



HAL
open science

Dynamique d'urbanisation et thermographies satellitaires en milieu méditerranéen

Nassima Hassani, Sébastien Lebaut, Gilles Drogue, Said Sghir

► **To cite this version:**

Nassima Hassani, Sébastien Lebaut, Gilles Drogue, Said Sghir. Dynamique d'urbanisation et thermographies satellitaires en milieu méditerranéen : le cas du Grand Casablanca (Maroc). Bulletin de la Société Géographique de Liège, 2021, 77 (2), pp.5-22. 10.25518/0770-7576.6449 . hal-03207849v2

HAL Id: hal-03207849

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03207849v2>

Submitted on 14 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

DYNAMIQUE D'URBANISATION ET THERMOGRAPHIES SATELLITAIRES EN MILIEU MÉDITERRANÉEN : LE CAS DU GRAND CASABLANCA (MAROC)

Nassima HASSANI, Sébastien LEBAUT, Gilles DROGUE, Said SGHIR

Résumé

L'étude diachronique des températures de surface (Ts) prises pendant la saison chaude par situation anticyclonique radiative (temps clair et calme) est réalisée dans l'aire métropolitaine de Casablanca à l'aide d'une série d'images infrarouges thermiques *Landsat* multi-dates sur la période 1984-2019. Les thermographies obtenues sont alors analysées pour évaluer les gradients thermiques de jour comme de nuit au sein de ce territoire côtier densément peuplé. Les résultats obtenus montrent l'existence en fin de matinée, d'îlots de fraîcheur urbains au niveau du sol (IFUs) couvrant les villes de Casablanca et de Mohammedia. La nuit, ces IFUs se muent en îlots de chaleur urbains au niveau du sol (ICUs), les Ts étant alors plus faibles dans l'intérieur des terres par rapport à celles de la conurbation littorale. Par ailleurs, sur la période 1984-2019, une bonne concordance entre l'évolution spatio-temporelle des surfaces chaudes et celle des espaces urbanisés est établie en journée.

Mots-clés

température de surface, dynamique d'urbanisation, images *Landsat*, Grand Casablanca, Maroc

Abstract

The diachronic study of the surface temperatures (Ts) taken during the warm season in anticyclonic radiative weather is carried out in the Casablanca metropolitan area using a series of infrared thermal multi-dates Landsat images over the 1984-2019 period. The thermographs obtained are then analyzed to assess the day and night thermal gradients within this coastal and densely populated area. The results obtained show the existence, at the end of the morning, of surface urban cool islands (UCIs) covering the cities of Casablanca and Mohammedia. At night, this UCIs turns into surface urban heat island (UHIs), the Ts being lower inland than those in the coastal conurbation. Moreover, over the 1984-2019 period, a good concordance between the spatio-temporal evolution of warm surfaces and that of urbanized spaces is established during the day.

Keywords

land surface temperature, urbanization dynamics, Landsat images, Greater Casablanca, Morocco

INTRODUCTION

Le processus d'urbanisation, qui se traduit par la conversion d'espaces naturels en parois horizontales et verticales ainsi qu'en surfaces rugueuses et imperméables, est à l'origine d'une mosaïque de micro-climats. Cette diversité climatique du milieu urbain se manifeste surtout par temps calme et fortement radiatif. Du point de vue de la température de surface (Ts), l'aire urbaine se présente alors comme un territoire archipel où se côtoient îlots de chaleur et îlots de fraîcheur (au niveau du sol, de la couche de canopée urbaine et de la couche-limite atmosphérique) selon le moment de la journée ou de la nuit, la répartition des zones ombrées et ensoleillées, la présence ou non de végétation ou encore selon les écoulements d'air liés aux gradients thermiques (Briche *et al.*, 2017). Outre les contrastes de tem-

pérature existant dans le tissu urbain, des écarts de température importants s'observent également entre les centres urbains et leur environnement rural, les plus grands écarts étant généralement observés, pour la température de l'air, après le coucher du soleil et pendant la nuit (Roth *et al.*, 1989).

Dans de nombreuses régions de la rive sud du bassin méditerranéen, une influence plus ou moins marquée du Sahara et de l'aridité se font sentir. Or, dans les environnements semi-arides, les conditions climatiques et les modifications de l'occupation du sol causées par les activités humaines (présence de sols nus et asséchés) peuvent paradoxalement rendre l'espace urbain globalement plus frais que le milieu rural à la surface du sol, en particulier pendant la saison chaude et sèche. Les auteurs ayant travaillé sur le sujet qualifient ce phénomène d'Îlot de Fraîcheur Ur-

bain (IFU) ou *Urban Cool Island* (voir par exemple Lazzarini *et al.*, 2013) et le caractérise généralement en températures de surface terrestre (*Land Surface Temperature* ou LST en anglais).

Notre étude, centrée sur le Grand Casablanca au Maroc, cherche précisément à étudier les interactions pouvant exister entre la variabilité des températures de surface (T_s) prises pendant la saison chaude et sèche et la dynamique d'urbanisation de cette aire métropolitaine depuis le début des années 1980. Notre objectif est de télédéterminer l'impact des mutations urbaines (étalement urbain, types d'habitat, projet de réaménagement) sur les îlots de chaleur au niveau du sol, par situation anticyclonique radiative (temps clair et calme), de manière à évaluer la progression des espaces à forte contrainte thermique et leur dynamique spatiale sur un cycle journalier. Nous nous appuyons pour cela sur les données thermiques infrarouges issues des images *Landsat 5 TM* et *8 OLI/TIRS* disponibles entre 1984 et 2019.

I. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

A. Principaux traits géographiques et climatiques

La métropole du Grand Casablanca est située dans le centre-ouest du Maroc sur la côte atlantique (latitude $33^{\circ} 35' 17''$ N, longitude $-7^{\circ} 36' 40''$ O). Formée par les villes de Casablanca et Mohammedia et les deux provinces de Nouaceur et Médiouna, elle constitue la plus grande métropole du territoire marocain et s'étend sur environ 50 km de littoral au sein d'une conurbation atlantique allant de El Jadida au sud à Kenitra au nord (Troin, 2011). La métropole du Grand Casablanca est la capitale économique du Maroc, avec une population estimée à 4,27 millions d'habitants (HCP, 2014) pour une superficie de 1 227 km² (Figure 1). Elle est l'un des principaux pôles d'activité agricole du pays du fait de sa situation dans la plaine de la Chaouia, véritable « grenier à blé » du Maroc (Asslouj *et al.*, 2007). Le Conseil Général du Développement Agricole (2009) classe le territoire du Grand Casablanca dans l'agro-système de type *bour favorable des plaines et plateaux*.

Sur le plan climatique, le territoire du Grand Casablanca se caractérise par un climat de type méditerranéen de façade océanique, de notation Csa selon la classification de Köppen-Geiger (Peel *et al.*, 2007). À l'échelle régionale, son climat est contrasté (Figure 2) : dans sa partie nord, il est

influencé par les courants marins, les étés sont chauds et secs, les hivers doux et humides. La brise terre-mer, phénomène de beau temps, est fréquente l'été. Dans la partie sud du territoire, le climat est de type semi-aride inférieur avec une influence saharienne (Sebbar *et al.*, 2012). Ainsi, la pluviométrie est décroissante du nord au sud, à mesure que l'aridité augmente (Figure 2).

La température annuelle moyenne s'élève à $17,8^{\circ}\text{C}$ et le total pluviométrique annuel moyen est de l'ordre de 430 mm. Au mois d'août, la température moyenne est de $23,3^{\circ}\text{C}$, ce qui en fait le mois le plus chaud de l'année. À l'opposé, le mois de janvier présente une température moyenne de $12,4^{\circ}\text{C}$, ce qui en fait le mois le plus frais de l'année.

B. Dynamique d'urbanisation depuis un siècle

Historiquement, le noyau urbain du Grand Casablanca se situe dans l'enceinte de la Médina. À partir de la période du protectorat français (1912-1956), la Médina côtoie des quartiers européens créés durant cette période. Au-delà de leurs différences architecturales avec la Médina, ceux-ci traduisent une rupture brutale, à la fois géographique et spatiale (Gadal, 2005). Dans ce contexte, Casablanca a été un foyer d'immigration intense composée de bourgeois marocains, d'hommes d'affaires, de colons européens et de paysans. En plus de créer une dichotomie entre ville ancienne et quartiers européens, l'immigration a induit une explosion démographique qui s'est accompagnée d'une pénurie de logements. Cette pénurie a provoqué l'extension anarchique des terrains bâtis au détriment des espaces périphériques agricoles et l'apparition de nouveaux quartiers d'habitat informel et de bidonvilles. Après l'indépendance, les bidonvilles ont pris l'ascendant dans les parties est et sud de la ville (lieu de concentration de la population rurale) et n'ont fait que multiplier les processus de fragmentation et de ségrégation socio-spatiale (Gadal, 2005 ; Hassani, 2017).

Pendant les années 1980, afin de résoudre le problème des bidonvilles à Casablanca, les collectivités territoriales ont mis en place les premiers grands projets destinés à lutter contre l'habitat informel et à résoudre la crise du logement. Ceux-ci ont cependant échoué à enrayer le développement urbain anarchique vers le nord-est, le sud et le sud-ouest. Grâce à une classification supervisée des images *Landsat 5*

