion du canyon urbain en une surface hémisphérique en 3D.

Afin de travailler avec ce programme, il est fondamental d'avoir des fichiers en format « shapefile » qui représentent les bâtiments dans les surfaces urbaines sous forme de polygones. Souza ;Rodrigues ;Mendes (2003) soulignent que ces fichiers peuvent être importés du système CAD et d'autres extensions compatibles avec ArcView GIS 3.2. La figure 21 montre une partie d'un fichier « shapefile » typique accepté par programme. Les polygones de ce fichier ont été élaborés dans ArcView GIS, sur la base d'un fichier dwg CAD qui était importé par l'outil *Cad Reader Extension* disponible dans ArcView. La figure 22 illustre le tableau des attributs exigé par le programme avec les thèmes comme la hauteur et l'élévation du bâtiment.

**Figure 21** – Exemple de « shapefile »

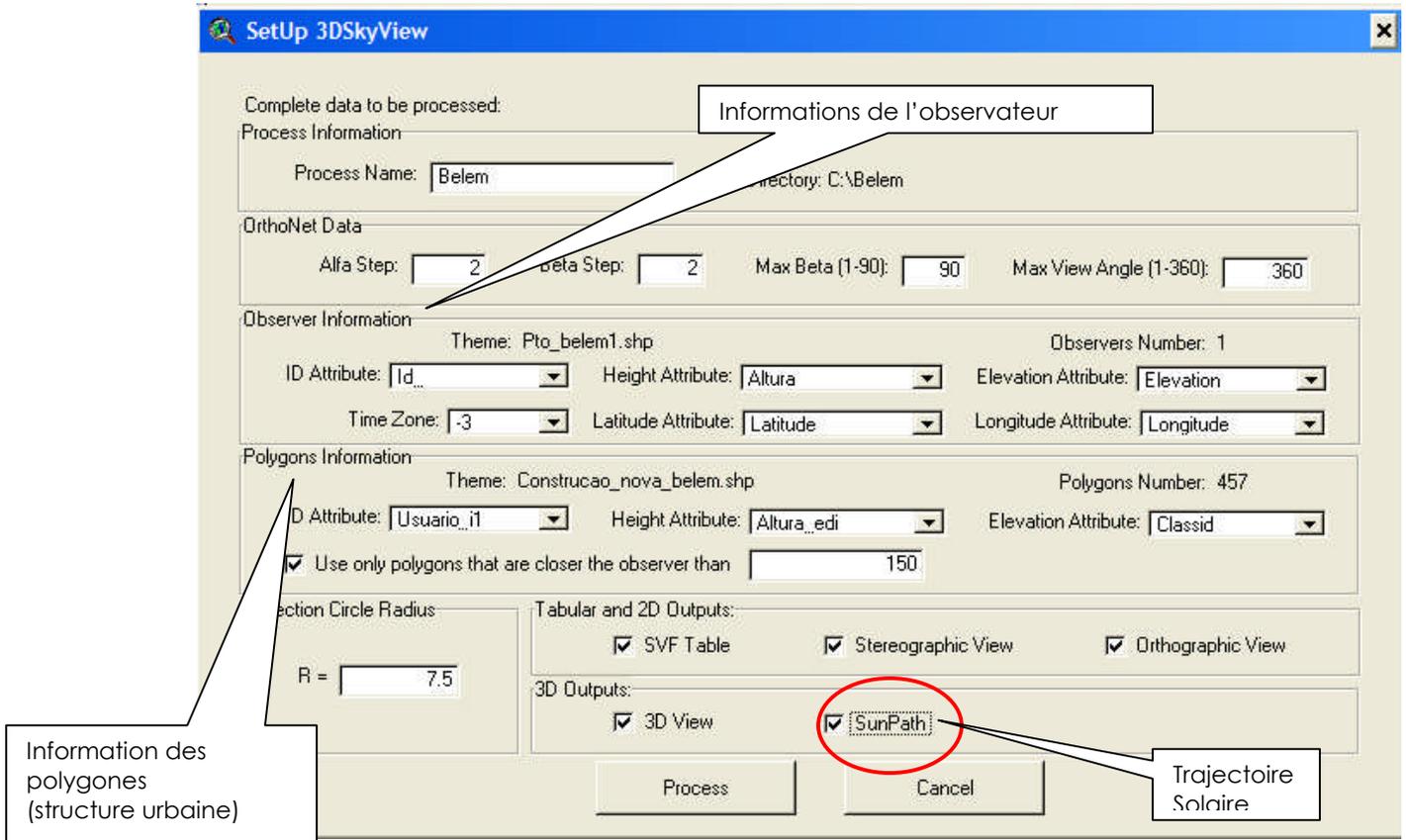


Source : SOUZA;RODRIGUES;MENDES, 2003

Il y a quatre types d'informations exigées de l'utilisateur : Informations sur le processus, informations sur l'observateur, informations sur les polygones et le rayon de projection. Les informations sur le processus comprennent l'identification du nom du fichier et sa localisation (*path*). Les informations sur l'observateur doivent être remplies dans le tableau des attributs comme hauteur (coordonnée Z) et élévation (niveau du sol). Comme le thème qui contient l'observateur doit être pré-sélectionné, les coordonnées X,Y sont automatiquement identifiées dans la fenêtre d'interface. Les informations sur les polygones sont les attributs des bâtiments. L'utilisateur devra remplir les colonnes qui contiennent la hauteur et l'élévation de

ces polygones. Finalement, il faut indiquer le rayon du cercle souhaité pour que les projections stéréographiques et orthographiques soient créées.

**Figure 22** - Interface de l'extension 3D sky view

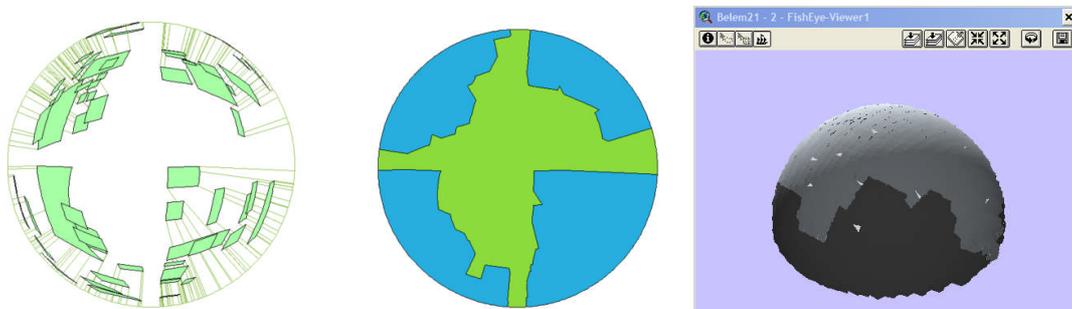


Source : Réalisé avec le programme Arcview 3.3. à partir des données cadastrales, 2011.

Il est également possible de faire une simulation du passage solaire dans le canyon urbain, le programme créant alors automatiquement un graphique solaire qui permet d'analyser l'accès solaire. Il faut la donnée du « Coordinated Universal Time (UTC) ainsi que la latitude et la longitude du point d'observateur pour la simulation du passage solaire.

La scène en 3D (Figure 23) permet de visualiser et comprendre de la relation géométrique entre l'observateur et les bâtiments. Il est possible de changer le point de vue du 3Dscene, l'usager pouvant choisir le meilleur angle de vision et d'analyse du canyon urbain.

**Figure 23** : Exemple de Projection Stéréographique réalisée à partir des données 2D et de la scène 3D – Fisheye



Source : Réalisé avec le programme Arcview 3.3. à partir des données cadastrales, 2011

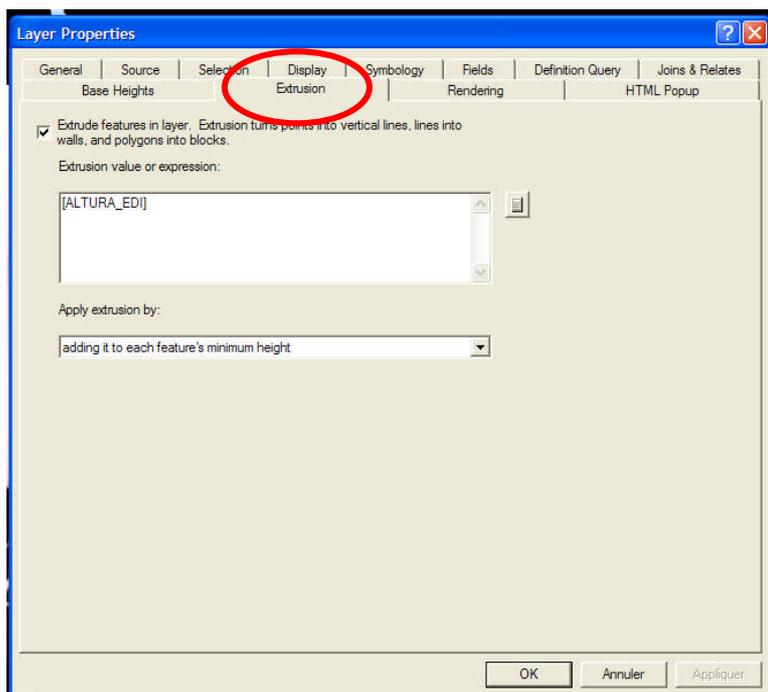
### 2.3.3. Elaboration et analyse de la maquette virtuelle 3D

Dans ce travail, nous utiliserons également les extensions *3D Analyst* et *ArcScene* de ArcGis 9 développées par ESRI (Environmental Systems Research Institute products). Ces outils permettent d'élaborer une maquette 3D de la région d'étude, par contre il n'y a pas encore une extension similaire à 3DSkyview pour cette version de ArcGis 9.

« 3D Analyst » permet de visualiser depuis plusieurs points de vue les données 3D, d'effectuer des analyses de surface et de créer des images en perspective réalistes en utilisant des données raster et vecteurs sur un modèle numérique de terrain.<sup>6</sup> Cet outil a permis de créer directement des vues tridimensionnelles à partir des données SIG de la région d'étude. A travers les interpolations de cotes de l'outil « 3D Analyst », on a aussi créé la topographie de la région d'étude.

