



Les échelles d'étude de l'îlot de chaleur urbain et ses relations avec la végétation et la géométrie de la ville (exemple de Paris)

Ariane Sakhy, Malika Madelin et Gérard Beltrando

Université Paris Diderot-Sorbonne Paris-Cité,
UMR 8586 du CNRS (PRODIG),
5 rue Thomas Mann, 75205 Paris Cedex13, France
ariane.sakhy@univ-paris-diderot.fr
malika.madelin@univ-paris-diderot.fr
beltrando@univ-paris-diderot.fr

MOTS-CLÉS

climatologie,
télédétection,
températures de surface,
îlot de chaleur urbain,
Système d'Information Géographique (SIG),
occupation du sol,
Paris

RESUMÉ

Les impacts de la vague de chaleur d'août 2003 ont été conséquents sur la surmortalité à Paris d'autant plus que cette vague de chaleur a été intensifiée par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Dans cette étude, la surveillance de l'ICU est faite par télédétection. Afin d'identifier l'îlot de chaleur urbain de surface (Surface Urban Heat Island, SUHI), les températures de surface ont été estimées à partir d'images satellites MODIS et Landsat à deux échelles d'étude (respectivement 30 et 1000 mètres). Un indice de végétation normalisé (NDVI) a été déterminé à partir d'une image MODIS et de la même image Landsat. L'emprise au sol des bâtiments et la part de ciel visible sont également calculés afin de montrer leur relation avec les températures de surface. L'intérêt de ce travail porte sur la comparaison des échelles d'étude de l'ICU dans les relations qui existent avec la présence de végétation et la morphométrie de la ville.

KEY WORDS

climatology,
remote sensing, land surface temperature,
urban heat island,
Geographic Information System (GIS), land use,
Paris

ABSTRACT

Different analysis scales of the urban heat island in Paris and its relationship with the vegetation and geometry of the city

The impacts of the 2003 heat wave on excess mortality were important in Paris. This heat wave has been intensified by the urban heat island. In this study, the monitoring of UHI was done by remote sensing. In the order to define SUHI in Paris and suburbs, the Land Surface Temperature was estimated with MODIS and Landsat satellite images at two scales (30 and 1000 meters). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated with an other MODIS satellite image and with the same Landsat satellite image. The density of constructed features and the sky view factor were calculated to explain the Land Surface Temperature. The aim of this study was to estimate the spatial extension of the urban heat island (UHI) and to show the relationships between UHI, land cover (vegetation) and urban geometry. The interest of this paper is to compare the two study scales of UHI.

1. Introduction

1.1. Approche bibliographique de l'îlot de chaleur urbain

Les éléments constitutifs de la ville sont très différents de ceux de la campagne : la végétation et l'humidité de surface sont en général moins importantes, les surfaces et les formes urbaines sont multiples et diversifiées. L'îlot de chaleur urbain (ICU) est la conséquence thermique de ces différences. Celui-ci peut être défini comme l'écart de températures (ΔT) entre le centre de la ville et la campagne environnante (Oke, 1987). Sa formation repose sur des conditions synoptiques particulières : un temps anticyclonique, une nébulosité et un vent faibles. Son extension spatiale résulte de la combinaison de plusieurs facteurs : la situation géographique de la ville, la forme de la ville (géométrie urbaine), sa structure (partitionnement entre surface minérale et végétale) et sa taille (superficie et population). L'ensemble de ces facteurs génère une modification des transferts de chaleur (Ringebach, 2004).

En ville, la rugosité des surfaces urbaines joue un rôle sur l'accumulation de la chaleur par le biais d'un piégeage du rayonnement dans « le canyon urbain ». Une importante quantité de chaleur va être stockée dans les constructions urbaines qui sont sujettes à une inertie thermique plus forte et plus lente que les espaces ruraux. Ce phénomène d'inertie est accentué par l'albédo de la surface qui est plus important en ville qu'à la campagne (Aida et Gotoh, 1982). Ajouté à cela, le flux de chaleur latente est plus faible en ville qu'à la campagne. En milieu rural, l'eau de pluie infiltrée dans le sol est évaporée. En ville, l'imperméabilité des surfaces favorise le ruissellement des eaux vers les réseaux souterrains d'évacuation, le flux de chaleur latente est donc diminué. En journée et en ville, ce déficit en eau pour le flux de chaleur latente associé à l'excédent du flux de chaleur sensible (transmise du sol à l'atmosphère) engendre un réchauffement de l'air urbain à partir du milieu de la journée. Cet air chaud urbain va générer des flux convectifs : l'air chaud de la ville va s'élever. Si le vent est relativement fort (> 3 m/s), cette couche d'air chaud est évacuée (panache urbain) vers la campagne ; mais si le vent est faible (< 3 m/s), des cellules convectives se forment (dôme urbain) dans la couche limite urbaine (Mestayer, 1998). Ce phénomène convectif favorise la stagnation d'un air chaud en ville.