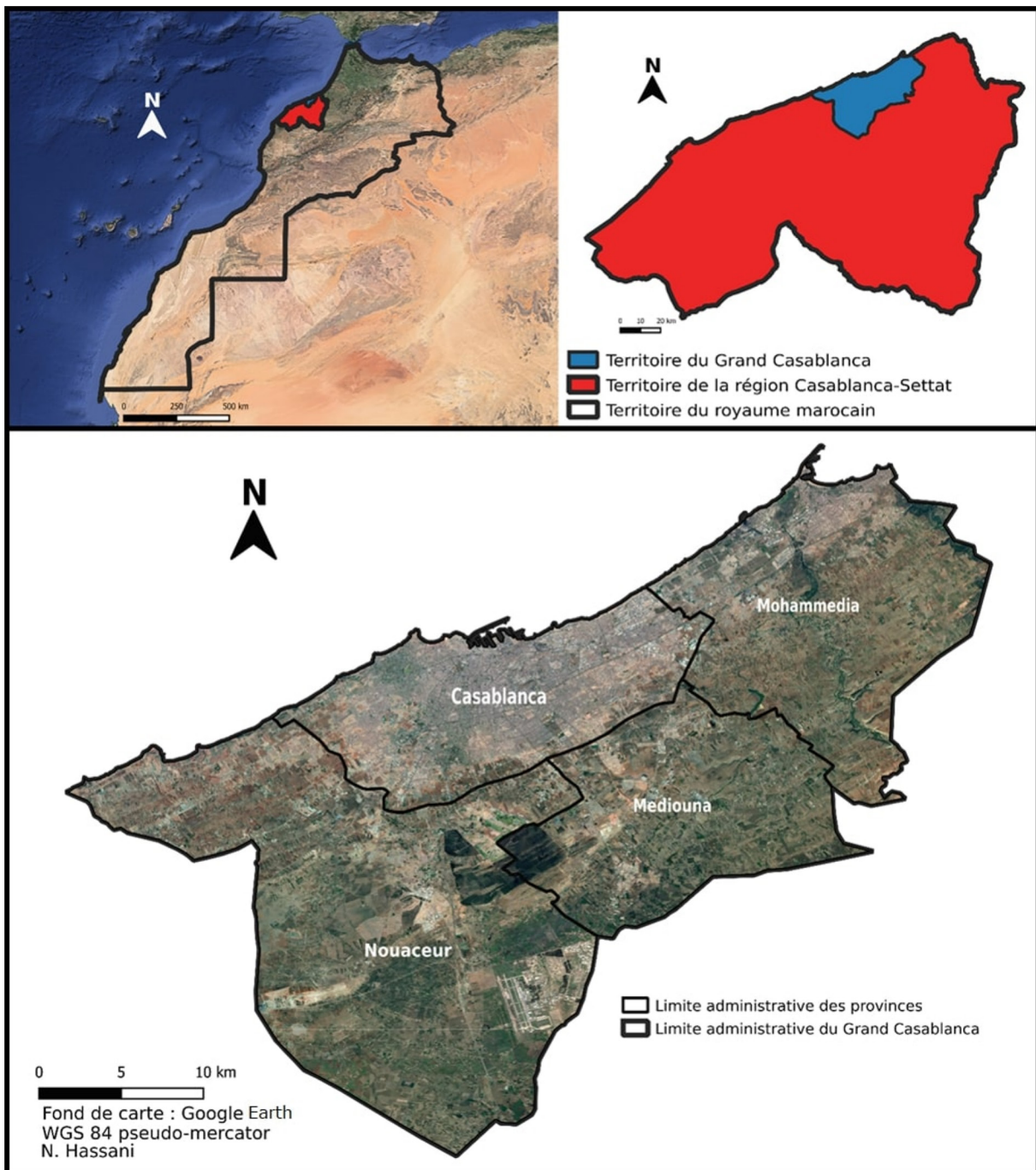


Figure 1. Cartes du Grand Casablanca à l'échelle nationale et à l'échelle régionale (découpage en provinces)

TM et 8 OLI disponibles en 1984, 1995, 2011 et 2019, nous avons réussi à produire une cartographie diachronique du tissu urbain du Grand Casablanca (Figure 3). Cette cartographie a été validée d'une part, par comparaison aux images aériennes de Google satellite, et d'autre part, par comparaison et vérification des pixels des cartes de classification avec les pixels des images brutes (Hassani, 2017).

La Figure 3 montre qu'en 1984, les zones bâties étaient principalement concentrées dans les provinces de Casablanca et de Mohammédia (voir la

Figure 1 pour leur localisation). Un peu plus de dix ans après, en 1995, on constate que les zones urbaines périphériques poursuivent leur étalement. Celui-ci est fortement lié à l'exode rural, à la croissance démographique, et à l'arrivée de réfugiés (Bahi *et al.*, 2016 ; Nassori, 2017). En outre, l'extension du port de Casablanca a eu lieu pendant cette période. De nouveaux pôles urbains secondaires tels que Tit Mellil, Lahraouiyine, Tamris et Nouvelle Arrhma (commune de Dar Bouazza) sont également apparus. Ce sont des moteurs de l'expansion urbaine de la métropole. Ces pôles résultent du processus de

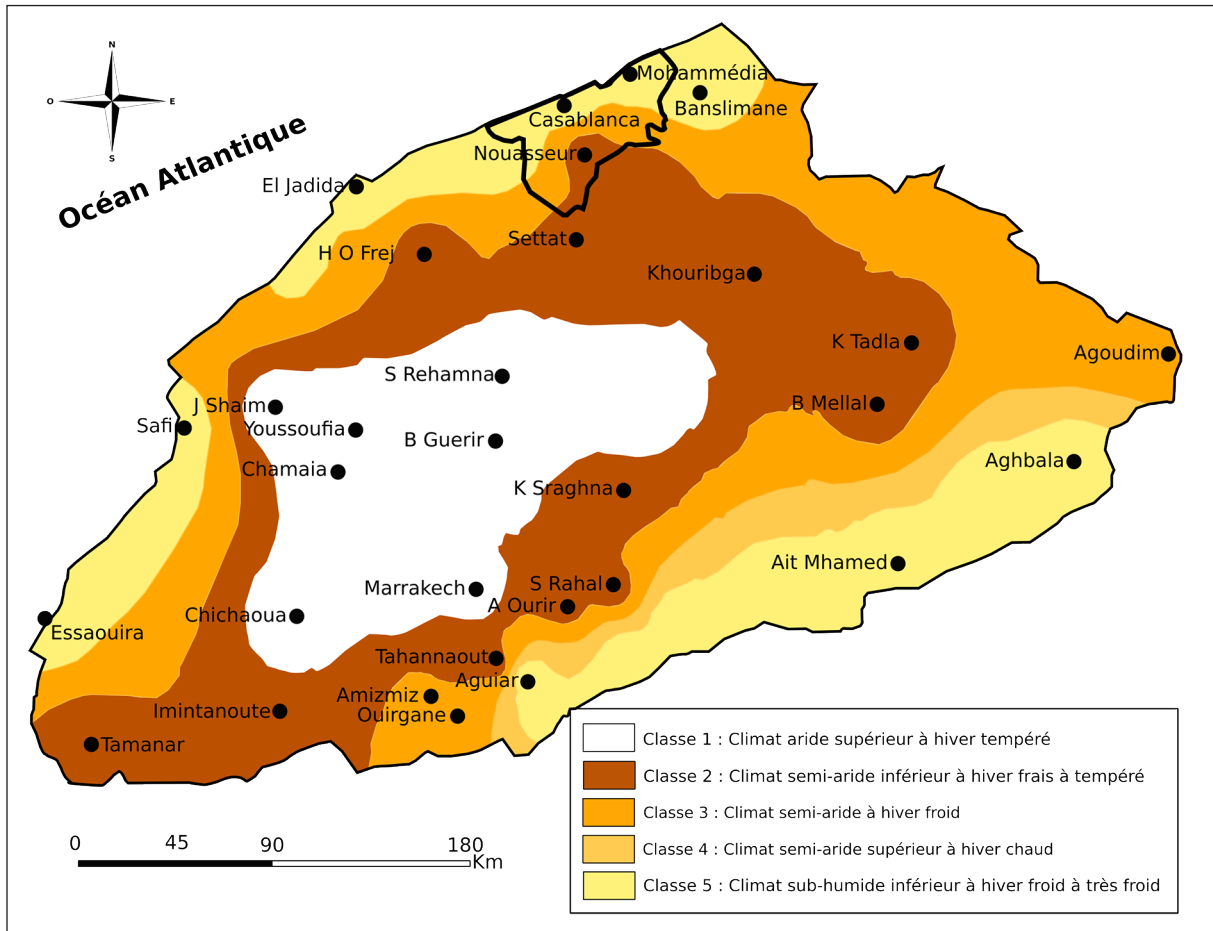


Figure 2. Climats de la partie centrale du Maroc (d'après Sebbar et *al.*, 2012) et délimitation du Grand Casablanca (trait noir épais)

déconcentration de l'habitat et des populations de la ville de Casablanca qui se manifeste par une dynamique de relocalisation des populations du centre de l'agglomération vers sa périphérie immédiate. Ensuite, entre 1995 et 2011, on constate un réaménagement au niveau de certains espaces occupés par un habitat insalubre après le lancement en 1994 par le Roi Hassan II du programme national des 200 000 logements sociaux construits pour favoriser l'accès des ménages à faibles revenus à la propriété privée. Ce programme est complété en 2004 par le programme « ville sans bidonvilles » destiné à réguler ces espaces urbains et à les intégrer dans une société urbaine moderne. Ainsi, les grands bidonvilles comme ceux de Hay Mohammadi, Hay Hassani, Ben M'sik sont rasés et remplacés par des cités et des lotissements. Enfin, en 2019, les zones et les pôles urbains périphériques poursuivent toujours leur étalement et leur densification (Figure 3).

À partir des images satellitales classifiées, nous avons déterminé l'évolution du taux d'urbani-

sation du Grand Casablanca au cours des trois dernières décennies (Figure 4). Il s'élevait à moins de 15 % (177 km²) au début des années 1980 pour atteindre aujourd'hui près de 24 % (295 km²). Cela confirme l'analyse visuelle effectuée à partir de la carte de la Figure 3. Compte-tenu des effets de l'urbanisation sur les états de surface et leur géométrie (imperméabilisation, artificialisation, érection d'un relief, etc.), on peut s'attendre à ce que les mutations urbaines du territoire du Grand Casablanca depuis le début des années 1980 aient eu un impact fort sur la réponse en températures de surface pendant la saison chaude, *a fortiori* par type de temps radiatif, lorsque le bilan radiatif est très excédentaire en journée.

II. DÉTECTION ET CARTOGRAPHIE DES TEMPÉRATURES DE SURFACE

A. Les données *Landsat*

Notre choix s'est porté sur les données infrarouges thermiques (IRT) *Landsat* multi-dates acquises par