« ArcScene » permet de créer des séquences 3D issues de la navigation et de l'exploration interactive des données, et c'est dans cette interface qu'a été élaborée la perspective 3D de la région d'étude. L'outil complémentaire « *Extrude* » (Extrusion) de ArcScene (Figure 24) a été utilisé pour élaborer la maquette 3D. C'est une méthode simple de modélisation visant à donner une épaisseur à un contour 2D. En fait cet outil transforme les polygones qui représentent les bâtiments en blocs solides. Afin d'utiliser « *Extrude* », il est nécessaire d'avoir les données cadastrales des hauteurs des bâtiments dans la table d'attributs de la couche des bâtiments. L'outil « *Extrude* » se trouve dans « *Propriétés* » (Propriétés) de cette couche. Il faut cocher la case signalée sur la figure 24 afin d'activer l'extrusion, appuyer sur le bouton représentant une calculatrice et choisir les données attributaires « hauteur des bâtiments ».

**Figure 24** : Interface d'outil « *Extrude* »



Source : Programme ArcGis 9 développé par ESRI (Environmental Systems Research Institute products), 2011.

<sup>6</sup> Source : [www.esrifrance.fr](http://www.esrifrance.fr), consulté le 6 juin 2011.

## CHAPITRE 3 RÉSULTATS

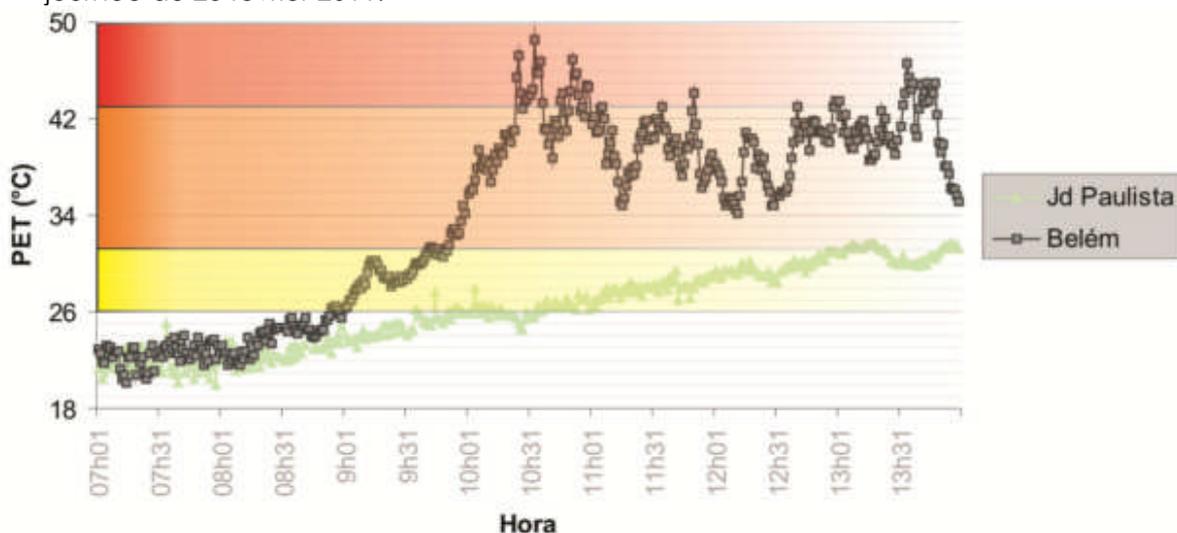
### 3.1. Monitoring *in loco*

Dans ce chapitre, il sera présentée l'analyse préliminaire des deux points de monitoring dans une période diurne spécifique. Ce monitoring a été réalisé dans le cadre d'un partenariat de recherche entre l'auteur et l'Université Technologique Fédérale du Paraná au Brésil.

Aux deux points de monitoring la variable climatique qui a présenté la plus grande corrélation avec la température de l'air est l'humidité relative de l'air, dans une relation inverse, comme il était prévu. La corrélation avec la vitesse du vent a aussi été significative dans les deux cas et également inverse: plus la vitesse était grande, plus la température ambiante était basse, à l'exception du jour 23 février 2011, où la vitesse du vent était plus basse (en considérant la bande de précision de l'équipement, quand l'air est pratiquement arrêté).

Dû aux différentes caractéristiques urbaines de chaque point, dans les deux jours de monitoring le point situé à Belém a présenté des valeurs de *v* (vent), *I* (radiation solaire incidente) et *T* (température de l'air) plus élevées que dans le point au Jardim Paulista. Le graphique 1 illustre la variation de température à chaque point de mesurage pendant la journée du 23 février 2011. Les sensations de confort<sup>7</sup> sont représentées par des bandes colorées (18 à 26°C : neutralité; 26 à 31°C : peu de chaleur ; 31 à 43°C : chaleur; plus de 43°C beaucoup de chaleur).

**Graphique 1** : Variation de température en chaque point de mesurage pendant la journée du 23 février 2011.



Source : MINELLA, HONJO, KRUGER, 2011.

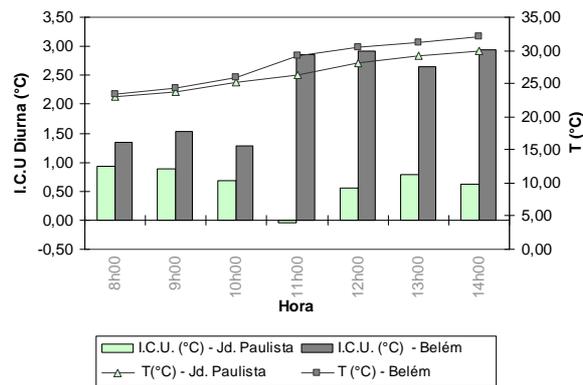
Il a été observé au point du Jardim Paulista que l'inconfort dû à la chaleur tend à s'élever de façon plus graduelle, avec une sensation thermique de neutralité jusqu'à 10h30 et de peu de chaleur après cet horaire. A Belém, l'inconfort thermique est visiblement plus significatif que dans le Jardim Paulista. Du début du monitoring jusqu'à 9h00 la sensation est de neutralité, s'élevant à peu de chaleur jusqu'à 9h30. Après cet horaire l'inconfort thermique augmente, variant entre les sensations de chaleur et beaucoup de chaleur.

L'analyse des ces variables climatiques par comparaison aux caractéristiques urbaines de chaque région aide à expliquer la divergence entre les environnements thermiques de chaque surface. Le graphique 2 présente les comparaisons entre les

<sup>7</sup> Les valeurs de la température équivalente physiologique (PET) calibrées pour São Paulo par Monteiro et Alucci, 2007. La température équivalente physiologique (PET) est définie comme un indice thermique universel développé par Höppe en 1984. Il est mesuré en degrés Celsius et basé sur le bilan thermique corporel. Il est utilisé pour mesurer le confort thermique. (OLIVEIRA, MOREAU, 2007)

moyennes de T (température) récoltées sur place et les différences de celles-ci avec la station de référence (îlot de chaleur urbaine, ICU diurne).

**Graphique 2** – Comparaisons entre l'îlot de chaleur diurne et les valeurs moyennes de température de l'air (t) récoltées sur place.

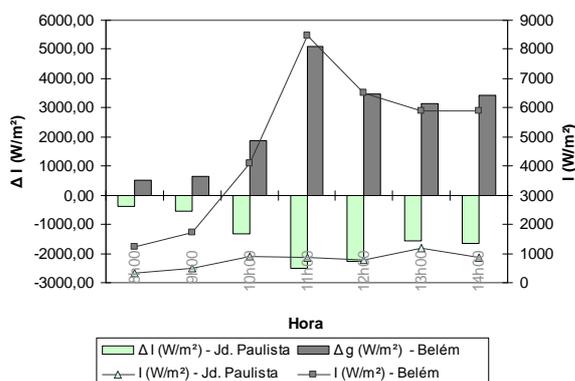


Source : MINELLA, HONJO, KRUGER, 2011.

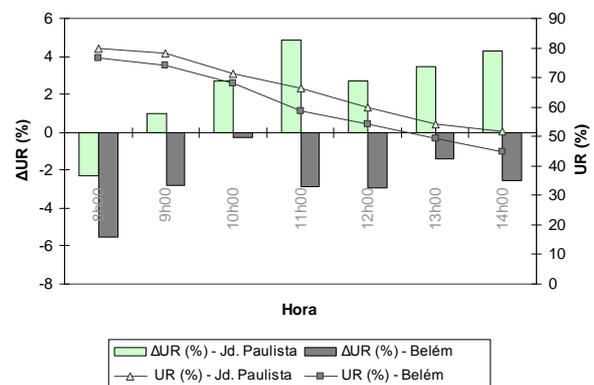
Pendant les sept heures de monitoring, le point situé à Belém a présenté des valeurs de température de l'air plus hautes que le point au Jardim Paulista. On observe aux deux points la formation d'îlots de chaleur. Néanmoins, on remarque un îlot de chaleur plus intense dans la région de Belém, principalement après 11h00. Pendant cette période, au point du Jardim Paulista la moyenne de T (température) était plus basse que la moyenne de T à la station de référence, bien que la différence soit peu significative, tout comme la différence maximale de température de l'air entre les points à Belém et au Jardim Paulista (2,91°C). Les valeurs maximales de T ont été enregistrées à 14h00 (32,19°C à Belém et 30,89°C au Jardim Paulista). Le fait que l'îlot de chaleur soit moins intense dans le Jardim Paulista qu'au point du Belém est justifié principalement par la présence d'arbres, qui forment une obstruction (partielle) à la radiation solaire.