À la campagne, à la tombée de la nuit, la chaleur est plus rapidement évacuée sous forme de rayonnement infrarouge et tellurique et de flux de chaleur latente alors que les surfaces urbaines plus chaudes, qui ont accumulé de la chaleur par le jeu du piégeage du rayonnement, vont mettre davantage de temps

à se refroidir (moins de flux de chaleur latente). Ce décalage dans le phénomène de refroidissement produit un écart de température entre la ville et la campagne dont l'expression est l'îlot de chaleur urbain. Ce phénomène devient donc nettement perceptible quelques heures après le coucher du soleil.

L'ICU peut être observé à différentes échelles. Les échelles qui sont utilisées pour les études d'aérodynamique urbaine (Najjar *et al.*, 2005) dans sa dimension verticale sont celle de la canopée urbaine et celle de la couche limite urbaine (Kastendeutch *et al.*, 2006). Au niveau de la surface, on distingue également plusieurs échelles d'études, celle de l'agglomération (plusieurs dizaines de km²), celle du quartier (quelques km²) et celle de la rue (inférieure à 1 km). La surveillance de l'ICU au niveau de la surface peut être faite à partir d'images satellites par le biais de l'analyse des températures de surface (Dousset *et al.*, 2010). Cette étude a notamment mis en avant qu'il existait une répartition spatiale proche entre les températures de surface et la surmortalité enregistrée à Paris en 2003. C'est dans cette continuité qu'il s'agit dans cette étude de distinguer les relations qui existent entre l'ICU et les éléments constitutifs de la ville d'une part, et à terme d'autre part entre les températures et la surmortalité enregistrée à Paris.

1.2. Le contexte de l'étude : la vague de chaleur du mois d'août 2003 à Paris

En août 2003, la vague de chaleur accompagnée d'un temps anticyclonique stable a favorisé la formation de l'ICU avec des températures nocturnes élevées. L'origine météorologique de cette vague de chaleur est l'installation d'une puissante dorsale d'altitude entre le sud de la Péninsule Ibérique et les Pays Bas avec un renforcement de la pression sur la France. Cette situation a permis l'arrivée d'une masse d'air chaud et sec en provenance du Nord-Ouest de l'Afrique. En surface, les hautes pressions ont empêché le passage de perturbations d'ouest et le temps a donc été très chaud et sec. Cette vague de chaleur du mois d'août 2003 a été particulièrement importante en France par sa durée et son intensité (Neu et Thalmann, 2005). Elle a concerné les principales villes de métropole et a été accompagnée d'une surmortalité très importante (INVS, 2003). Une autre étude a montré que plus le nombre de jours cumulés avec une température supérieure à 35°C a été élevé, plus l'augmentation du nombre de décès a été forte (Hémon et Jouglu, 2004). Comparativement aux étés précédents (moyenne de 2000, 2001 et 2002), à la date du 20 août 2003, il a été enregistré en France près de 15 000 décès supplémentaires par rapport aux années précédentes, représentant une augmentation d'environ 60% par rapport à la mortalité attendue (Cadot et Spira, 2006). Les températures minimales

nocturnes sont restées très élevées, supérieures à 22°C (données de Météo-France pour la station Paris

Montsouris) et ont dépassé les 25°C pour les nuits du 12 et 13 août 2003 par exemple (figure 1).

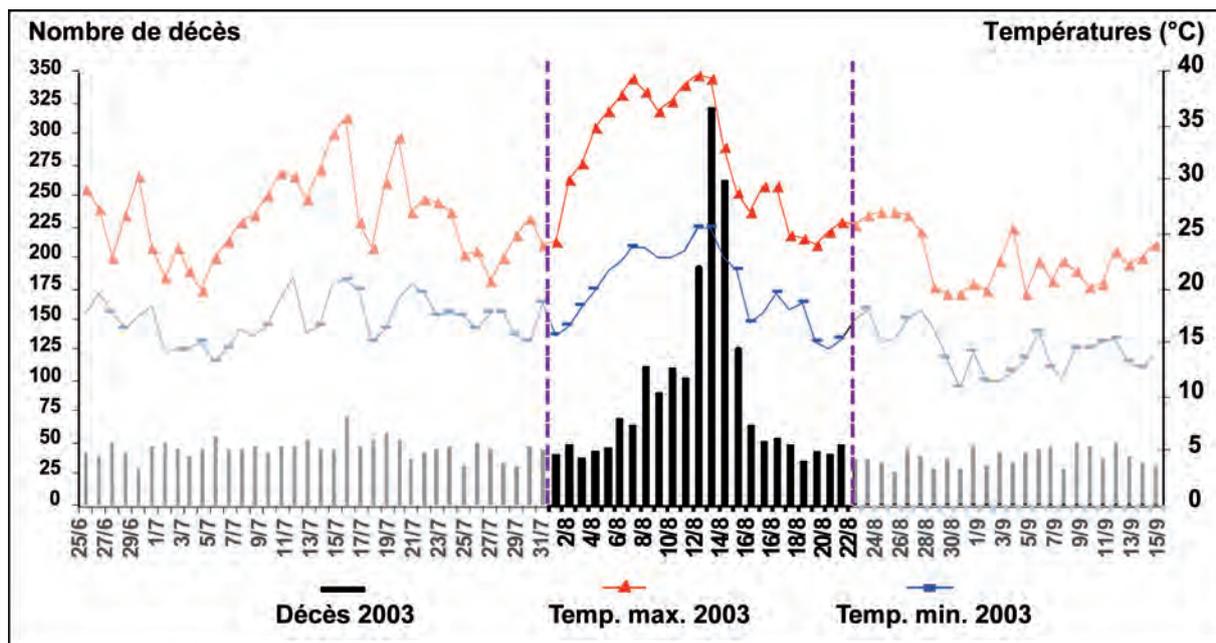


Figure 1. Températures minimales et maximales de l'été 2003 enregistrées à la station Paris Montsouris (zoom du 1^{er} au 22 août) et nombre de décès à Paris (adapté de l'INVS 2003)