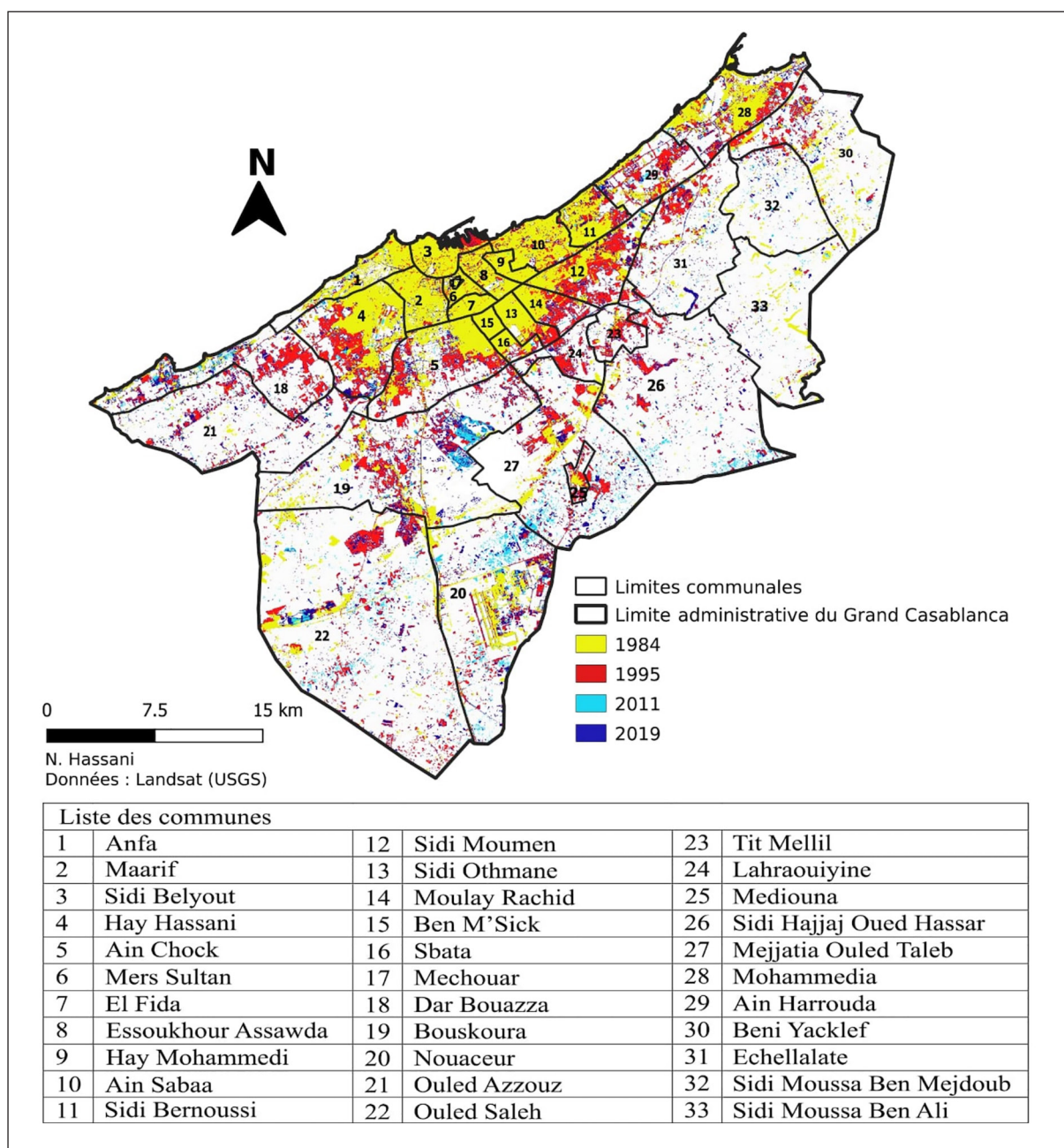


Figure 3. Évolution des espaces urbanisés du Grand Casablanca entre 1984 et 2019 et liste des communes

les satellites *Landsat* TM 5 et OLI/TIRS 8 de la NASA. Celles-ci offrent une opportunité unique de suivre les Ts à une large échelle, avec une fréquence temporelle relativement faible (tous les 16 jours pour le satellite *Landsat*) mais suffisante pour caractériser une évolution interannuelle. Elles disposent d'une résolution spatiale relativement précise (120 m et 100 m respectivement).

Ces images nous ont permis d'estimer l'émissivité, les Ts en journée et de nuit, ainsi que l'indice de végétation par différence normalisée (*Normalized Difference Vegetation Index* ou NDVI). Les images satellitaires ont été téléchargées sur le site de l'USGS

(*United States Geological Survey*) à partir du portail internet <http://earthexplorer.usgs.gov>. Seules les images ayant une couverture nuageuse inférieure à 10 % ont été retenues, soit celles correspondant aux étés 1984, 1995, 2011, 2015 et 2019 (Tableau 1). En journée, l'échantillon d'images est composé d'images enregistrées dans des conditions météorologiques similaires (Tableau 2).

B. Les données météorologiques

L'algorithme permettant d'estimer les Ts requiert la connaissance des valeurs de température de l'air, d'humidité relative et de pression atmosphérique

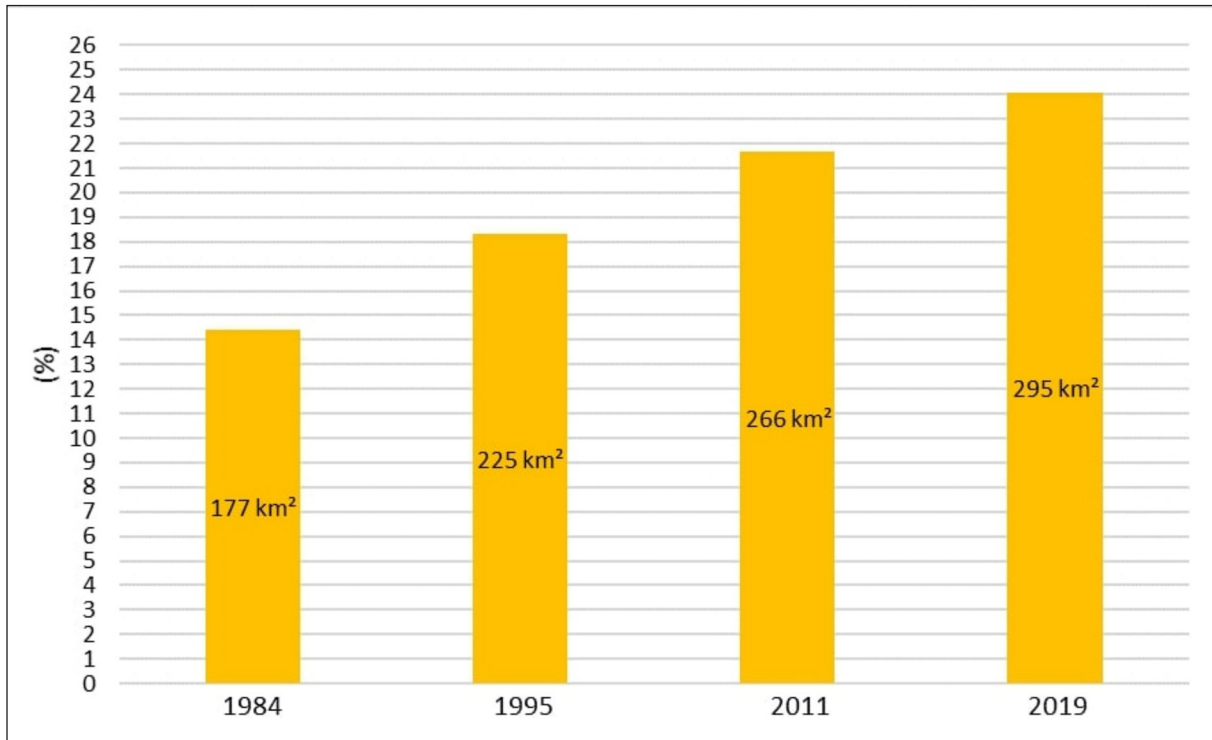


Figure 4. Évolution du taux d'urbanisation du Grand Casablanca de 1984 à 2019 (données Landsat)

à l'heure de passage des satellites. Dans cette optique, les données horaires de la station météorologique de la Direction Nationale de la Météorologie de Casablanca (DNMC) située au sein de l'ancien aéroport Casa-Anfa (coordonnées : 33,57°N ; -7,67°O) ont été utilisées (Tableau 2). Outre les paramètres précités, la prise en compte de données anémométriques permet de s'assurer que les journées comparées sont similaires du point de vue météorologique.

C. Méthodologie de prétraitement des images Landsat

De nombreuses approches ont été proposées pour calculer les T_s à partir de données IRT en utilisant diverses méthodes pour composer avec les effets de l'émissivité des surfaces terrestres et la transmittance de l'atmosphère. Il existe aujourd'hui trois méthodes bien établies offrant la possibilité de calculer les T_s à partir des données satellitaires : l'équation de transfert radiatif, l'algorithme à fenêtre fractionnée (*Split-Window* ou SW) et la méthode à canal unique - *Single-Canal* (SC) ou *Mono-Window* (MW).

Comme nous souhaitons disposer de la profondeur historique la plus grande possible, et d'au moins une bande spectrale dans l'IRT, seules les images

Landsat étaient mobilisables. Or, ces images nous imposent l'utilisation d'une méthode de type MW pour le calcul des T_s , avec une marge d'erreur de 0.6°K (Sobrino *et al.*, 2004). Avec cette méthode, les T_s sont extraites à partir de la brillance mesurée en limite d'atmosphère (TOA) dans la bande spectrale IRT en inversant l'équation du transfert radiatif (Sobrino *et al.*, 2010) :

$$T_s = B^{-1} \left[\frac{L_\lambda - R_{at\downarrow} - (1 - \varepsilon_i) \cdot R_{at\uparrow} \cdot \tau_i}{\varepsilon_i \cdot \tau_i} \right] \quad (1)$$

avec,

T_s : température de surface terrestre

$R_{at\downarrow}$: radiance atmosphérique descendante

$R_{at\uparrow}$: radiance atmosphérique montante

B^{-1} : inverse de la fonction de Planck

L_λ : luminance spectrale

ε_i : émissivité effective de la surface du sol

τ_i : transmittance de l'atmosphère le long du trajet cible/capteur

Comme l'indique la Figure 5, le calcul des T_s à partir de la luminance spectrale L_λ enregistrée en limite d'atmosphère (TOA) nécessite donc de connaître les caractéristiques atmosphériques au moment de la prise de vue pour quantifier la transmittance τ_i de l'atmosphère ainsi que les rayonnements atmosphériques descendant $R_{at\downarrow}$ et ascendant $R_{at\uparrow}$. Il est également nécessaire de connaître l'émissivité spectrale effective de la surface du sol ε_i .

| Capteur | Date d'acquisition | Heure d'acquisition (UTC) | Résolution spatiale de la bande IRT (m) | Séquence |
|------------------|--------------------|---------------------------|---|----------|
| Landsat TM | 25/08/1984 | 10h40 | 120 | jour |
| Landsat TM | 21/06/1995 | 10h40 | 120 | jour |
| Landsat TM | 04/08/2011 | 10h40 | 120 | jour |
| Landsat OLI/TIRS | 17/06/2015 | 22h22 | 100 | nuit |
| Landsat OLI/TIRS | 07/06/2019 | 11h03 | 100 | jour |

Tableau 1. Caractéristiques des images Landsat multi-dates utilisées dans cette étude

| Jour | Température de l'air (°C) | HR (%) | Vent moyen (km/h) | Direction du vent | Pression (hPa) |
|------------|---------------------------|--------|-------------------|-------------------|----------------|
| 25/08/1984 | 23,2 | 89 | 10 | 360 | 1015,6 |
| 21/06/1995 | 22,5 | 81 | 9 | 360 | 1016,5 |
| 04/08/2011 | 23,0 | 74 | 11 | 360 | 1018,0 |
| 17/06/2015 | 21,0 | 85 | 6 | 360 | 1014,0 |
| 07/06/2019 | 22,5 | 50 | 26 | 20 | 1018,0 |

Tableau 2. Données météorologiques (moyennes horaires) au moment du passage des satellites (source : Direction Nationale de la Météorologie de Casablanca)