On voit dans le graphique 3 la divergence entre les valeurs de radiation solaire à chaque point mesuré. Pendant la période de monitoring, la moyenne de radiation solaire était de 4825 W/m<sup>2</sup> à Belém et de 765 W/m<sup>2</sup> au Jardim Paulista; le Belém présente une plus grande variation dans les valeurs de radiation solaire incidente par comparaison au Jardim Paulista. Par rapport à la station de référence, le point du Jardim Paulista a présenté des valeurs de radiation solaire incidente inférieures. Notons que l'arborisation du Jardim Paulista semble favoriser un plus grand confort thermique dans les jours des températures plus élevées que dans les régions plus ouvertes ou sans obstruction lorsque la température est élevée. Le fait d'avoir des arbres dans le Jardim Paulista et presque une pénurie de végétation à Belém influencent les valeurs plus basses d'humidité relative à Belém, de même qu'à la station de référence, comme représenté par le graphique 4. En considérant les différences d'UR et de T (Graphiques 3 et 4), il est observé la tendance inverse entre ces variables.

**Graphique 3** – Comparaisons des valeurs moyennes de Radiation Solaire Incidente (i) récolté sur place et les différences de ceux-ci en relation à la station de référence.



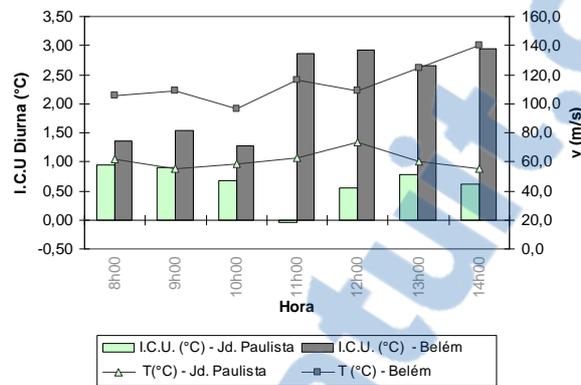
**Graphique 4** – Comparaisons des valeurs moyennes d'Humidité Relative (UR) récolté sur place et les différences de ceux-ci en relation à la station de référence.



Source : MINELLA, HONJO, KRUGER, 2011.

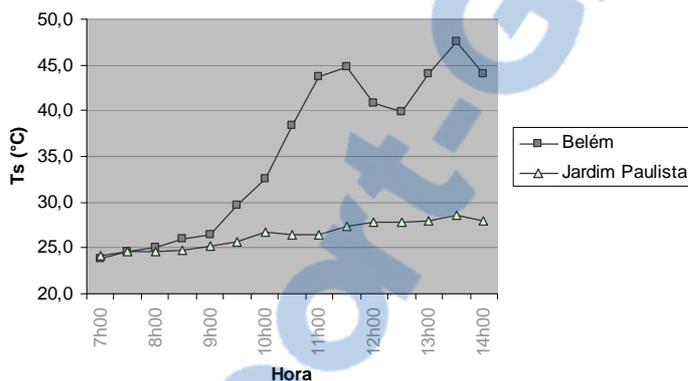
La présence de végétation semble aussi être un facteur déterminant pour expliquer une vitesse du vent moindre dans la région du Jardim Paulista, où la vitesse moyenne du vent au point était de 0.6 m/s, avec des rafales de 1.1 m/s, tandis qu'elle était de 1.1 m/s à Belém, avec des rafales de 1.9 m/s; la prédominance des vents était vers le Nord-ouest. Dans le graphique 5 sont rapportées les données de vitesse du vent et d'îlot de chaleur urbain. On remarque une relation entre les données et le fait que la vitesse du vent la plus élevée à Belém ne se soit pas montrée efficace dans la réduction des valeurs de température de l'air.

**Graphique 5** - Comparaisons entre l'îlot de chaleur diurne et les valeurs moyennes de vitesse du vent récoltées sur place.



source: MINELA, HONJO, KRUGER, 2011.

**Graphique 6** - Comparaisons entre les valeurs de température de surface (Ts).



source: MINELA, HONJO, KRUGER, 2011.

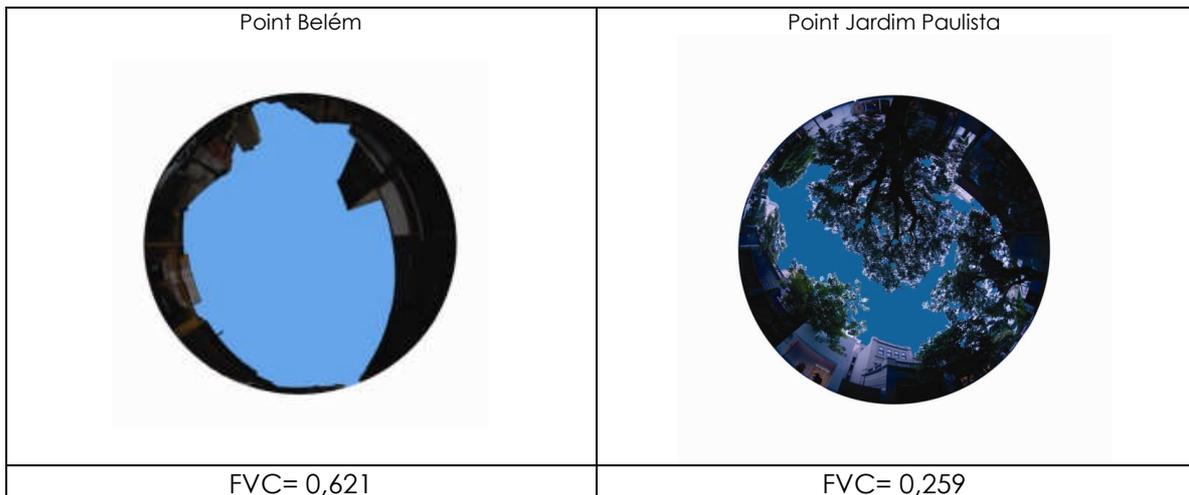
A travers l'analyse de ces graphiques, on a observé l'importance de l'ombrage et de la présence de végétation dans la formation du champ thermique local. Dans le graphique 6, on trouve les valeurs de température de surface (Ts).

La région de Belém présente des valeurs plus élevées de Ts, avec un sommet de 47,6°C à 13h30 et une moyenne de 35,41°C. Les valeurs de Ts au Jardim Paulista se sont maintenues plus constantes, avec un sommet de 28,6°C et moyenne de 26,40°C.

Sur la carte des températures de surface (Graphique 6), il est possible d'apercevoir que, pendant la période proche de 10h00, la différence approximative de Ts pour la région de Belém et la région du Jardim Paulista était d'environ 4°C (31,5 °C et 27,5°C respectivement). Pendant le monitoring, on a trouvé des valeurs similaires, avec une différence de Ts de 5,8°C entre les deux points (32,5°C à Belém et 26,7°C au Jardim Paulista). La différence de Ts augmente tout au long de la journée, atteignant une différence maximale de 19°C à 13h30.

Les images obtenues avec la lentille œil de poisson (*fisheye*) aux deux points d'étude (Figure 25) ont permis de calculer le facteur de vue du ciel à l'aide du programme Rayman. La valeur du FVC à Belém est plus élevée qu'au Jardim Paulista. Ceci renforce la corrélation entre les données récoltées de température de l'air et de radiation solaire incidente aux deux points d'étude. La photo montre clairement qu'au point de Belém il y a une absence de végétation et des éléments qui obstruent la voûte céleste. Par contre, au point du Jardim Paulista, la végétation a un rôle fondamental dans l'ombrage local.

**Figure 25 :** Facteur de vue du ciel dans les points de monitoring



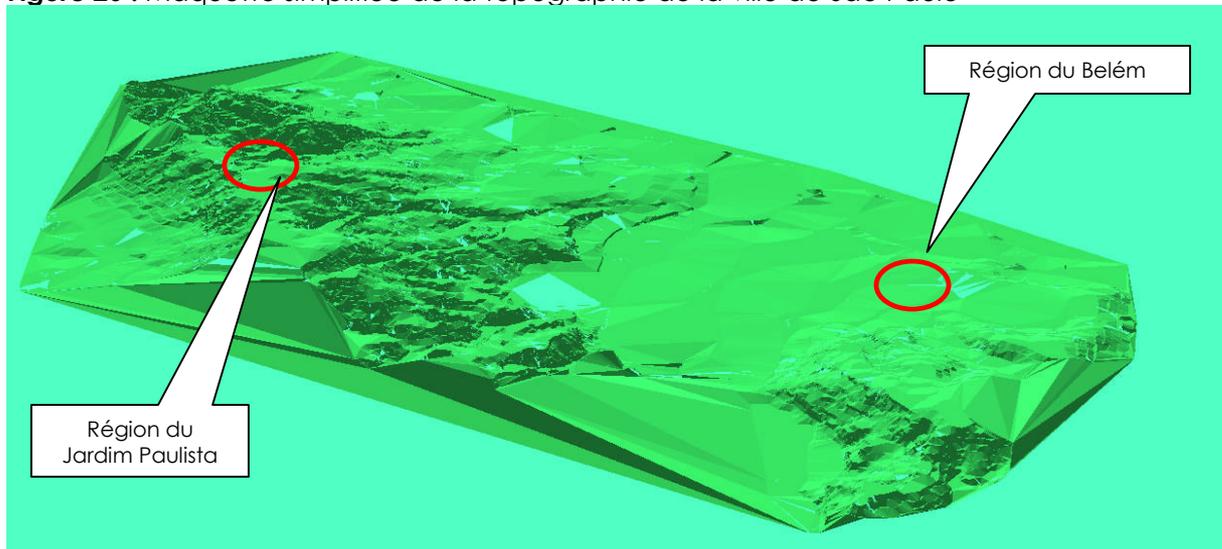
source: MINELA, HONJO, KRUGER, 2011.

### 3.2. 3D SkyView et Maquette 3D

À partir de données de DIPRO (2010), on a développé des maquettes virtuelles des deux régions avec le programme ArcGIS 9. Dans la simulation 3D, on peut observer les différences dans la configuration urbaine (Figures 27 et 28). Le quartier de Belém a une configuration urbaine assez homogène quant à la hauteur des bâtiments. Il y a quelques bâtiments de 30-70 mètres surtout résidentiels et espacés. Par contre le quartier du Jardim Paulista présente une configuration plus sectorielle, se traduisant par une partie résidentielle plus verticalisée avec des bâtiments de 22 à 117 mètres de hauteur, et une partie concentrée de villas avec plus de surface arborisée que dans le quartier de Belém.