Dans cette étude, l'ICU est analysé dans sa composante horizontale par la prise en compte des températures de surface extraites à partir des images satellites à deux échelles spatiales (celles des images satellites MODIS et Landsat) pour la région parisienne durant la vague de chaleur de 2003. L'intérêt de l'utilisation des images satellites est la possibilité d'une couverture spatiale sur l'ensemble la ville. Ici, la dimension verticale de l'atmosphère n'est pas directement abordée en raison des données utilisées. Puis dans une seconde étape, il s'agira d'évaluer le lien qui existe entre les températures de surface, l'indice de végétation normalisé (NDVI) et la géométrie de la ville (Gallo *et al.*, 1994). Dans cette optique, des maillages de 30 et 1000 mètres sont construits afin de calculer, à ces échelles, le NDVI (Rinner et Hussain, 2011), l'emprise au sol des bâtiments et la part de ciel visible - plus connue sous l'expression anglophone de *Sky View Factor*, SVF (Watson et Johnson, 1987).

2. Les données

2.1. Les données de télédétection

Pour étudier les températures de surface, des images satellites MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) de la première quinzaine d'août 2003 et une image satellite multi-spectrale Landsat du 09.08.2003 sont utilisées.

Les images quotidiennes MODIS Terra de type MODIS11A1 permettent d'évaluer l'évolution spatiale de l'ICU sur la période du 01.08.2003 au 13.08.2003 à partir de la température de surface pris de jour et de nuit. L'heure de passage du satellite en journée est vers 11h (TU) et pour la nuit vers 22h (TU).

Une image MODIS de type MOD13A2 datant du 13.08.2003 informe sur le NDVI. Elle correspond à la moyenne des valeurs du NDVI sur quinze jours (données bimensuelles). La résolution des produits MODIS est de 1 kilomètre.

Une image multi-spectrale Landsat TM5 du 09.08.2003 est utilisée pour calculer des températures de surface ainsi qu'un NDVI, avec une résolution de 30 mètres, soit une résolution beaucoup plus fine que celle des images MODIS. Les canaux exploités pour l'estimation du NDVI sont les bandes 3 et 4 correspondant au rouge et au proche infra-rouge. Pour ce qui est de la température de surface, nous avons travaillé à partir de la bande 6 qui correspond à l'infra-rouge thermique. L'heure de passage du satellite est vers 10h30 (TU).

2.2. Les données topographiques et altimétriques

La base de données BD Topo de l'Institut Géographique National (IGN) renseigne sur la géométrie de la ville de Paris à une résolution décimétrique. Cette

base de données fournie par l'IGN (version 2002) est en format vectoriel. Elle est exploitée ici pour l'étude des espaces bâtis : elle délivre de l'information sur les surfaces et les hauteurs des bâtiments.

La BD Alti de Paris (données de l'IGN, 2002) est fournie sous forme d'un modèle numérique de terrain (MNT). Cette base de données informe sur la topographie de la ville de Paris et de ses alentours (première et seconde ceinture urbaine) à une résolution horizontale de 25 mètres et à une résolution verticale d'environ 2 mètres.

3. La méthodologie

La première opération consiste à référencer l'ensemble des données dans un même système de projection, le système choisi est celui des données de l'IGN : Lambert II Etendu.

3.1. L'analyse des produits MODIS

Les images MODIS utilisées ici sont des produits finis : l'extraction des températures de surface (Land Surface Temperature, LST) et du NDVI se fait par intégration dans un SIG. Les images relatives aux températures de surface sont converties en degré Celsius. Elles permettent d'observer pour plusieurs dates l'évolution des températures de surface. L'image satellite du NDVI permet d'examiner la présence de végétation à la résolution de l'image (1 km).

3.2. Le traitement de l'image Landsat du 09 août 2003

3.2.1. Les températures de surface

Les températures de surface sont obtenues après le traitement de la bande 6 de l'image. L'image a initialement une résolution de 120 mètres, le produit est fourni après rééchantillonnage à 30 mètres de réso-

lution. La bande 6 de l'image correspond de la bande spectrale de l'infra-rouge thermique (10.4 – 12.5 μm). Les méthodes de transformation des valeurs spectrales en températures de surface sont complexes. Elles font appel à des différents algorithmes à partir desquels les valeurs d'émissivité de surface dans l'intervalle du thermique sont transformées en températures de surface et exprimées en degré Celsius (Rubio, 1998 cité par Colin, 2006).