Les variables τ_p , $R_{at\downarrow}$, $R_{at\uparrow}$, dépendantes de l'état de l'atmosphère, sont obtenues à partir de données issues de radiosondages, donc sur un maillage très lâche. Pour contourner ce problème, Qin *et al.* (2001) ont proposé des formulations empiriques de ces variables en utilisant T_0 , la température de l'air à proximité du sol et W , l'humidité de la colonne d'air totale. Dans ce cas, l'algorithme *Single-Canal* utilisé pour calculer la T_s à partir des données Landsat s'exprime comme suit (Sobrino *et al.*, 2004 ; Cristóbal *et al.*, 2009 ; Jimenez-Munoz *et al.*, 2009) :

$$T_s = \gamma \cdot \left(\left(\frac{1}{\varepsilon} \right) \cdot (\psi_1 \cdot L_\lambda + \psi_2) + \psi_3 \right) + \delta \quad (2)$$

avec,

- ε : émissivité effective de la surface du sol,
 - L_λ : luminance spectrale en limite d'atmosphère (TOA) pour la longueur d'onde λ en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$,
 - γ et δ : paramètres dépendants de la fonction de Planck,
 - ψ_1 , ψ_2 et ψ_3 : fonctions atmosphériques.
- γ et δ sont estimés à l'aide des équations (3) et (4) :

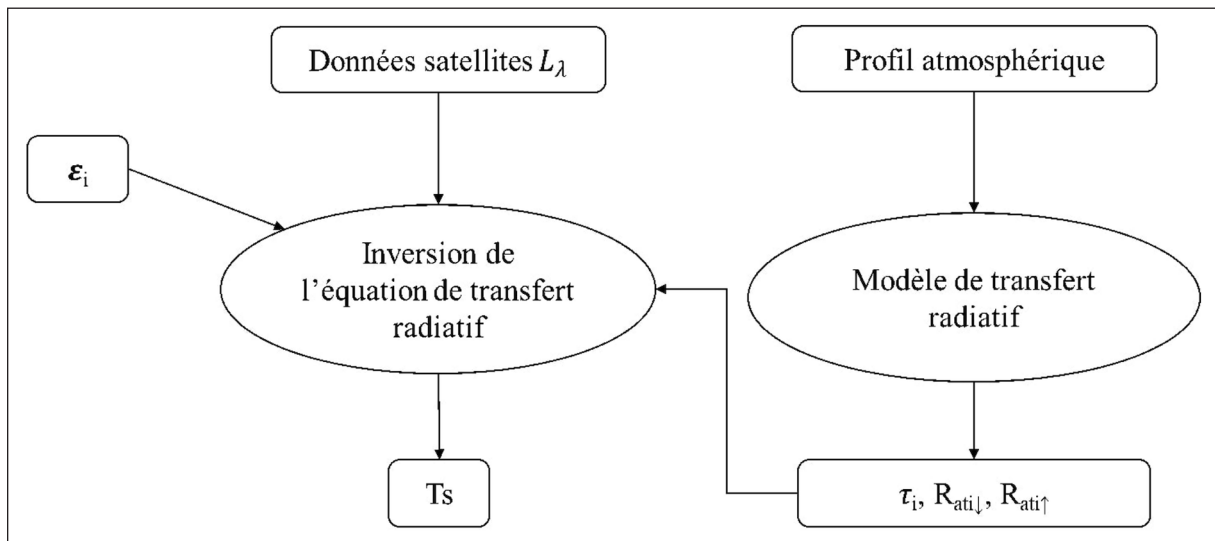


Figure 5. Organigramme d'extraction des températures de surface (T_s) à partir de données satellitales par la méthode *Mono-Window (MW)*. Adapté de Tang et Li (2014)

$$\gamma = \left\{ \frac{C2 \cdot L_\lambda}{T_b^2} \cdot \left[\lambda^4 \times L_\lambda \cdot C1 + \frac{1}{\lambda} \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

$$\delta = -\gamma \cdot L_\lambda + T_b \quad (4)$$

avec,

T_b : la température de brillance en K,

$C1$: constante de rayonnement de Planck ($C1 = 1,19104 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$),

$C2$: constante de rayonnement de Planck ($C2 = 1,43877 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$),

λ : longueur d'onde effective ($\lambda = 11,45 \mu\text{m}$ pour *Landsat 5 TM* bande 6 ; $\lambda = 11,34 \mu\text{m}$ pour *Landsat 7 ETM+* bande 6 et $\lambda = 10,89 \mu\text{m}$ pour *Landsat 8 TIRS* bande 10).

Toutes ces variables sont déterminées dans le cadre d'une chaîne de traitement des images *Landsat* récapitulée sur la Figure 6.

La luminance spectrale en limite d'atmosphère L_λ est calculée à partir des valeurs en compte numérique DN et les paramètres d'étalonnage du capteur (Chander *et al.*, 2007 ; Markham *et al.*, 2014 ; Czapla-Myers *et al.*, 2015).

$$L_\lambda = M_L \cdot DN + A_L \quad (5)$$

avec,

M_L et A_L : paramètres d'étalonnage du capteur.

La température de brillance T_b , température apparente de la surface mesurée au niveau du capteur, est calculée comme suit (Chander *et al.*, 2007) :

$$T_b = K2 / \ln(K1 / L_\lambda + 1) \quad (6)$$

avec,

$K1$ et $K2$: constantes spécifiques d'étalonnage du capteur.

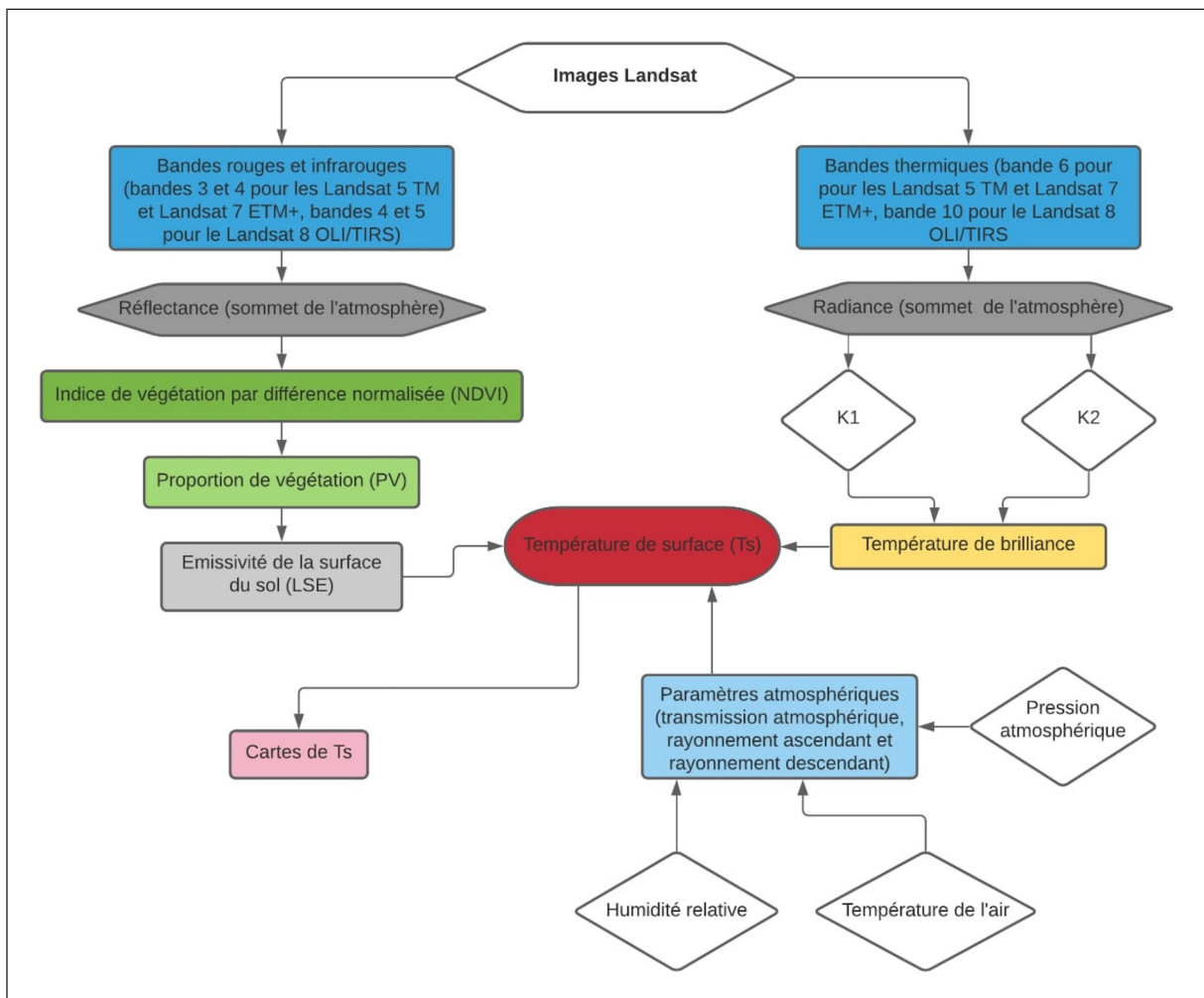


Figure 6. Chaîne de traitement décrivant la méthodologie suivie pour le calcul des températures de surface (Ts) à partir des données infrarouges Landsat

L'émissivité de la surface terrestre ou *Land Surface Emissivity* (LSE), qui décrit la capacité d'une surface à émettre un rayonnement thermique, est une propriété intrinsèque des surfaces. Le facteur d'émissivité (ε) représente le rapport entre l'énergie radiative ou flux émis par l'objet et l'énergie émise par le corps noir à la même température. Depuis l'espace, les surfaces terrestres, du fait de la résolution spatiale des images, sont hétérogènes. Dans ce cas, on considère l'émissivité globale d'un pixel, la LSE, qui dépend de la végétation, de l'humidité du sol, de la rugosité et de l'angle de prise de vue (Salisbury et D'Aria, 1992).

De nombreuses méthodes existent pour retrouver la LSE à partir des images d'observation de la terre, c'est la méthode basée sur les NDVI qui est retenue ici (Van De Griend et Owe, 1993) et plus précisément celle recourant au seuillage du NDVI ou *NDVI-threshold method* (NDVI^{THM}). Largement utilisée et considérée comme la plus appropriée pour estimer les Ts à partir de données *Landsat* (Sobrino et Raissouni, 2000 ; Sobrino *et al.*, 2004 ; Sobrino *et al.*, 2008 ; Walawender *et al.*, 2014 ; Renard *et al.*, 2019), elle se calcule par l'équation suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon_v \cdot PV + \varepsilon_s \cdot (1 - PV) + C \quad (7)$$

avec,

ε_s et ε_v : émissivité du sol et de la végétation,

PV : proportion de la végétation,

C : effet de cavité.