Selon la figure 8, alors que le quartier de Belém montre une moyenne de température entre 31.5 - 32°C, le Jardim Paulista montre une moyenne de température entre 27 - 27,5°C.

**Figure 26 :** Maquette simplifiée de la topographie de la ville de São Paulo



Source: Réalisé avec le programme ArcGis 9 à partir des données cadastrales, 2011.

Les figures 29 et 33 montrent les perspectives de la région d'étude de Belém et du Jardim Paulista, ainsi que les points d'observation, les points représentant la position de l'observateur. Pour tous les canyons urbains étudiés, la position de l'observateur était à 1,0 mètre du niveau du sol. Les simulations du facteur de vue du ciel réalisées par l'extension 3D Skyview du programme Arcview 3.3 sont illustrées dans les figures 30 et 34, ainsi que les photos des canyons urbains étudiés. On peut observer que les valeurs du facteur de vue du ciel (FCV) dans la région d'étude de Belém sont supérieures à celles du Jardim Paulista. Il y a une corrélation entre le FVC et la variation de température dans ces régions mesurée in loco. La région de Belém présente une variation de température supérieure à celle du Jardim Paulista.

Figure 27 : Perspective du quartier Belém

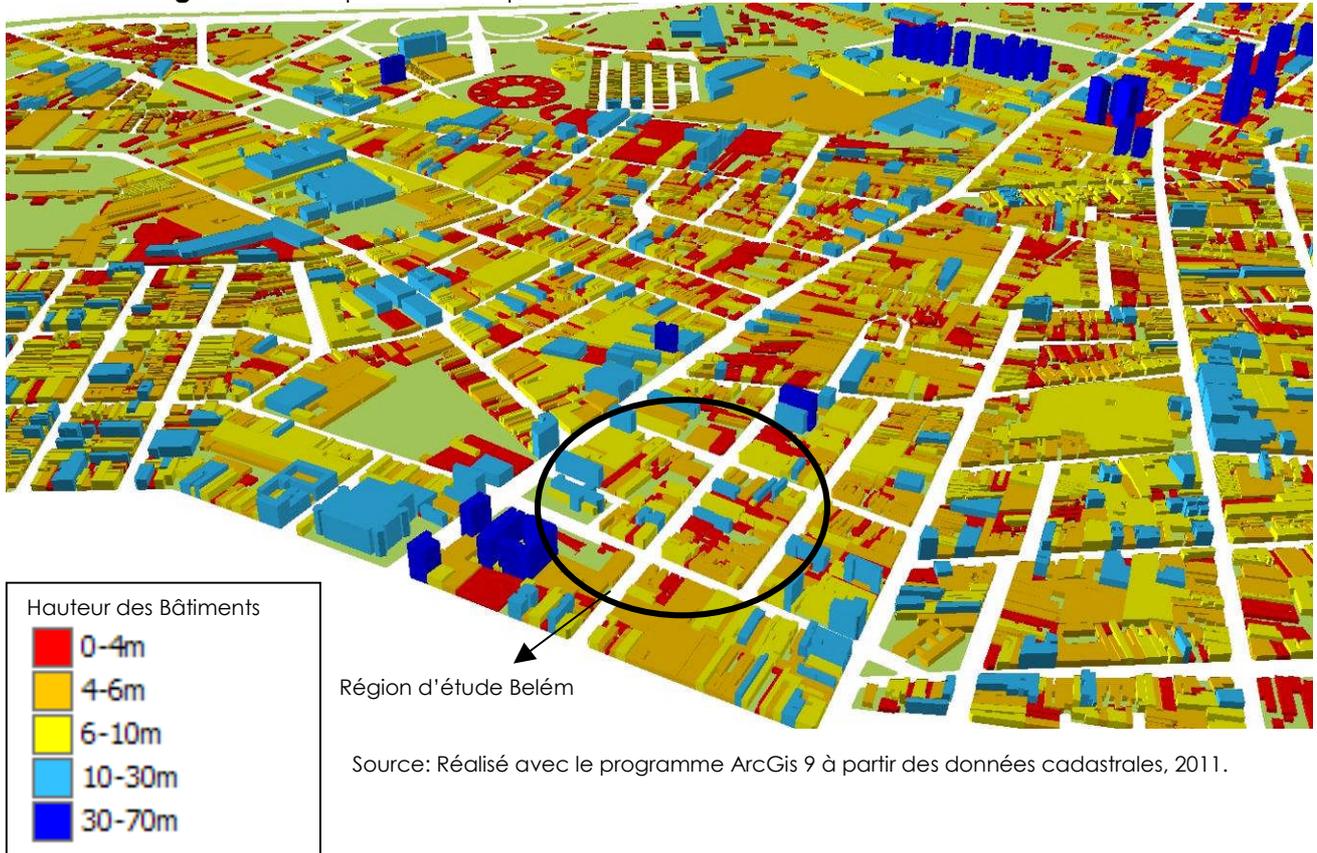
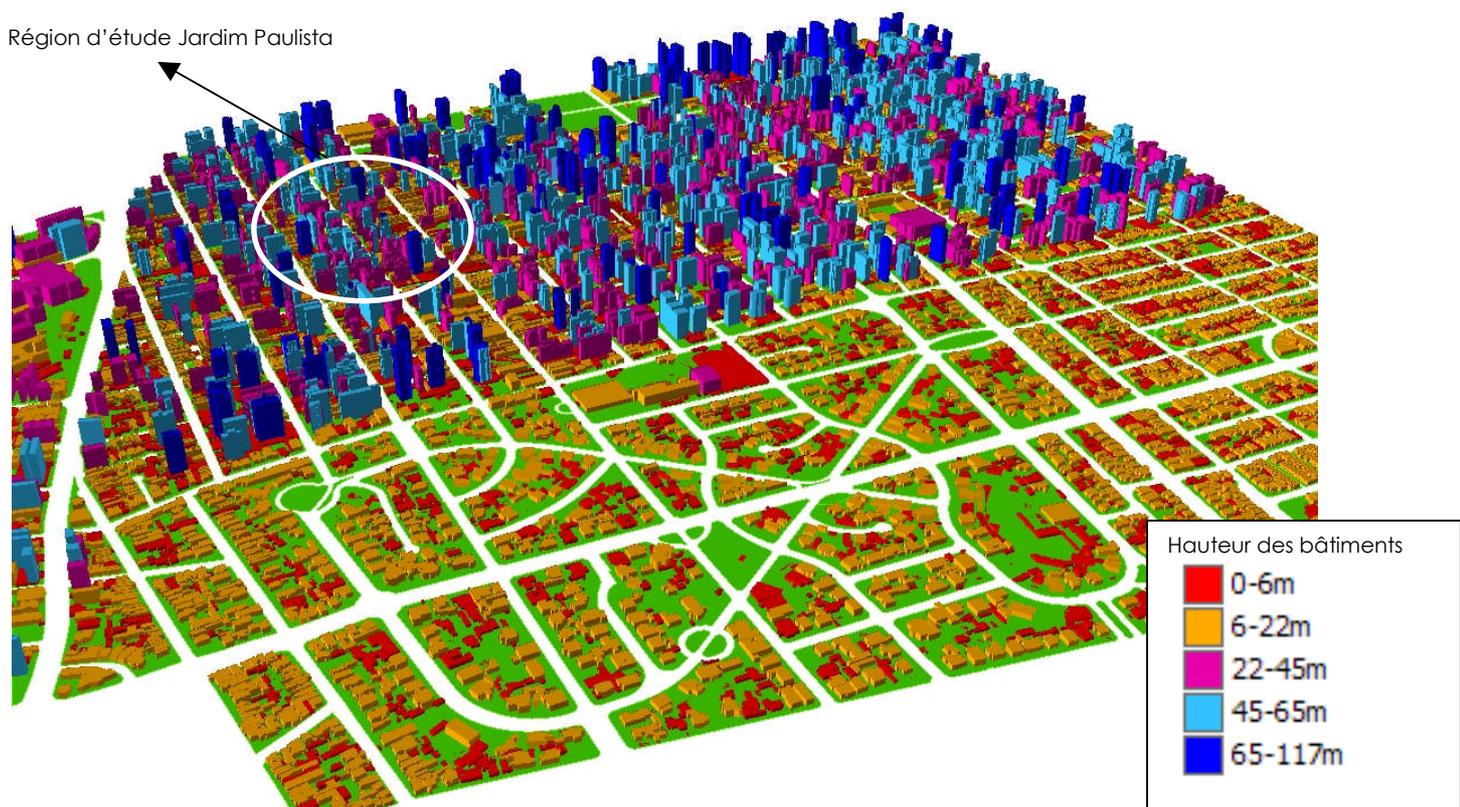