3.2.2. L'indice de végétation normalisé

Afin d'estimer la présence de végétation, nous avons calculé le NDVI qui renseigne sur l'activité chlorophyllienne. Le calcul du NDVI se base sur les interactions entre la végétation et l'énergie électromagnétique solaire dans les longueurs d'onde rouge (0.63 - 0.69 μm) et proche infra-rouge (0.76-0.90 μm). Il est obtenu par comparaison entre la mesure de la réflexion infra-rouge et celle de la réflexion dans le rouge. Les canaux 3 et 4 représentant respectivement le rouge (R) et le proche infra-rouge (PIR) permettent de calculer le NDVI par le biais de la formule suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{PIR}-\text{R})/(\text{PIR}+\text{R})$$

3.3. L'analyse de la géométrie de la ville

3.3.1. L'emprise au sol des bâtiments

À partir de la base de donnée de l'IGN, nous avons calculé une emprise au sol des bâtiments par carroyage. Des grilles de tailles différentes couvrant la ville de Paris (ici seules celles de 30 mètres et 1000 mètres sont utilisées pour correspondre aux résolutions des images satellites) ont été construites dans le but de calculer un pourcentage d'emprise au sol des bâtiments par cellule de la grille. Ce calcul réalisé à partir d'un SIG consiste en un ratio entre la surface totale des bâtiments occupant la maille et l'aire totale de la maille. L'exemple de la figure 2 montre que la maille désignée est occupée à 16% par des bâtiments.

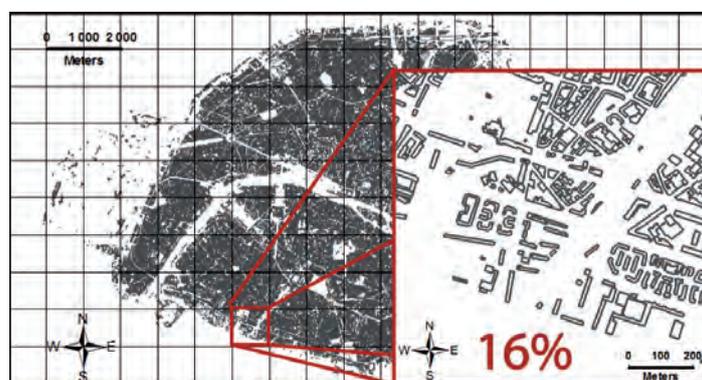


Figure 2. Exemple de résultat du calcul du pourcentage d'emprise au sol des bâtiments (exemple d'une maille de 1 000 mètres), données IGN 2002

3.3.2. La part de ciel visible

La part de ciel visible (ou Sky View Factor SVF) se définit comme l'ouverture du ciel à partir du sol. Elle nous permet d'avoir une estimation de la part de rayonnement qui entre dans la rue. Il existe plusieurs manières de calculer le SVF (graphiques ou mathématiques) et à partir de multiples supports (photographies aériennes, images satellites haute résolution, base de données spatiales). Selon les méthodes et les supports (Grimmond *et al.*, 2001), il sera soit calculé à partir de l'appareil de mesure (ex : appareil photographique fish-eyes), soit à partir des informations issues de la base de données utilisées (ici la BD Topo) en prenant alors en considération la hauteur des bâtiments et la largeur de la chaussée.

Le SVF est calculé en plusieurs étapes. La première étape consiste en l'intégration de la BD Alti et de la BD Topo dans d'un SIG (SAGA GIS). Les données extraites de la BD Alti permettent d'établir une altitude moyenne par maille. Puis, on calcule à la résolution la plus fine possible permise par le logiciel (ici, 2 mètres de résolution) une valeur moyenne de altitude et une hauteur moyenne des bâtiments par cellule. On procède à la somme des données relatives à l'altitude avec celles concernant la hauteur des bâtiments pour obtenir une valeur absolue de la hauteur des bâtiments. Dans une seconde étape, il s'agit de procéder au réé-

chantillonnage afin de calculer une valeur moyenne du SVF selon les grilles de résolution des images satellites, c'est-à-dire 30 et 1 000 mètres.

Nous obtenons ainsi quatre variables : les températures de surface, le NDVI, l'emprise au sol des bâtiments et la part de ciel visible (SVF). Il s'agira de calculer le coefficient de corrélation de Bravais Pearson, permettant d'obtenir le degré de dépendance qui existe entre la variable Températures de surface et chacune des trois variables explicatives (NDVI, emprise au sol des bâtiments et SVF). Nous effectuerons également le test de significativité de Bravais-Pearson afin d'évaluer la fiabilité des hypothèses posées.

4. Les résultats

4.1. L'installation de l'îlot de chaleur urbain

Les images MODIS de la température de surface de la première quinzaine d'août 2003 montrent d'une part, l'installation progressive de la masse d'air chaud et d'autre part, une intensification de l'ICU avec de conséquents écarts au niveau des températures nocturnes (22h, TU) de surface entre le centre de Paris et la périphérie (figure 3).