L'effet de cavité C rend compte de la rugosité de la surface (C=0 pour les surfaces planes) et il peut être calculé par l'équation (8) pour les surfaces mixtes (Sobrino et Raissouni, 2000) :

$$\varepsilon = (1 - \varepsilon_s) \cdot \varepsilon_v \cdot F' \cdot (1 - PV) \quad (8)$$

F' est un facteur géométrique dont la valeur est comprise entre 0 et 1 dépendant de la distribution géométrique de la surface. Sobrino et Raissouni (2000) ont donné une valeur moyenne de 0,55 pour les surfaces hétérogènes. Les autres symboles ont la même signification que dans les équations précédentes. La proportion de végétation PV appelée aussi couverture végétale fractionnelle (CVF) est obtenue à partir de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) avec :

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (9)$$

et

$$PV = \left(\frac{(NDVI - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})} \right)^2 \quad (10)$$

Les variables Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_3 , schématisant l'interaction du rayonnement électromagnétique avec l'atmosphère, sont déterminées en utilisant le calculateur de paramètres de la correction atmosphérique élaboré par la NASA (Barsi *et al.*, 2003, 2005) et disponible en ligne (ACPC - <https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>). L'ACPC requiert de renseigner quelques informations comme la localisation de la zone d'étude, la date et l'heure de la prise de vue. Les résultats en sortie de cet algorithme sont améliorés par la prescription de variables météorologiques mesurées telles que la pression atmosphérique, la température de l'air et l'humidité relative (Figure 6). Pour cela, comme indiqué précédemment, ce sont les données de la station météorologique de la DNMC qui ont été utilisées (Tableau 2).

Au final, à l'issue de tous ces traitements, nous disposons de cinq spatio-cartes de Ts (quatre spatio-cartes de jour et une spatio-carte de nuit) à la résolution de 100 mètres (ré-échantillonnées à 30 mètres) pour la région du Grand Casablanca sur la période 1984-2019.

III. PRINCIPAUX RÉSULTATS

A. Organisation spatio-temporelle des températures de surface en journée

Nous analysons dans un premier temps les spatio-cartes obtenues lors de la période la plus chaude de l'année (juin à août) et dans des conditions météorologiques équivalentes (périodes anticycloniques, avec des températures de l'air comprises entre 22,5°C et 23,2°C et un vent faible, cf. Tableau 2). Les valeurs de Ts obtenues à partir des bandes thermiques des images *Landsat* de 1984, 1995, 2011 et 2019 ont été réparties en sept classes (Figure 7). Notons que l'impact des dates d'acquisition des images sur l'organisation spatiale des Ts est limité ce qui les rend comparables dans le temps (voir section III.B).

Quelle que soit l'année considérée, les spatio-cartes montrent une forte hétérogénéité thermique (amplitude spatiale > 10 °C) et l'existence, en fin de matinée, d'un écart de température négatif de plusieurs degrés entre les quartiers densément bâtis de

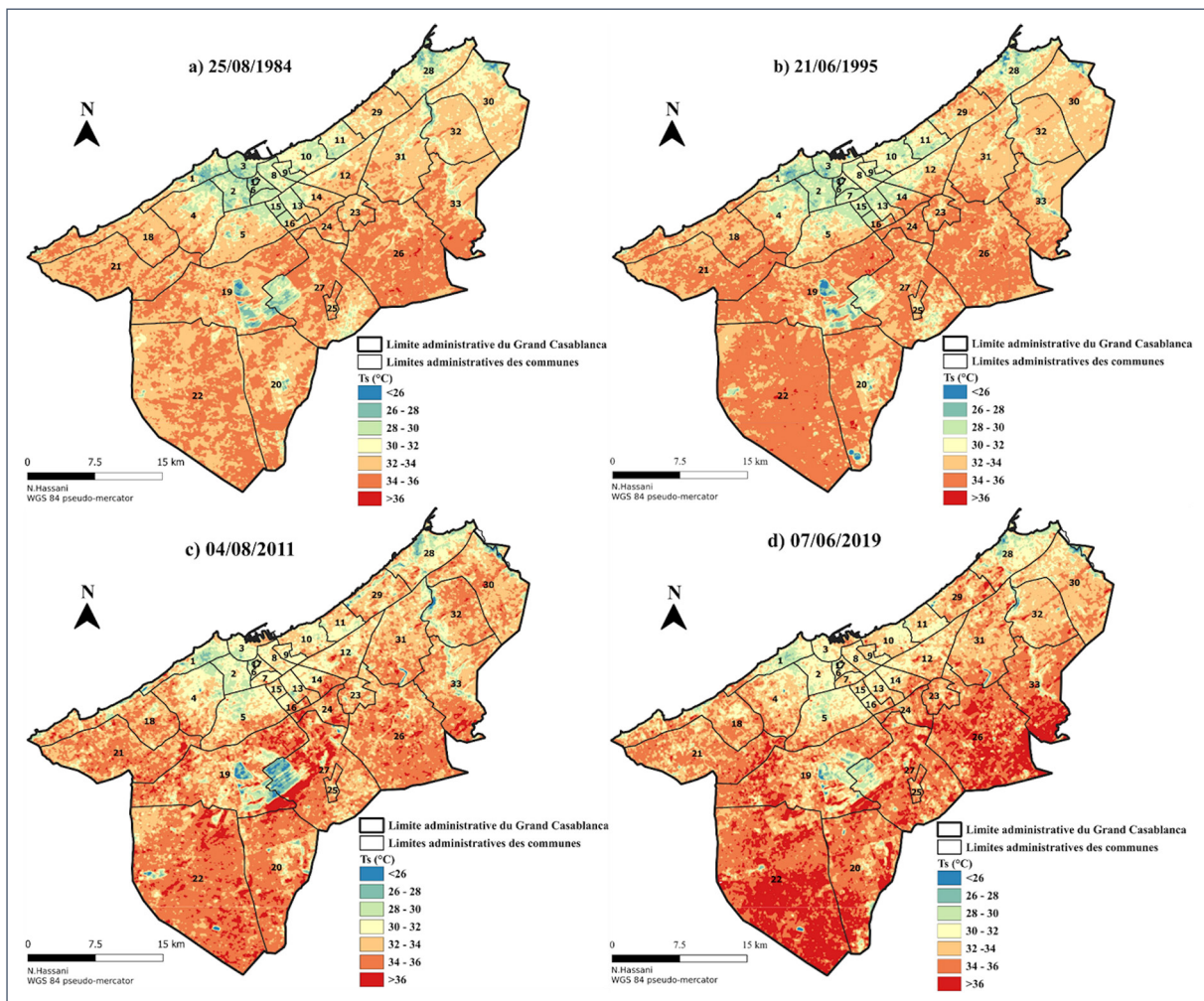


Figure 7. Températures de surface (Ts) du Grand Casablanca pour quatre journées d'été réparties entre 1984 et 2019. a) 25/08/1984 ; b) 21/06/1995 ; c) 04/08/2011 ; d) 07/06/2019

Casablanca et Mohammedia (Médina et ancienne ville) et l'environnement rural. À titre d'exemple, le centre-ville de Casablanca bénéficie en moyenne d'une température de surface inférieure de 2,5°C à celle estimée en périphérie de la ville. Cet écart de température « ville-campagne » négatif coïncide avec l'apparition d'îlots de fraîcheur urbain au niveau du sol (IFUs) formant un quasi-continuum au niveau des deux aires urbaines (Figure 7).

De 1984 à 1995, les Ts intermédiaires, comprises entre 30°C et 32°C se limitent aux quartiers industriels de Roches Noires et d'Aïn Sabaa, situés sur la commune d'Aïn Sabaa et à la commune de Sidi Bernoussi situées le long du littoral à l'est de Casablanca (voir Figure 3 pour la localisation); tandis que les Ts maximales dépassant 34°C sont enregistrées sur les terres agricoles nues en périphérie sud et est du Grand Casablanca, ainsi qu'entre les villes de Casablanca et de Mohammedia (Figure 7).

Sur les thermographies de 2011 et de 2019 (Figure 7), on note que les valeurs de Ts les plus élevées se sont remarquablement étendues dans les centres-villes de Casablanca et de Mohammedia et vers les espaces péri-urbains, où de nouveaux pôles urbains périphériques ont été construits (voir les communes de Médiouna et de Nouaceur situées au sud et la commune de Tit Mellil située au centre-est de la métropole, Figure 3). Au point que, dans la thermographie de 2019, la plupart des IFUs ont disparu. Il ne demeure que quelques noyaux de fraîcheur épars principalement localisés au niveau de la forêt de Bouskoura-Merchich au centre-ouest de la zone d'étude (Figure 1), ainsi que dans les quartiers résidentiels d'Aïn Diab (commune d'Anfa, cf. Figure 3) et de Californie (commune d'Aïn Chock, cf. Figure 3) constitués de maisons avec piscines entourées de jardins.

Le Tableau 3 contient les moyennes spatiales des Ts à l'échelle du Grand Casablanca. L'analyse des

| Date | Ts maximale | Ts minimale | Ts moyenne | Ts médiane | Écart-type |
|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
| 25/08/1984 | 37,2 | 18,1 | 33,1 | 33,6 | 1,9 |
| 21/06/1995 | 38,2 | 18,9 | 33,2 | 33,9 | 2,0 |
| 04/08/2011 | 41,6 | 19,8 | 33,4 | 33,8 | 2,1 |
| 07/06/2019 | 41,1 | 17,7 | 33,9 | 34,1 | 2,1 |

Tableau 3. Moyennes spatiales et écart-type (en °C) des Ts du Grand Casablanca (thermographies *Landsat* d'août 1984, de juin 1995, d'août 2011 et de juin 2019)

données met en évidence une augmentation sensible des valeurs maximales entre 1984 et 2019 (+4°C environ) ce qui corrobore l'analyse diachronique des spatiocartes. Les valeurs minimales, moyennes et médianes quant à elles, varient peu.

B. Relation entre températures de surface et occupation du sol dans la conurbation littorale

Pour approfondir notre analyse de la relation entre les Ts de journée et l'occupation du sol dans le Grand Casablanca, nous nous sommes intéressés au comportement thermique de différentes classes d'occupation du sol situées dans un périmètre regroupant les 18 communes à dominante urbaine (Figure 8). Les écarts de température sont déterminés par rapport à la moyenne spatiale des Ts de cette conurbation littorale. Les statistiques de température ont été obtenues en superposant les quatre thermographies disponibles à une carte vectorielle des classes d'occupation du sol réalisée à partir du fond *Google Earth* grâce à l'outil « statistiques zonales » du logiciel *QGIS*. Pour chaque classe d'occupation du sol, les valeurs de Ts sont représentées sous la forme d'une boîte à moustaches (voir Figure 9).