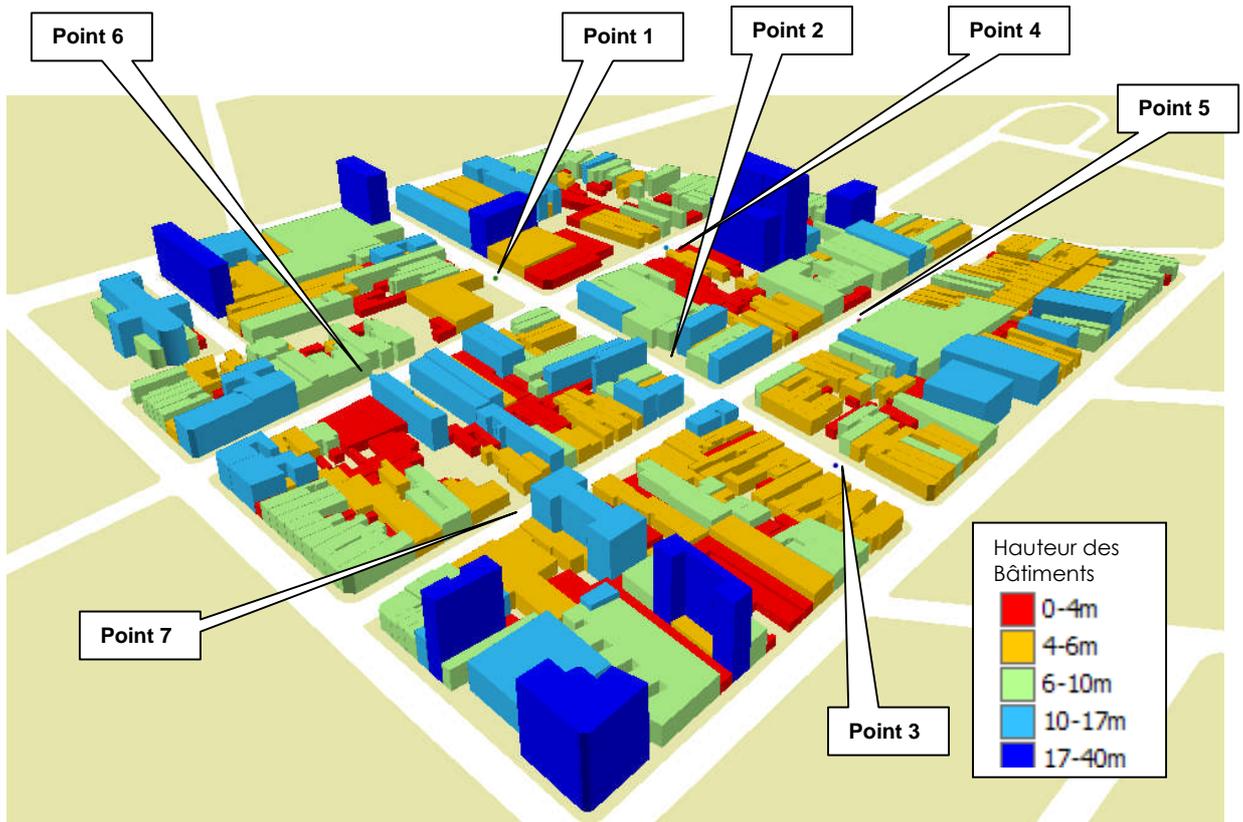
Figure 28 : Perspective du quartier Jardim Paulista



Source: Réalisé avec le programme ArcGis 9 à partir des données cadastrales, 2011.

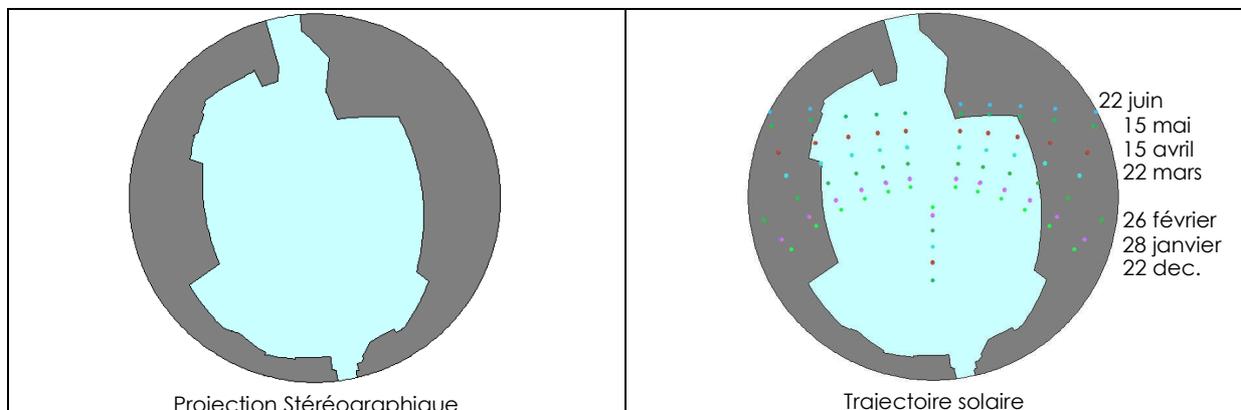


**Figure 29** : Perspective de la Région d'étude du quartier Belém avec les points d'observation



Source: Réalisé avec le programme ArcGis 9 à partir des données cadastrales, 2011.

**Figure 30** : Projection Stéréographique et trajectoire solaire du Point d'observation 1 Belém



Source : Réalisé avec le programme ArcView 3.3 à partir des données cadastrales, 2011.

**Figure 31** : Facteur de vue du ciel (FVC) du Point d'observation 1 Belém

ArcView GIS 3.3

File Edit Table Field Window Help

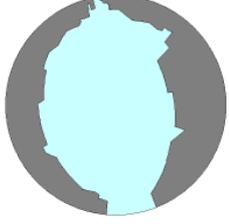
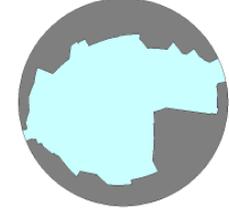
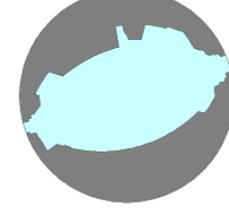
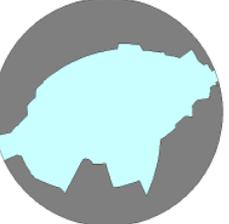
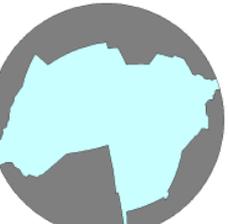
0 of 1 selected

belemASVF.dbf

ObsID	SkyArea	CanyonArea	VisiSky	FVC
1	353.25000	79.99321	273.25679	0.77355

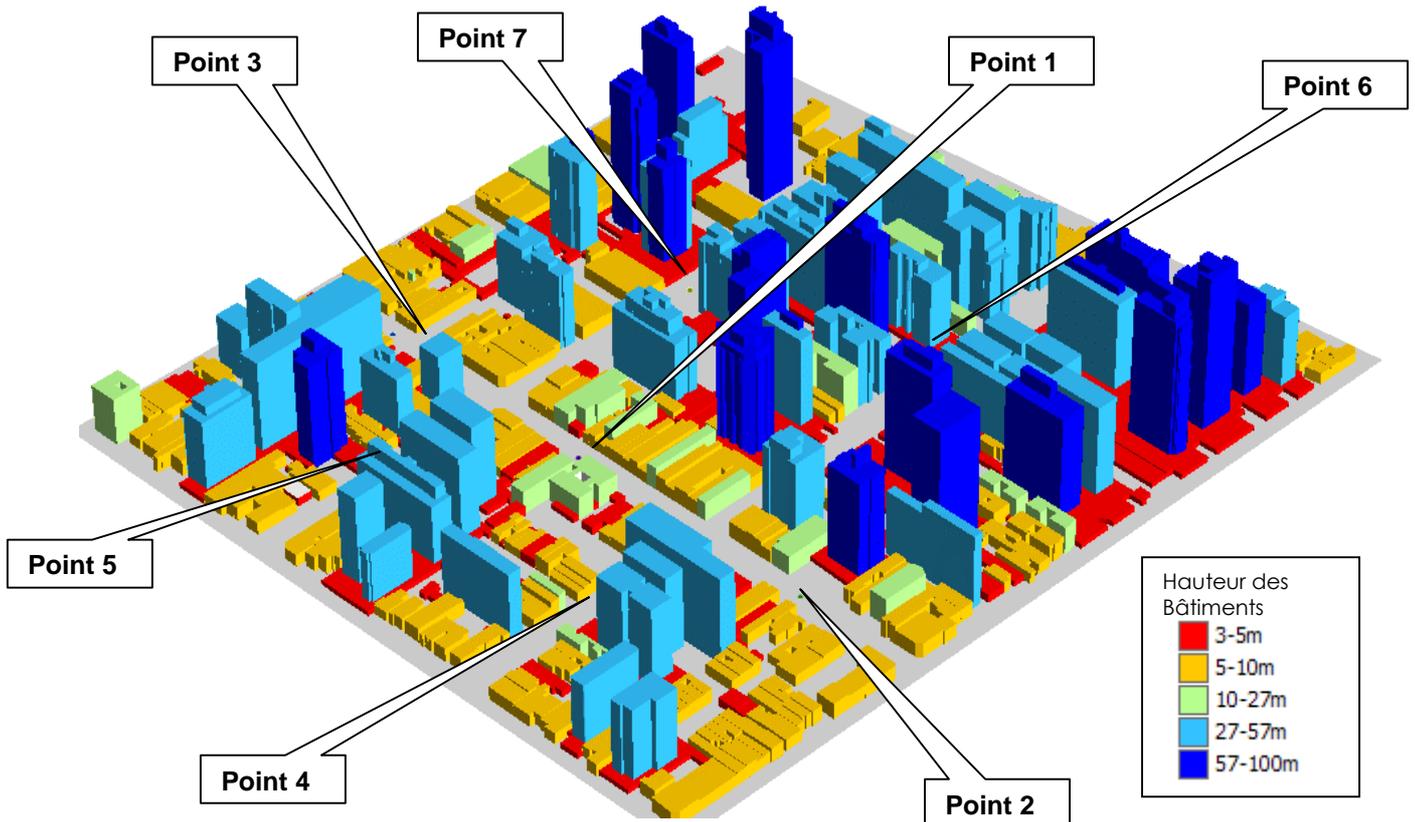
Source : Réalisé avec le programme ArcView 3.3 à partir des données cadastrales, 2011.

**Figure 32 :** Projection Stéréographique des Points d'observation de la région d'étude Belém et les valeurs respectives du facteur de vue du ciel.

<p style="text-align: center;"><b>Point 2</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>FVC = 0,713</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Point 3</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>FVC = 0,793</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Point 4</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>FVC = 0,778</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Point 5</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>FVC = 0,728</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Point 6</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>FVC = 0,742</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Point 7</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>FVC = 0,752</b></p> 

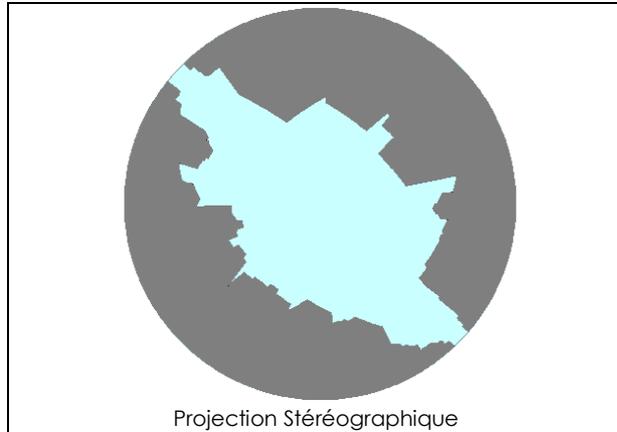
Source : Résultat obtenu avec l'extension 3D Skyview du programme ArcView 3.3 à partir des données cadastrales, 2011.