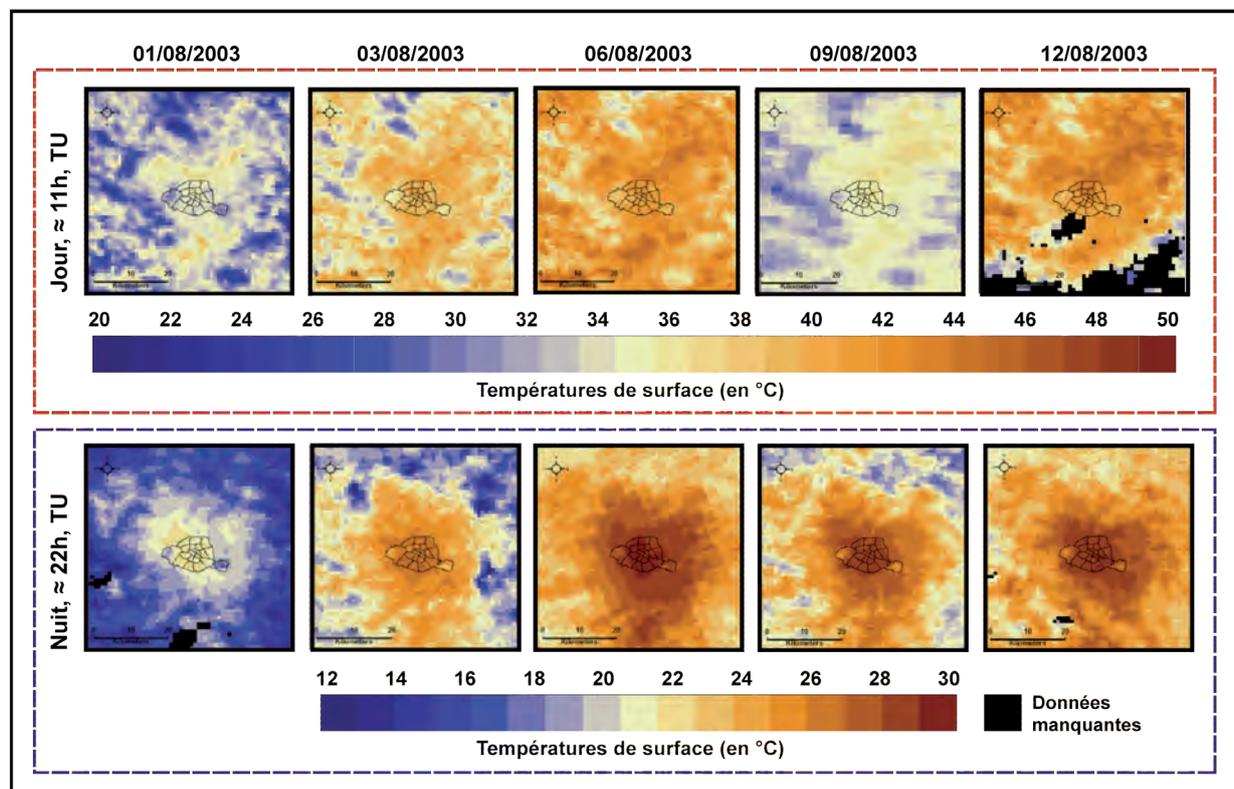


Figure 3. Évolution spatiale de l'ICU entre le 1er et le 13 août 2003, Températures de surface diurnes (≈11h, TU) et nocturnes (≈22h, TU) exprimées en °C, données MODIS

Les températures de surfaces sont estimées à deux échelles : 30 et 1000 mètres de résolution (figure 4). Le résultat obtenu est une température moyenne par maille qui constitue la variable indépendante et qui est utilisée pour le calcul de relation avec le NDVI, le SVF et l'emprise au sol des bâtiments.

4.2. Relation des températures de surface avec la végétation et la morphométrie urbaine

Les relations entre les températures de surface, le NDVI et les indicateurs de la géométrie de la ville sont mises en évidence dans les figures 4 et 5 et dans le tableau 1.

4.2.1. À la résolution de Landsat

Le coefficient de corrélation linéaire calculé entre les températures diurnes de surface de Landsat et le NDVI (-0,51) indique une relation négative et significative ($P < 0,001$). On observe une augmentation des valeurs du NDVI et une baisse de températures de surface. À ce titre, les figures 4 et 5 montrent que les zones de végétation importantes en termes de couverture (fort NDVI) sur les cartes correspondent aux endroits relativement frais à Paris au niveau des températures de surface : les bois de Vincennes et de Boulogne aux extrémités est et ouest de la ville, les Buttes Chaumont au nord est, les cimetières et les parcs. La relation tend à montrer que la présence de la végétation pourrait expliquer à 26% une diminution des températures de surface avec un risque d'erreur inférieur à un pour mille.

Le coefficient de corrélation entre températures de surface et SVF est de -0,36, celui avec l'emprise au sol des bâtiments est de 0,33. Les deux relations sont significatives ($P < 0,001$). La première (températures de surface / SVF) est négative et indique une baisse des températures de surface avec une augmentation de la visibilité du ciel. La seconde est positive et semble montrer que plus un espace est occupé par des bâtiments, plus les températures de surface ont tendance à être élevées. Ces relations, tout en restant significatives, sont moins fortes compte tenu des valeurs relativement faibles des coefficients de corrélations. Ces résultats tendent à montrer que la forme des structures urbaines semble avoir une influence sur les températures de surface. Une interprétation plausible est que l'emprise au sol des bâtiments et le SVF favorisent l'emmagasinement de la chaleur, ce qui corrobore les résultats de Oke (1987).