On constate tout d'abord, que pour une même classe d'occupation du sol, les boîtes à moustaches sont très comparables d'une date à l'autre, ce qui démontre que la comparaison entre les quatre thermographies produites est pertinente. Les écarts entre la Ts moyenne des classes « points d'eau », « zone végétalisée » et « habitat pavillonnaire espacé » et celle de la conurbation, sont respectivement de -2,7°C, -4,4°C et -3,4°C. Ceux des classes « habitat collectif concentré » et « habitat pavillonnaire concentré » sont de -1,9°C et -2°C. À l'inverse, les écarts des classes « sols nus/sableux » et « sols imperméables/rocheux » sont positifs et de l'ordre de +2,4°C et +0,9°C. Enfin, la Ts moyenne des classes « bidonvilles », « zone d'activité économique » et « zone industrielle » est identique à celle de la co-

nurbation. Au total, comme on pouvait s'y attendre, les quartiers végétalisés à densité d'habitat modérée sont les surfaces les plus fraîches (importance des surfaces évaporantes), tandis que les sols nus et asséchés, directement exposés au rayonnement solaire incident, sont les surfaces les plus chaudes (hausse du flux de chaleur sensible).

C. L'impact des projets de réaménagement sur les îlots de chaleur au niveau du sol est-il sensible ?

Mesurer les effets de l'urbanisation sur le climat local et singulièrement sur les îlots de chaleur au niveau du sol, implique aussi d'examiner les Ts de sites *ante* et *post* aménagement voire pendant la phase d'aménagement (Renard *et al.*, 2019). Certains espaces du Grand Casablanca offrent justement cette opportunité puisqu'ils ont fait l'objet de projets de réaménagement au cours de la période d'étude. La Figure 10 présente quatre exemples de sites réaménagés ainsi que les champs de Ts correspondants.

Projet 1 (commune de Bouskoura) : Les spatiocartes de 1984 et 1995 indiquent que les Ts sont prononcées dans les zones agricoles se trouvant au nord de la forêt de Bouskoura-Merchich, où elles dépassent 34°C (Figure 10). Toutefois, à partir des années 2000, des éco-quartiers se sont développés au sein de ces espaces agricoles afin d'attirer la population au sud de Casablanca et ainsi d'alléger la pression démographique sur le centre-ville. Suite au réaménagement intervenu entre 2011 et 2019, on constate que les Ts ont baissé sous l'effet de la végétalisation (toits végétalisés, jardins, terrains de golf, etc.) et de la présence de zones humides (lacs, piscines, etc.). Cela confirme l'effet rafraîchissant sur les surfaces obtenu grâce à l'intégration d'espaces verts et de points d'eau.

Projet 2 (commune de Hay Hassani) : La partie nord du site de l'ancien aéroport de Casablanca

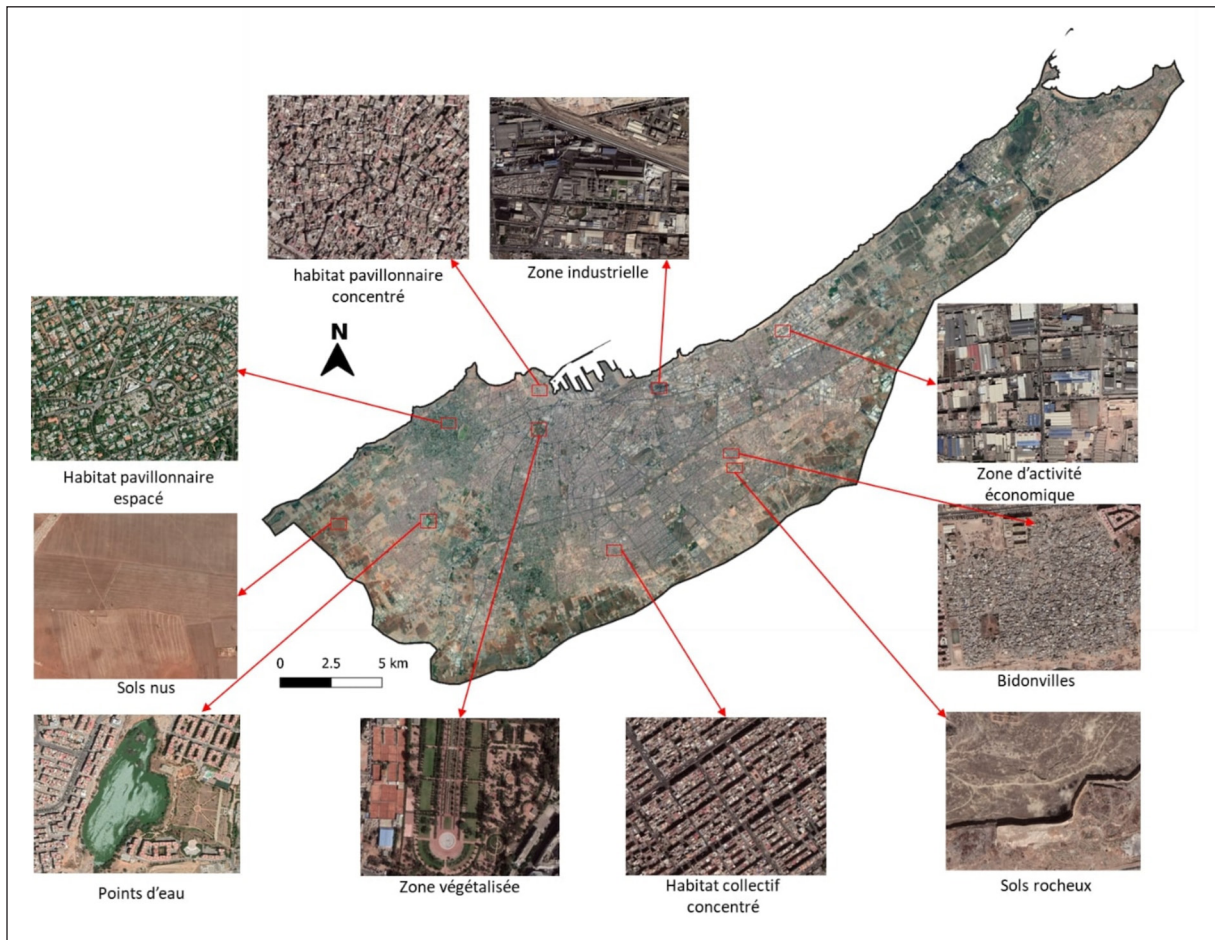


Figure 8. Vues détaillées des différentes classes d'occupation du sol de la conurbation littorale du Grand Casablanca (fond de carte : Google Earth)

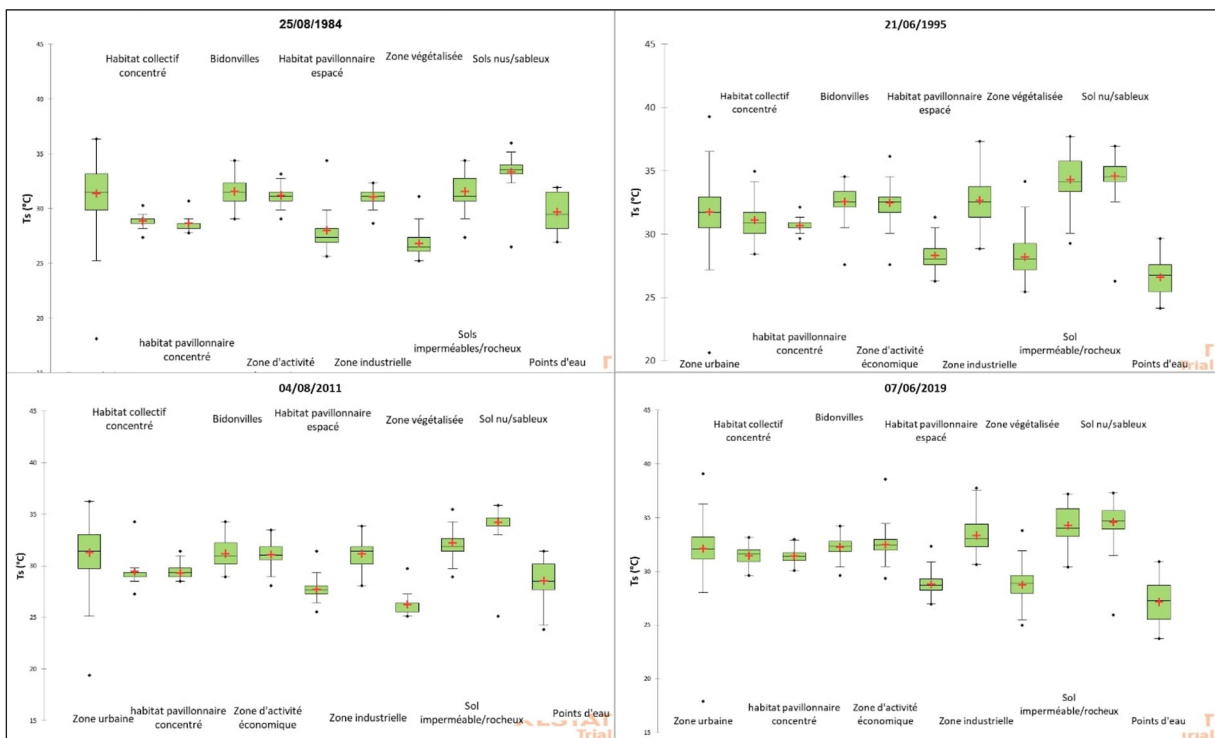


Figure 9. Boîtes à moustache des températures de surface (Ts) par classe d'occupation du sol (conurbation littorale du Grand Casablanca ; thermographies d'août 1984, de juin 1995, d'août 2011 et de juin 2019)

a été réaménagée en parc dans le but de créer un « poumon vert » dans le milieu urbain casablancais. La comparaison des Ts avant et après réaménagement met en évidence un écart d'environ -5°C (Figure 10).

Projet 3 (commune de Hay Hassani) : Jusqu'aux années 1990, le quartier Beauséjour était constitué de maisons individuelles entourées de grands jardins. Cependant, le nouveau plan d'aménagement de Casablanca (2004) a opéré la reconversion des maisons en immeubles afin d'améliorer l'offre de logements et limiter la crise du logement. D'après les thermographies de la Figure 10, cette reconversion a induit une augmentation des Ts qui passent de 32°C à 36°C ($+4^{\circ}\text{C}$).

Projet 4 (commune d'Ain Sabaa) : Les thermographies de la Figure 10 représentent les Ts au sein d'un quartier de logements sociaux construits pendant les années 2000. Avant cette période, cette zone n'était pas bâtie et était constituée d'étendues d'eau et de zones agricoles. On remarque que la disparition des étendues d'eau qui ressortent en bleu sur les images de 1984 et 1995 s'est traduite par une augmentation des Ts, un excédent thermique au niveau des surfaces imperméables (routes,

parkings...) et des Ts intermédiaires au niveau des ensembles de logements. L'intégration d'un espace vert au cœur de certains ensembles entraîne un rafraîchissement de surface.