**Figure 33** : Perspective de la Région d'étude du quartier Jardim Paulista avec les points d'observation



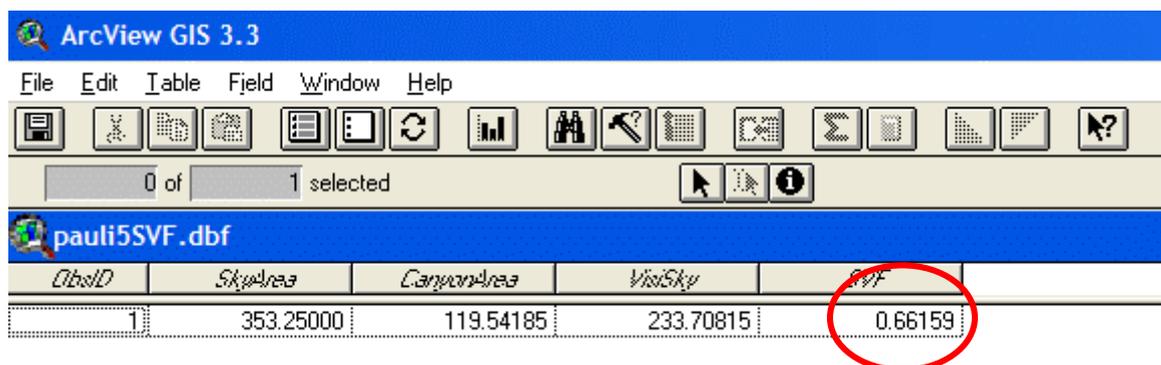
Source: Réalisé avec le programme ArcGis 9 à partir des données cadastrales, 2011.

**Figure 34** : Projection Stéréographique du Point d'observation 1 Jardim Paulista



Source : Réalisé avec le programme ArcView 3.3 à partir des données cadastrales, 2011.

**Figure 35** : Facteur de vue du ciel (FVC) du Point d'observation 1 Jardim Paulista



Source : Réalisé avec le programme ArcView 3.3 à partir des données cadastrales, 2011.

**Figure 36 :** Projection Stéréographique des Points d'observation de la région d'étude Jardim Paulista et les valeurs respectives du facteur de vue du ciel

<p style="text-align: center;"><b>Point 2</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>FVC = 0,668</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Point 3</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>FVC = 0,666</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Point 4</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>FVC = 0,583</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Point 5</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>FVC = 0,551</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Point 6</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>FVC = 0,523</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Point 7</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>FVC = 0,548</b></p> 

Source : Résultat obtenu avec l'extension 3D Skyview du programme ArcView 3.3 à partir des données cadastrales, 2011.



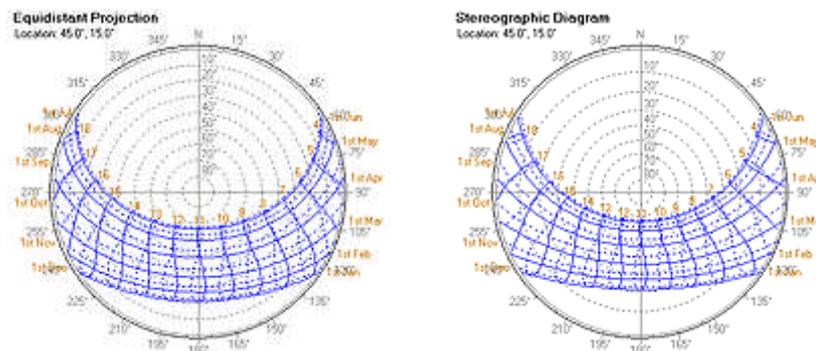
## CHAPITRE 4 DISCUSSION

L'analyse des résultats a confirmé l'hypothèse initiale selon laquelle la région de Belém présenterait un îlot de chaleur plus intense que la région du Jardim Paulista dû aux caractéristiques urbaines de chaque quartier, illustrés par la carte thermique (Figure 8). Parmi les facteurs qui influencent les valeurs de température de l'air plus basses dans le Jardim Paulista on peut citer: une plus grande altitude, une valeur du facteur de vue du ciel plus basse et une arborisation significative. Il est important de souligner que cette région comporte des magasins qui possèdent l'air conditionné, avec une température en général réglée à 22°C; ce qui peut avoir une influence sur le confort thermique externe.

Dans la région de Belém, en considérant la période contrôlée par le monitoring in loco, le confort thermique est altéré dû à l'absence d'ombrage; par conséquent les valeurs de radiation solaire incidente et de température de surface sont plus élevées. Le facteur de vue du ciel (FVC) du canyon urbain simulé prend également des valeurs plus élevées à Belém qu'au Jardim Paulista. Il semble qu'il y ait une corrélation entre le FVC et la température de l'air.

Si nous comparons les photos fisheye faites au le point d'observation 1 à Belém et au Jardim Paulista (Figure 25) avec la simulation élaborée par l'extension 3D Skyview (Figure 30 et 34), nous pourrions confirmer la bonne performance du programme en relation à la visualisation du canyon urbain. Par contre, il y a eu dans cette recherche une différence de 15 à 40 % entre les valeurs du facteur de vue du ciel mesurées par l'appareil photo et la simulation par le programme. Cette distortion pourrait être due au fait que l'image photographique est basée sur une projection équidistante et l'image gérée par le programme 3D Skyview sur une projection stéréographique (Figure 37). Dans le programme la typologie des bâtiments est représentée d'une manière simplifiée (blocs solides), et il ne simule pas la topographie du terrain et la végétation urbaine, ce qui pourrait aussi influencer le résultat du FVC. Ce sont les principaux inconvénients de l'extension 3D Skyview.

**Figure 37:** Exemple de Projection Equidistant et Projection Stéréographique par rapport au trajectoire solaire.



Source: [http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Sun-Path\\_Diagram](http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Sun-Path_Diagram)

Les photos ont été élaborées par une composition de deux images superposées des points de monitoring car l'appareil photo utilisé dans cette recherche ne fait pas un enregistrement complet de la voûte celeste. Ainsi, la composition des images pourrait gérer une distortion minimum dans le resultat final.

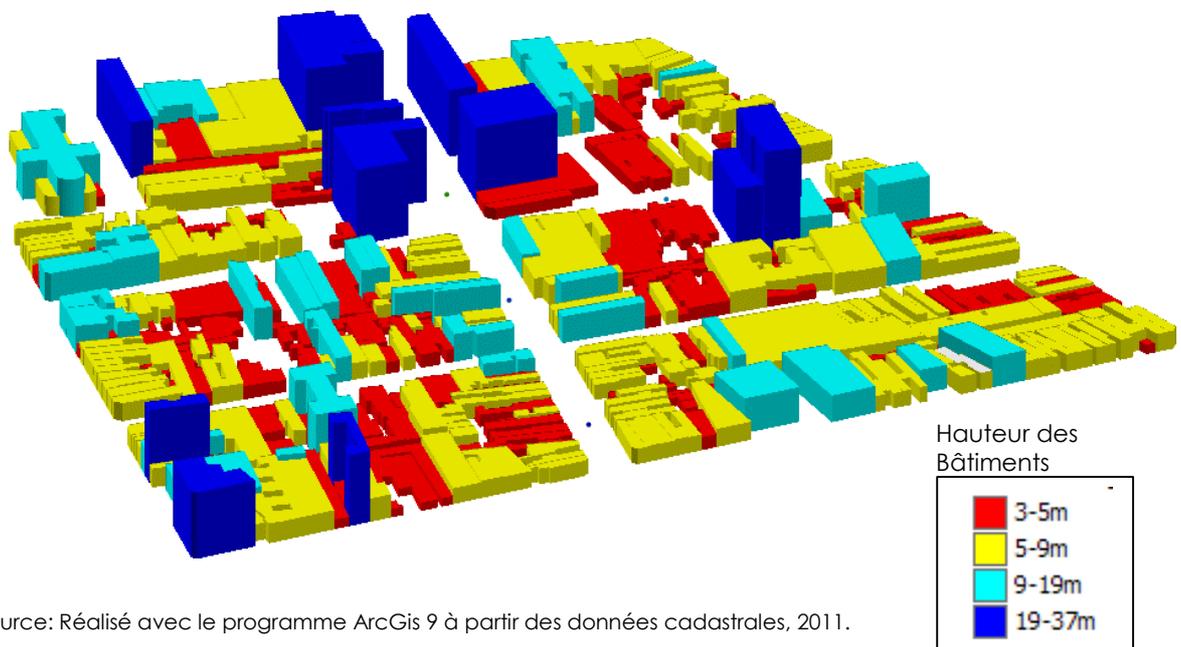
Malgré les limites de cette recherche, le programme 3D Skyview peut être considéré comme une méthode pratique d'analyse et qui simplifie la représentation des polygones urbains. Le remplacement de l'utilisation des appareils avec des lentilles *fisheye* combiné à la capacité d'ébaucher automatiquement le ciel visible et de calculer la valeur du FVC sont les caractéristiques les plus importants de l'extension 3DSkyview.

Par exemple, si dans la région de Belém (Figure 38), on prévoyait de nouveaux bâtiments de 50 mètres de hauteur, la configuration du canyon urbain serait altérée, ainsi que sa capacité d'échange de radiation avec l'espace. Nous pourrions observer que les nouveaux bâtiments provoqueraient une diminution de 36,4 % de la valeur du FVC, qui

passerait de 0,773 à 0,491 (Figure 39). Dans d'autres méthodes, ce type de simulation de futurs scénarios pourrait consommer beaucoup de temps. Par conséquent, la possibilité d'incorporer de nouveaux éléments, comme des bâtiments, dans la scène originale est un paramètre remarquable de l'outil 3Dskyview et ArcGIS, car la valeur future du FVC pourrait être prévue et analysée avant l'implantation d'un projet.