4.2.2. À la résolution de MODIS

Les cartes de températures de surface à la résolution de MODIS (figure 4, b et c) dévoilent des relations différentes selon l'heure de la journée. De manière

générale, les coefficients de corrélation d'une part entre les températures de surface et le NDVI et d'autre part entre les températures de surface et les indicateurs géométriques sont plus importants de nuit que de jour (tableau 1). Nous avons donc choisi de représenter les nuages de points relatifs à chaque variable corrélée aux températures nocturnes de surface (figure 5). La forme des nuages de points mettant en relation les températures nocturnes de surface MODIS avec les variables géométriques et le NDVI est plutôt dispersée et semble montrer des relations qui ne sont pas parfaitement linéaires, néanmoins les tendances (négative ou positive) sont mises en évidence.

De jour comme de nuit, le coefficient de corrélation linéaire calculé entre les températures diurnes de surface de MODIS et le NDVI (-0,49) indique une relation négative et significative ($P < 0,001$). En comparant les cartes des températures à la résolution de MODIS, nous constatons que la végétation, indépendamment de l'heure de la journée, a une relation inverse avec les températures de surface : lorsque le NDVI augmente, les températures de surface semblent diminuer (figure 4 et 5). Pour cette variable et à cette résolution, l'heure de la journée ne paraît pas importante. Cette relation suggère que la présence de végétation pourrait expliquer à 24% une baisse des températures de surface avec un risque d'erreur très faible ($P < 0,001$).

Pour ce qui est de l'emprise moyenne des bâtiments au sol, son influence sur les températures de surface MODIS est davantage mise en évidence sur les images nocturnes que diurnes avec un coefficient de corrélation respectivement de 0,44 et 0,30 : pour cette variable, l'heure de la journée est importante dans la corrélation. La relation est significativement positive, ce qui tend à montrer qu'une augmentation de l'occupation de la maille par des bâtiments coïncide avec une augmentation des températures de surface élevées. La significativité des relations diffère selon l'heure de la journée : elles sont plus significatives la nuit ($P < 0,001$) que le jour ($P < 0,01$).

De la même manière, le lien entre le SVF et les températures de surface est davantage marqué avec les températures nocturnes (-0,46 de nuit, -0,31 de jour). Les seuils de significativité des relations sont identiques à la variable précédente. On observe ici une diminution des températures de surface et une augmentation de la part de ciel visible. Il en ressort ainsi que la relation avec la part de ciel visible et les températures de surface semble être plus forte et plus significative la nuit : la visibilité du ciel semblerait expliquer à 20% une baisse des températures nocturnes de surface avec un risque d'erreur inférieur à un pour mille. La part de ciel visible est un indicateur de la quantité de rayonnement que peut recevoir une rue, mais également de sa possibilité à être ventilée : plus le SVF est fort, plus la rue dispose d'un potentiel pour évacuer la chaleur.

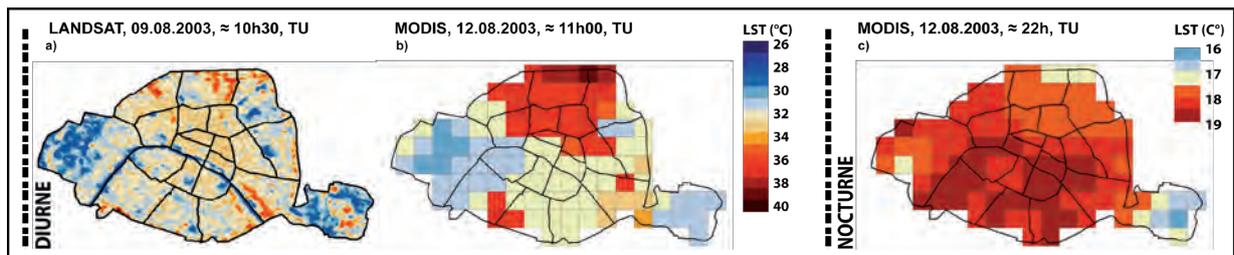


Figure 4. Températures de surface (LST) aux résolutions de Landsat (30 m) et de MODIS (1 000 m)