D. Analyse des températures de surface nocturnes

L'analyse des Ts nocturnes vient compléter celle effectuée sur les Ts de journée dans la mesure où elle permet d'analyser la variabilité spatiale des îlots de chaleur et des îlots de fraîcheur au niveau du sol lorsque le soleil est couché. Pour cela, nous nous appuyons sur une image *Landsat* prise par type de temps radiatif au cours de la saison chaude, le 17/6/2015 aux alentours de 22h30 UTC (Tableau 1), soit un peu de moins de 2 heures après le coucher du soleil.

Les Ts extraites à partir de cette image (Figure 11) varient de $13,1^{\circ}\text{C}$ à 26°C en début de nuit, ce qui constitue une amplitude thermique d'environ 13°C à l'échelle du Grand Casablanca. Les deux transects de température illustrés par la Figure 12 (transect NS et transect NE/SO) montrent clairement la formation, en début de nuit, d'îlots de chaleur urbains au niveau du sol (ICUs) formant un quasi-conti-

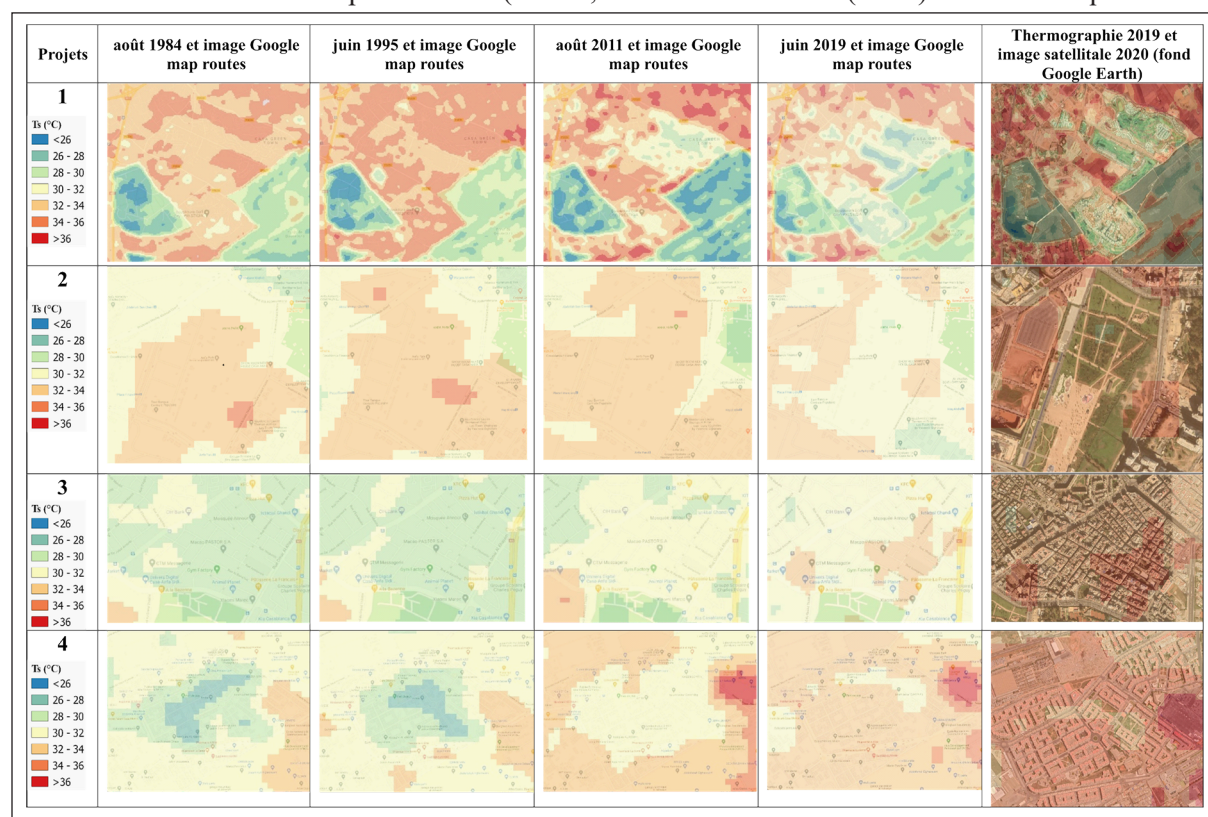


Figure 10. Évolution des températures de surface pour quatre sites du Grand Casablanca ayant subi des réaménagements lourds sur la période 1984-2019

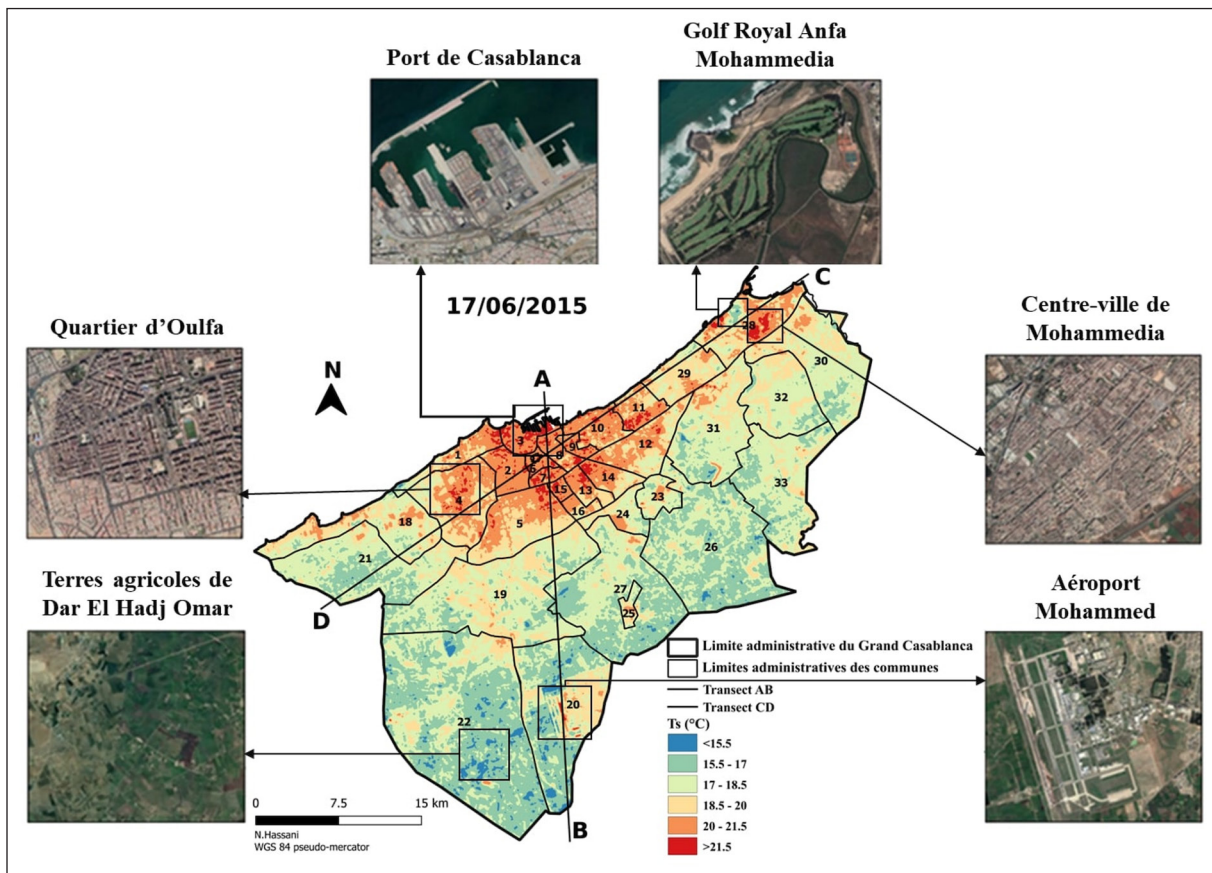


Figure 11. Spatiocarte des températures de surfaces (Ts) nocturnes du Grand Casablanca (spatiocarte du 17/06/2015 à 22h22 UTC), vues détaillées des sites commentés dans le texte et transects NS et NE/SO

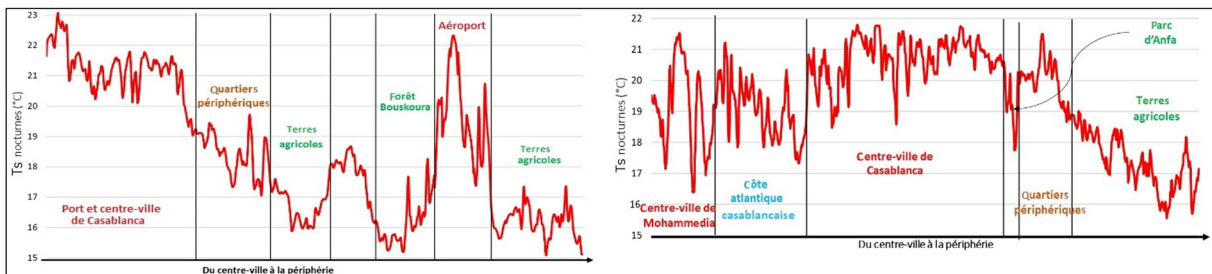


Figure 12. a) Profil thermique du transect NS ; b) Profil thermique du transect NE/SO. Les profils ont été établis à partir de la thermographie nocturne *Landsat* du 17/06/2015

num dans les zones densément bâties et industrielles des villes de Casablanca et de Mohammedia ainsi que sur l'aéroport Mohammed V. Les valeurs de Ts des espaces urbains et industriels dépassent $21,5^{\circ}\text{C}$, tandis que dans les espaces ruraux, les valeurs varient entre 13°C et 17°C (voir aussi Figure 11). Plus loin, vers le sud et le sud-ouest de l'espace étudié, un archipel d'îlots de fraîcheur apparaît (Figure 12). Ces îlots de fraîcheur correspondent aux étendues d'eau et aux espaces fortement végétalisés : forêt de Bouskoura-Merchich, parc Sindibad de Casablanca, parc de Mohammedia, terrains de golf d'Anfa et de Mohammedia. Cependant, des clusters de chaleur intense apparaissent également

dans les pôles périphériques fortement urbanisés (communes de Mediouna et de Nouaceur situées au sud ; commune de Tit Mellil située au centre-est).

La thermographie du 17/06/2015 (Figure 11) fait également ressortir de très nets contrastes thermiques entre l'habitat pavillonnaire d'une part et l'habitat collectif d'autre part : les Ts « modérées » apparaissent dans les quartiers résidentiels d'habitat diffus, comme le quartier d'Aïn Diab à l'ouest, le quartier Californie au sud-ouest de Casablanca, ou encore ceux de la zone côtière de Mohammedia au nord-est. En revanche, dans les quartiers d'habitat social à l'ouest (exemple du quartier d'Oulfa) et au

sud de Casablanca, des noyaux de chaleur intense apparaissent : cela s'explique vraisemblablement par leur tissu très dense et l'absence de végétation. À la périphérie de la métropole, sur la thermographie comme sur les transects, des IFUs sont clairement identifiables. Ils correspondent à des espaces plus ou moins ruraux, constitués de terres agricoles et boisées (exemple des terres agricoles de Dar El Hadj Omar, cf. Figure 11).