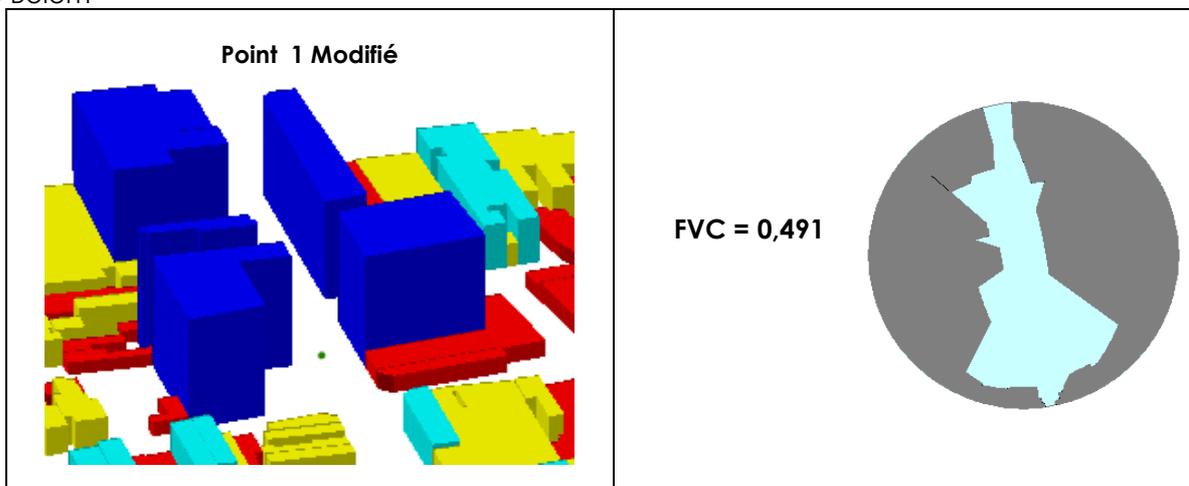
En analysant les résultats obtenus pour la projection 2D, cet outil apparaît comme un important instrument pour l'architecture bioclimatique. Sa capacité à créer des projections stéréographiques permet des combinaisons futures avec la trajectoire du soleil et des diagrammes d'illumination, lesquels sont fréquemment utilisés pour l'analyse thermique des bâtiments. Cette représentation est faite à partir de la projection stéréographique du canyon urbain. Ceci permet une analyse de l'accès solaire urbain quand le diagramme de la trajectoire du soleil est superposé à la projection stéréographique du canyon urbain. Nous pourrions par exemple vérifier si pendant l'hiver la pénétration solaire sera bloquée ou non par les bâtiments. Ainsi l'analyse de l'altération de la géométrie urbaine pourrait être utilisée dans la prise de décision concernant l'aménagement du territoire.

**Figure 38** : Perspective de la simulation des nouveaux bâtiments dans la région d'étude Belém



Source: Réalisé avec le programme ArcGis 9 à partir des données cadastrales, 2011.

**Figure 39** : Facteur de vue du ciel pour la nouvelle configuration dans la région d'étude de Belém



Source: Réalisé avec le programme ArcGis 9 et Arcview 3.3 à partir des données cadastrales, 2011.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES FUTURES

La prise en compte du climat urbain dans l'aménagement des villes est un engagement à long terme. En effet, si les villes, et plus particulièrement les agglomérations de taille importante, veulent rester des lieux de vie attractifs, elles devront intégrer de nouvelles données d'ordre environnemental<sup>8</sup>. L'utilisation des SIG est fondamentale pour intégrer l'identification du phénomène des îlots de chaleur urbains dans les plans d'aménagement du territoire. Cette analyse vise à encourager l'application des mesures d'atténuation et d'adaptation à l'augmentation de la température urbaine.

L'étude de cas réalisée a permis d'analyser le phénomène d'îlot de chaleur sur des bases concrètes. Le monitoring sur place aide à tracer un diagnostic du champ thermique des villes et de cette manière contribue à la prise de décision concernant les mesures de planification urbaine qui visent à améliorer la qualité des espaces urbains. Dans cette étude il n'a pas été réalisé de longues séries de monitoring qui pourraient caractériser de manière plus précise ces deux régions tellement distinctes. Néanmoins, cette caractérisation préliminaire du champ thermique de ces régions fait partie d'une recherche sur des simulations numériques avec le programme Envimet<sup>9</sup>.

La principale contribution du 3DSkyView est l'ébauche automatique du ciel visible. Auparavant, c'était une tâche difficile que de déterminer le facteur de vue du ciel par les différentes méthodes manuelles ou via des images photographiques. Dans l'analyse spatiale des îlots de chaleurs, cet outil permet une visualisation directe de la géométrie urbaine de différents points d'une ville. La représentation en 3D rend possible une meilleure compréhension des interactions entre la géométrie urbaine et le climat. Ceci est un grand avantage pour travailler avec un environnement SIG.

Par contre, cet outil présente une limitation dans la représentation des éléments urbains de différentes formes en hauteur. Ainsi, le 3DSkyview est mieux adapté à des éléments de sections constantes. Il a été vérifié que l'environnement SIG sur lequel le programme a été développé, permet les manipulations de couches, qui peuvent être une solution pour mieux représenter ces éléments. Le programme ne prend pas en charge la simulation de la topographie ou de la végétation, ce qui représente un désavantage remarquable pour le développement d'une nouvelle version.

Cette recherche nous a souligné l'importance d'intégrer des analyses micro-climatiques urbaines avec l'environnement SIG comme outil dans la prise de décision pour la validation d'un projet futur d'aménagement du territoire. Les simulations numériques en 3D nous permettent d'évaluer l'impact de l'implantation d'un nouveau bâtiment par rapport à l'altération de la géométrie urbaine, les conditions de rayonnement et de confort thermique afin de concevoir un environnement urbain avec une approche bioclimatique.

---

<sup>8</sup> source : Colombert, M.,2008.

<sup>9</sup> source : [www.envi-met.com](http://www.envi-met.com), consulté en février, 2011.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AIDA, M. ; GOTOH, K. Urban albedo as a function of the urban structure – a 2- dimensional numerical simulation (part II). *Boundary Layer Meteorology*, num. 23, p. 415-424, 1982.

ALI-TOUDERT, F. Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate. 2005. Thesis (Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg). Universität Freiburg, Freiburg, 2005.

ANDRADE, H. O clima urbano – natureza, escalas de análises e aplicabilidade. *Finisterra – Revista Portuguesa de Geografia*, Lisboa, v.XL, n.80, p.67-91, 2005. Disponible sur [http://ceg.ul.pt/finisterra/numeros/2005-80/80\\_05.pdf](http://ceg.ul.pt/finisterra/numeros/2005-80/80_05.pdf) consulté en mai, 2011.

ANTONUCCI, D. Morfologia urbana e legislação urbanística: estudo de setores de bairros na cidade de São Paulo. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ASSIS, E. A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade : reflexões sobre uma trajetória. In, Encontro Nacional e IV Encontro Latino Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 8, 2005, Maceió. Anais : ENCAC – ELACAC, 2005. p.92-101.

ASSIS, E. Aplicações da climatologia urbana no planejamento da cidade : revisão dos estudos brasileiros. *Revista de Arquitetura e Urbanismo*, v.9, p.20-25, 2007.

ASSIS, E. ; LIMA, H. ; SANTOS, L. A graphical method for the sky view factor calculation in the urban heat island studies. In : 20th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Santiago : PLEA, 2003.

BESSEMOULIN, P. ; OLIVIÉRI, J. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. *La Météorologie*, 8, n. 31. p. 42-48, septembre, 2000.

BRADLEY, A. ; THORNES, J. ; CHAPMAN, L. A method to assess the variation of urban canyon geometry from sky view factor transects. *Atmos. Sci. Lett. (Royal Meteorological Society)*, v.2, p.155-165, 2001.

BRANDÃO, R. As interações espaciais urbanas e o clima. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BROWN, M. ; GRIMMOND, S. ; RATTI, C. Comparison of Methodologies for Computing sky view factor in urban environments. In : International Symposium on Environmental Hydraulics. Tempe, AZ, EUA, 2001. Disponible sur [http://senseable.mit.edu/papers/pdf/2001\\_Brown\\_Grimmond\\_Ratti\\_ISEH.pdf](http://senseable.mit.edu/papers/pdf/2001_Brown_Grimmond_Ratti_ISEH.pdf) consulté en avril, 2011.

BRYSON, R. ; ROSS J. The climate of the city, in : DETWYLER, T. R. & MARCUS, M. G., org. *Urbanization and Environment*, Belmont, Duxbury Press, 1970.

CAMILLONI, I. ; BARRO, V. On the urban heat island effect dependence on temperature trends, *Climatic Change*, n. 37, p.665-681, 1997.

CAMPBELL, S. Application Note: Weather Station Siting and Installation Tools. 1997.

CHAPMAN, L. Towards a tree-view factor. Why do urban climatologists dislike trees? *IAUC Newsletter*, v.25, p.4-6, 2007.

CHAPMAN, L. ; MULLER, J. MCMULDROCH, S. Potential applications of thermal fisheye imagery in urban environments. *Geoscience and Remote Sensing Letters*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, v. 4, n.1, p. 56-59, 2007.

CHAPMAN, L. ; THORNES, J. Real-time sky-view factor calculation and approximation. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, v.21, n.5 , p.730-742 , 2004.

CHAPMAN, L. THORNES, J. ; BRADLEY, A. Rapid determination of canyon geometry parameters for use surface radiation budgets. *Theoretical Appl. Climatol.*, v. 69, n. 1-2, p.81-89, 2001.

CHARABI, Y. L'îlot de chaleur urbain de la métropole lilloise : mesures et spatialisation. Mémoire de doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille, 236p., 2001.