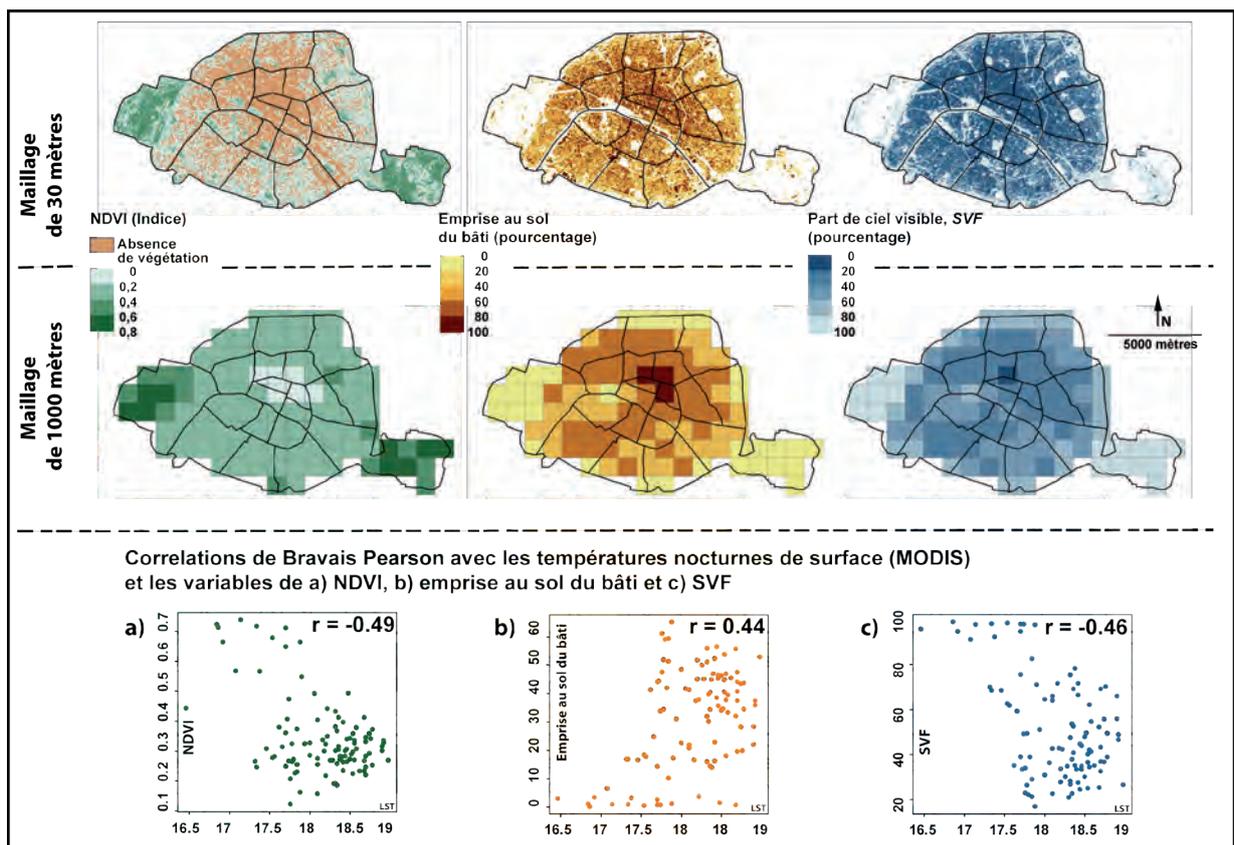


Figure 5. Cartes de NDVI, de l’emprise au sol des bâtiments et du SVF à la résolution de Landsat (en haut) et à la résolution de MODIS (au centre). Graphiques des relations entre LST (Land Surface Temperature) nocturnes et respectivement, de gauche à droite, a) le NDVI, b) l’emprise au sol des bâtiments et c) le SVF (en bas)

r	Landsat	MODIS (jour)	MODIS (nuit)
Part de l’emprise au sol des bâtiments	0,33**	0,30*	0,44**
Indice de végétation normalisée (NDVI)	-0,51**	-0,49**	-0,49**
Part du ciel visible (Sky View Factor, SVF)	-0,36**	-0,31*	-0,46**

Tableau 1. Coefficients de corrélation de Bravais Pearson entre les températures de surface (Landsat, MODIS) et des variables de morphométrie et de couverture végétale. Test de significativité : ** risque < 0,001, * risque < 0.01

5. Discussion

Dans cette étude, deux types de résultats ont été mis en évidence : les uns portent sur la relation spatiale entre la chaleur, la végétation et la géométrie de la ville et les autres sont relatifs aux aspects diachroniques de cette relation.

La chaleur à Paris a été défini par des températures de surface, une des limites de ce travail est intrinsèque aux données utilisées. En effet, ces températures de surface ne sont pas complètement représentatives de l'air, mais elles présentent l'avantage de couvrir l'ensemble de la ville de Paris à deux résolutions différentes.

Au niveau spatial, les parcs et bois urbains constituent des zones de fraîcheur dans la ville et le passage d'une résolution de 1 km à une résolution de 30 m permet de mieux identifier ces zones. Cette étude a réaffirmé l'hypothèse d'un refroidissement des surfaces occupées par les parcs urbains déjà montré par Dousset et Gourmelon (2003). Néanmoins, cette relation a pu être en partie affaiblie par la résolution spatiale des images et notamment à la résolution de MODIS. En effet, une résolution de 1 km permet de détecter la végétation d'une manière relativement approximative : en effet il s'agit d'une moyenne de la couverture végétale sur une maille de 1 km. En ce qui concerne la relation des températures de surface aux variables géométriques (emprise au sol des bâtiments et SVF), les limites rencontrées sont similaires. L'image Landsat présente l'avantage de la résolution spatiale (Sobrino *et al.*, 2011), mais l'inconvénient d'être diurne.

L'importance de l'heure de la journée a également été soulignée : l'intensité de la relation entre les indicateurs de la géométrie urbaine et l'ICU est davantage liée à l'heure de la journée qu'à l'échelle spatiale. Ceci peut s'expliquer en partie par le fait que la distribution des températures de surface de jour (vers 10h30 et 11h, TU) ne révèle pas un emmagasinement de la chaleur lié à la géométrie de la ville, mais davantage

une capacité d'absorption des matériaux. La relation établie entre températures nocturnes de surface et géométrie urbaine est plus importante comparativement aux températures diurnes. Néanmoins si l'échelle temporelle apparaît comme essentielle dans cette étude, l'échelle spatiale de la relation reste déterminante car elle donne un sens à la relation : une moyenne établie à une résolution de 1 km ne constitue qu'une valeur indicative d'une variable.