- COLOMBERT, M. Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Thèse de doctorat en Génie urbain. École Doctorale Ville et Environnement, Université Paris-Est, 2008.
- DANNI, I. M. Aspectos temporo-espaciais da temperatura e umidade relativa em Porto Alegre em janeiro de 1982 : contribuição ao estudo do clima urbano. 1987. 129f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.
- DINES, M. Climatologia urbana e o desenho das cidades : insumos para o planejamento da metrópole paulistana. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.
- DIPRO (Departamento de Estatística e Produção de Informação). CD ROM. 2011.
- ELIASSON, I. ; SVENSSON, M. Spatial air temperature variations and urban land-use-a statistical approach. Meteorological Applications, n.10,p. 135-149, 2003.
- ELIASSON, I. ;SVENSSON, M. Spatial air temperature variations and urban land-use-a-statistical approach. Meteorological Application, n.10 p. 135-49, 2003.
- ESCOURROU, G. Le climat et la ville. Editions Nathan, 1991, 190p.
- FELDMAN, S. Planejamento e Zoneamento: São Paulo 1947/1972. São Paulo: EDUSP, FAPESP, 2005.
- FREITAS, E. ;DIAS,P. Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. In: Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.3, 355-366, 2005.
- FROTA, A. ; SCHIFFER, S. Manual de conforto térmico. São Paulo, Studio Nobel, 1995.
- GÁL, T. ; RZEPA, M. ; GROMEK,B. ; UNGER,J. Comparaison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment. Acta Climatologica et Chorologica, p.l 17-26, 2007.
- GIRIDHARAN, R. ; LAU, S. ;GANESAN, S. ; GIVONI,B. Urbain design factors influencing heat island intensity in high-rise high density environments of Hong Kong. Buildings and Environment, vol. 42, p. 3669-3684, 2007.
- GIVONI, B. Climate Considerations in Building and Urban Design. New York : Van Nostrand Reinold, 1998.
- HÖPPE, P. The Physiological Equivalent Temperature: a index for the biometeorological assessment of the thermal environment. Intern. J. of Biometeorology. n.43. p. 71-75, 1999.
- ISO 7726 Ergonomics of the Thermal Environment: Instruments of measuring physycal quantities. Switzerland: ISO, 1998.
- ISO 7730 Ergonomics of the Thermal Environment: Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Switzerland: ISO, 2005.
- ISO 8896 Ergonomics of the Thermal Environment: Determination of metabolic rate. Switzerland: ISO, 2004.
- JOHANSSON, E. Urban design and outdoor thermal comfort in warm climates – studies in Fez and Colombo, 2006. Thesis (PhD in architecture), Housing Development & Management, Lund University, Lund Sweden, 2006.
- JOHNSON,G.T. ; WATSON,I.D. The determination of view-factors in urban canyons. Journal of Climate and Applied Meteorology, 23 :329-335, 1984.
- LANDSBERG,H. The urban climate. Nova York : Academic Press, 1981.
- LEROYER, S. Simulations numériques de l'atmosphère urbaine avec le modèle SUBMESO : application a la campagne CLU- Escompte sur l'agglomération de Marseille. Thèse : dynamique des fluides et des transferts, École Centrale de Nantes et Université de Nantes, p. 262, 2006.
- LOMBARDO, M. A. Ilha de Calor nas Metrôpoles – o exemplo de São Paulo. São Paulo :HUCITEC, 1985. 244p.

- MACEDO, S. São Paulo, paisagem e habitação verticalizada: os espaços livres como elementos de desenho urbano. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.
- MENNEH, M. Morfologia da paisagem verticalizada: conflitos e padrões urbanísticos. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- MINELLA, F. C. O. Avaliação da influência de aspectos da geometria urbana sobre os níveis de conforto térmico em ruas de pedestres de Curitiba. Dissertação de Mestrado em Tecnologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- MINELLA, F. ; HONJO, S. ; KRUGER, E. Comparações microclimáticas de duas regiões distintas de São Paulo. In :XI Encontro Nacional e VII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2011. Búzios. Anais do XI ENCAC. Búzios :ANTAC, 2011.v.1.p.1-10.
- MOIN, U. M. ; TSUTSUMI, J. Rapid Estimation of Sky view factor and its application to human environment. *Journal of the Human- Environment System*, v.7,n.2, p.83-87, 2004.
- MONTEIRO, C. (Org.) Teoria e Clima Urbano. In : MONTEIRO, Carlos A. F., MENDONÇA, Francisco. Clima Urbano. São Paulo :Contexto, 2003. p. 9-68.
- MONTEIRO, L. M. Modelos preditivos de conforto térmico :quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos, 2008, 291p. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.
- NAKAGAWA, K. Recent trends of urban climatological studies in Japan, with special emphasis on the thermal environments of urban areas. *Geographical Review of Japan*, 69B, p. 206-224, 1996.
- NAKAMURA, Y. ; OKE, T. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment*, vol. 22, n. 12, p. 2691-2700, 1988.
- NUNEZ, M. ; OKE, T. R. The Energy Balance of an Urban Canyon. *J. Appl. Meteorol.* V. 16, p. 11-19, 1977.
- OKE, T. City size and the urban heat island. *Atmospheric environment*, n.7, p. 769-779, 1973.
- OKE, T. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island : comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, v.1 p.237-254, 1981.
- OKE, T. *Boundary Layer Climates*. Londres: Methuen, 1987.
- OKE, T. The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, n. 12, p. 471-508. 1988.
- OKE, T. ; JOHNSON, G. ; STEYN, D. ; WATSON, I. Simulation of surface urban heat islands under « ideal » conditions at night. Part 2 : Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 56, p. 339-358, 1991.
- OKE, T. Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites. In NATO/CCMS International technical meeting on air pollution modelling and its application, 27, 2004, p. 1-14. Banff: Kluwer, 2004.
- OLGYAY, V. *Arquitetura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*, Barcelona, Editorial Gustavo Gili, 1998.
- OLIVEIRA, P. Cidade apropriada ao clima : a forma urbana como instrumento de controle do clima urbano. Brasília :UnB, 1988.
- OLIVEIRA, F. ; MOREAU, S. Confort thermique ressenti, analyse des campagnes expérimentales 2005-2006. Département Climatologie-Aérodynamique. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Nantes, 2007.
- OLSSON, J. Photo de São Paulo, 2006. Disponible sur <http://plantingbrazil.wordpress.com> consulté en mai, 2011.
- PARK, H. Features of the heat island in Seoul and its surroundings cities. *Atmospheric Environment*, 20, 1987.

- PARMENTIER, A. Elaboration d'un outil d'aide à la décision pour atténuer le phénomène d'îlots de chaleur en milieu urbain. Mémoire présenté à l'École de Technologie Supérieure, Maîtrise en Génie de l'Environnement, Université du Québec, Montréal, 2010.
- PIGEON, G. Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine – Projets clu-escompte et Capitoul. Mémoire de Doctorat. Université Paul Sabatier Toulouse III, École doctorale des Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace, Toulouse, 2007.
- RINGENBACH, N. Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : Mesures, modélisation et validation sur Strasbourg. Mémoire de thèse en Sciences de l'image, de l'informatique et de la télédétection. Université Louis Pasteur Strasbourg I, p.146, 2004.
- RIZWAN,AM, LYC Dennis et C.Liu. « A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island ». Département de génie mécanique, University of Hong Kong, (Chine). Journal of Environmental Sciences n° 20,p.120-128. , 2007.
- SAKAMOTO, L. S. Relação entre a temperatura do ar e a configuração do céu na área central da metrópole paulistana : análise de dois episódios diários. 1994. 200f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- SANTAMOURIS,M. (Org.) et al. Energy and climate in the urban built environment. Londres :James and James Science Publishers, 2001.
- SÃO PAULO (Cidade). Secretaria Municipal de Planejamento Urbano. Atlas ambiental do município de São Paulo. São Paulo: SEMPLA, 2002.
- SOMEKH, N. A cidade que não pode parar: Planos urbanísticos de São Paulo no século XX. Fundo Mackenzie de Pesquisa, 2002.
- SOUZA, L. C. L. O uso de sistemas de informação geográfica como ferramenta de análise térmica urbana. XIX Encontro de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC) - "Conforto Ambiental e Patrimônio Construído". Departamento de Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP, Bauru, 2007.
- SOUZA, L.C.L.;POSTIGO,C. ; NAKATA, C. ; SORANO, E. Ambiente Térmico do Pedestre. Revista Minerva, v.5, p. 121-127, 2008.
- SOUZA,L.C.L. ;RODRIGUES,D.S. ;MENDES,J.F.G. A 3D-GIS extension for sky view factors assessment in urban environment. Proc. Of the 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban management, Sendai, 27-29 May, 2003 :Japan. (paper awarded with the Sendai Prize for outstanding contributions to the Conference).
- STEYN, D.G. et al. The determination of sky-view factors in urban environments using video imagery. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v.3, p. 759- 764, 1986.
- SVMA (Secretaria do Verde e Meio Ambiente); SMPU (Secretaria Municipal de Planejamento Urbano). Atlas ambiental de São Paulo. Fase I: Diagnóstico e bases para a definição de políticas públicas para as áreas verdes do Município de São Paulo. Prefeitura do Município de São Paulo, 2002.
- SVMA, (Secretaria do Verde e Meio Ambiente). Atlas ambiental de São Paulo. São Paulo, 2004.
- TAHA , H. ; AKBARI, H. ROSENFELD, A. HUANG, J. Residential cooling loads and the urban heat island the effects of albedo. Buildings and Environment, vol. 23, n.4, p.271-283, 1988.
- TARIFA, J. ;AZEVEDO,T. Os climas na cidade de São Paulo :teoria e prática. São Paulo: FFLCH-USP, 2001
- THORSSON,S.; LINDBERG, F.; ELIASSON, I. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. International Journal of Climatology,n.27.p.1983-1993,2007.
- YAMASHITA, S. ; SEKINE, K. ;SHODA,M. & alii. On relationship between heat island and sky view factor in the cities of Tama River basin, Japan. Atmospheric Environment, 20B, 1986.
- YOSHINO,M. Development of urban climatology and problems today. Energy and buildings, v. 15,p. 1-10, 1990-1991.