6. Conclusion

L'estimation des températures de surface par images satellites a permis de déterminer la variabilité spatiale de l'îlot de chaleur urbain à deux niveaux de résolution spatiale pour plusieurs dates durant la vague de chaleur du mois d'août 2003. Une prise en compte de l'ICU à deux échelles, celle du « canyon » (30 m) et celle du « quartier » (1 km) est importante pour une caractérisation de la variabilité du phénomène d'ICU.

La relation inverse entre les températures de surface et la végétation a été mise en évidence avec une résolution ici de 30 et 1000 mètres. L'emprise au sol des bâtiments ainsi que la part de ciel visible présentent une relation relativement importante avec les températures nocturnes de surface. Le choix de l'échelle d'étude est fondamental pour une juste appréhension des phénomènes.

L'intérêt de cette étude a été de caractériser la variabilité spatiale de l'ICU, pendant la vague de chaleur du mois d'août 2003, dans ses relations avec la géométrie de la ville, mais également dans la perspective de pouvoir mieux appréhender une échelle d'étude permettant d'établir une relation avec des facteurs socio-économiques. L'objectif de ce travail, à terme, va être de comparer les données de température à des indices de surmortalité pour établir — sur une base spatialisée — les relations qui existent entre les vagues de chaleur et la mortalité humaine à l'échelle du quartier à Paris.

7. Références bibliographiques

- Aida M., Gotoh K., 1982, Urban albedo as a function of the urban structure – a two-dimensional numerical simulation (Part II), *Boundary-Layer Meteorology*, 23, 415-424.
- Cadot E., Spira A., 2006, Canicule et surmortalité à Paris en août 2003, Le poids des facteurs socio-économiques, *Espace, Populations et Sociétés*, 2-3, 239-249.
- Colin J., 2006, Apport de la télédétection optique à la définition d'indicateurs de performance pour l'utilisation de l'eau en agriculture, Thèse de doctorat, Université Strasbourg 1, Strasbourg.
- Dousset B., Gourmelon F., Laaidi K., Zeghnoun A., Giraudet E., Bretin P., Mauri E., Vandentorren S., 2010, Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area, *International Journal of Climatology*, 31, 313-323.
- Dousset B., Gourmelon F., 2003, Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and Landcover, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58, 1-2, 43-54.
- Gallo K.P., Tarpley J.D., McNab A.L., Karl T.R., 1994, Assessment of urban heat islands: a satellite perspective, *Atmospheric Research*, 37, 37-43.

- Grimmond C.S.B., Potter S.K., Zutter H.N., Souch C., 2001, Rapid methods to estimate Sky-View Factors applied to urban areas, *International Journal of Climatology*, 21, 903-913.
- Hémon D., Jouglà E., 2004, Surmortalité liée à la canicule d'août 2003, rapport INSERM (Institut National pour la Santé et la Recherche Médicale, Paris, 76 p.
- Kastendeuch P., Najjar G., Ringenbach N., 2006, Modélisation du bilan d'énergie et radiatif d'un canyon urbain à Strasbourg, *Climatologie*, 3, 25-42.
- Ledrans, M. Isnard H. (sous la coordination scientifique de), 2003, Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003, rapport d'étape de l'INVS (Institut National de Veille Sanitaire), Paris, 120 p.
- Mestayer P.G., 1998, Urban scale models, in Fenger J., Hertel O., Palmgren F. (eds), *Urban Air Pollution – European Aspects*, Kluwer Academic Publishers, 197-219.
- Najjar G., Kastendeuch P., Ringenbach N., Colin J., Stoll M.P., Nerry F., Bernard J., De Hatten A., Luhahe R., Viville D., 2005, Bilans radiatifs et d'énergie dans un canyon urbain, *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, 2, 41-54.
- Neu U., Thalmann E. (sous la coordination scientifique de), 2005, Canicule de l'été 2003, rapport de synthèse, Berne, 32 p.
- Oke T.R., 1987, *Boundary layer climates*, Methuen, New York, 435 p.
- Ringenbach N., 2004, Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg, Thèse de doctorat, Université Strasbourg 1, Strasbourg.
- Rinner C., Hussain M., 2011, Toronto's Urban Heat Island - Exploring the Relationship between Land Use and Surface Temperature, *Remote sensing*, 3, 1251-1265.
- Rubio E. M., 1998, Hacia la optimización de la medida de la emisividad y la temperatura en teledetección, PhD thesis, Universitat de Valencia, Valencia.
- Sobrino J.A., Oltra-Carrió R., Sòria G., Bianchi R., Paganini M., 2011, Impact of spatial resolution and satellite overpass time urban heat island effects, *Remote sensing of Environment*, 117, 50-56.
- Watson I.D., Johnson G.T., 1987, Graphical estimation of sky-view factors in urban environments, *International Journal of Climatology*, 7, 193-197.