Au total, cette analyse des Ts nocturnes à l'échelle du Grand Casablanca, qui demande encore à être consolidée, a pour intérêt de mettre en évidence l'inversion qui s'opère dans la localisation des îlots de chaleur : ceux-ci se localisent préférentiellement dans l'environnement rural du Grand Casablanca en journée et dans la conurbation littorale la nuit.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Cette étude a permis de retracer la variabilité des îlots de chaleur au niveau du sol dans le Grand Casablanca par situation anticyclonique radiative (temps clair et calme) de saison chaude, sur une période de 35 ans s'étendant de 1984 à 2019 grâce à une série d'images infra-rouges thermiques *Landsat* multi-dates. Au cours de cette période, ce territoire a connu une urbanisation rapide et considérable du fait de son développement socio-économique et de sa croissance démographique, ainsi qu'une hausse des températures annuelles d'environ 0.7°C sous l'effet du réchauffement planétaire (Ouattab *et al.*, 2019).

L'analyse des thermographies de surface *Landsat* débouche sur un résultat en accord avec les études antérieures menées sur le Grand Casablanca (voir par exemple Bahi *et al.*, 2016) : durant les situations radiatives d'été, en fin de matinée heure locale, les surfaces de la grande banlieue rurale de Casablanca et de Mohammedia et celles de l'arrière-pays sont généralement plus chaudes (ensemble d'îlots de chaleur au niveau du sol) que celles de la conurbation littorale (ensemble d'îlots de fraîcheur urbains au niveau du sol ou IFUs). Cette observation, qui semble contre-intuitive, s'explique par la faible couverture végétale sur les terres agricoles de la Chaouia à cette période de l'année. Les données de la campagne 2018 relatives à la DPA (Délégation Provinciale de l'Agriculture) de Casablanca située dans la région du Grand Casablanca (Conseil Général du Développement Agricole, 2009), indiquent

que 50 % de la surface agricole utile ($\approx 1150 \text{ km}^2$) sont cultivés en bour (zone de cultures sèches), 5 % en cultures irriguées (maraîchage et arboriculture) et 45 % en surfaces forestières, parcours et surfaces incultes (Direction Régionale de l'Agriculture Région Casablanca-Settat, 2018). De plus, les cultures céréalières et fourragères en bour (blé tendre, maïs et orge fourrager) sont généralement moissonnées au printemps et au début de l'été (avril pour l'orge fourrager, juin pour le blé tendre et juillet pour le maïs). Au moment de l'enregistrement des images IRT Landsat, le rayonnement solaire incident est donc peu intercepté et les sols se comportent comme des surfaces sèches (faible évaporation), claires (réflectivité solaire élevée) et faiblement conductrices (la porosité du sol étant remplie d'air) : la majeure partie de l'énergie solaire incidente se transforme alors en chaleur sensible à peu près de la même manière que dans les espaces urbanisés (voir également l'étude de Bounoua *et al.*, 2019 sur la ville d'Oran en Algérie). Dans les hypercentres de Casablanca et Mohammedia, en revanche, les immeubles de grande hauteur et les canyons urbains créent des zones ombrées importantes et contribuent à maintenir une fraîcheur matinale jusqu'à midi (voir également Carrega (1992) pour le cas de Nice).

En outre, la situation côtière de l'agglomération casablancaise lui fait bénéficier de l'effet rafraîchissant de la brise de mer, le front de brise pouvant atteindre le continent quelques heures après le lever du soleil (voir Bahi *et al.*, 2016 ; Dahech *et al.*, 2012). La topographie locale (côte basse de la plaine de la Chaouia) favorise la pénétration de la brise de mer à l'intérieur des terres selon une direction quasi-perpendiculaire au trait de côte (voir les études de Johnson et O'Brien, 1973 ; Redano *et al.*, 1991). L'étude de Dahech et Charfi (2017) sur la ville de Bizerte en Tunisie a montré que l'air chaud de la ville était déplacé d'environ 10 km à l'intérieur des terres du fait de la brise de mer, ce qui est proche de ce que l'on peut estimer à partir des spatio-cartes produites dans ce travail.

La comparaison entre l'évolution spatio-temporelle des Ts et celle de la dynamique d'urbanisation de la métropole casablancaise met aussi en lumière une tendance indéniable à l'extension des surfaces chaudes en corrélation avec la densification et l'étalement urbain. Les espaces présentant un excédent de température ont tendance à s'étendre à l'ensemble de la zone urbanisée, ne laissant que

quelques cellules de fraîcheur qui soulignent l'influence des parcs et jardins, des points d'eau et des zones résidentielles les moins denses où habite la population la plus aisée ; l'artificialisation de certains espaces verts et l'augmentation de la rugosité du tissu urbain du fait de sa densification ayant probablement pour effet de ralentir et de rendre plus irréguliers la circulation de l'air et l'écoulement de la brise littorale jusqu'à la périphérie de la zone étudiée (voir les travaux de Dahech *et al.* (2011) sur la ville de Sfax en Tunisie par exemple). Par ailleurs, la densification et l'étalement des villes de Casablanca et de Mohammedia ont probablement pour effet d'augmenter les rejets de chaleur d'origine anthropique. Plusieurs études suggèrent en effet, que dans les espaces urbains denses et/ou industriels, la chaleur anthropique libérée par le trafic automobile et la consommation d'énergie contribuent à réchauffer les surfaces (Liao *et al.*, 2017).

Enfin, la thermographie prise de nuit met en évidence un renversement du contraste de température « ville/campagne » : les IFUs localisés dans la conurbation littorale en milieu de journée, se transforment en îlots de chaleur urbains au niveau du sol ou ICUs en début de nuit. Cela s'explique par la restitution et le piégeage pendant la nuit de la chaleur stockée par les matériaux constituant le tissu urbain, et probablement, par le renversement de la brise littorale : la nuit, la brise de mer (vent frais) devenant brise de terre (vent chaud) du fait de la plus grande inertie thermique de l'océan, la conurbation littorale ne bénéficie plus de son effet rafraîchissant.

Au terme de ce travail, quelques perspectives de recherche se dessinent : il serait intéressant d'étudier la variabilité des îlots de chaleur casablancais à partir de plusieurs images nocturnes afin de mieux comprendre par exemple, leurs variations saisonnières et leurs interactions avec les îlots de fraîcheur qui se produisent en journée par type de temps radiatif. Il serait également intéressant d'exploiter des données anémométriques et des réanalyses météorologiques pour cerner plus précisément le rôle de la brise terre-mer (épaisseur du flux, fréquence d'occurrence, distance de pénétration, etc.) sur les Ts et la température de l'air. Enfin, dans le but d'améliorer la qualité de vie des habitants, notamment dans les quartiers d'habitat social et les bidonvilles carencés en eau et en végétation, nous

envisageons de réaliser une enquête de perception du risque de forte chaleur sur le territoire du Grand Casablanca. Cela devrait permettre de collecter des données qualitatives sur le ressenti thermique et les stratégies d'adaptation aux fortes chaleurs des habitants et des acteurs du territoire.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'USGS (NASA) pour les données utiles et gratuites ainsi que le site Tutitempo et la Direction Nationale de la Météorologie de Casablanca (DNM) pour les données fournies. Ce travail n'aurait pas été possible sans ces données.

BIBLIOGRAPHIE

- Asslouj, J. E., Kholtei, S., Amrani-Paaza, N. E. & Hilali, A. (2007). Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). *Revue des sciences de l'eau*, 20(3), 309-321, <https://doi.org/10.7202/016505ar>
- Bahi, H., Rhinane, H., Bensalmia, A., Fehrenbach, U. & Scherer, D. (2016). Effects of urbanization and seasonal cycle on the surface urban heat island patterns in the coastal growing cities : a case study of Casablanca. Morocco. *Remote Sensing*, 8(10), 829, <https://doi.org/10.3390/rs8100829>
- Barsi, J. A., Barker, J. L. & Schott, J. R. (2003). An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a single thermal band earth-sensing instrument. *In Proceedings of the 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toulouse, 5, 3014-3016, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294665>
- Barsi, J. A., Schott, J. R., Palluconi, F. D. & Hook, S. J. (2005). Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. *In Earth Observing Systems X, 58820E*. International Society for Optics and Photonics <https://doi.org/10.1117/12.619990>
- Bounoua, L., Abdelmounaine, S., Jeffrey, M., Christa, P.-L. & Marc, L. I. (2009). Impact of Urban Growth on Surface Climate: A Case Study in Oran, Algeria. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48 (2), 217-31. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC2044.1>
- Briche, E., Cantat, O. & Carrega, P. (2017). *Variabilité, changement climatique et conséquences en Méditerranée*. Les Impromptus du LPED n°3, Marseille, 159 p., (hal-01794243)
- Carrega, P. (1992). *Topoclimatologie et habitat*. Thèse Doctorat d'Etat, ronéo, Nice, 475 p. + annexes. Publiée en 1994 dans la *Revue d'Analyse Spatiale*, Nice, n° 35 et 36, 408 p.

- Chander, G., Markham, B. L. & Barsi, J. A. (2007). Revised Landsat-5 thematic mapper radiometric calibration. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4(3), 490-494, <https://doi.org/10.1109/LGRS.2007.898285>
- Conseil Général du Développement Agricole (2009). *Atlas de l'agriculture marocaine*. Edition 2008, Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime, 51 p.
- Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Ninyerola, M. & Pons, X. (2009). Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapor and air temperature. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 114, D08103, <https://doi.org/10.1029/2008JD010616>
- Czapla-Myers, J., McCorkel, J., Anderson, N., Thome, K., Biggar, S., Helder, D., Aaron, D., Leigh, L. & Mishra, N. (2015). The ground-based absolute radiometric calibration of Landsat 8 OLI. *Remote Sensing*, 7(1), 600-626, <https://doi.org/10.3390/rs70100600>
- Dahech, S., Daoud, A. & Beltrando, G. (2011). Les inégalités spatiales de la qualité de l'air dans l'agglomération de Sfax et ses environs : Le cas des températures, de la brise, du CO et SO₂. *Cybergeo : European Journal of Geography*, <http://journals.openedition.org/cybergeo/24701>
- Dahech, S., Berges, J-C & Beltrando, G. (2012). Localisation et dynamique du front de la brise de mer au Maghreb oriental. *Climatologie*, 9, 59-81, <http://lodel.irevues.inist.fr/climatologie/index.php?id=189>
- Dahech, S. & Charfi, S. (2017). Aspect topoclimatiques de Bizerte (NE de la Tunisie) : Ilot de chaleur urbain et brises thermiques. *Variabilité, changement climatique et conséquences en Méditerranée*. Les Impromptus du LPED n°3, Marseille, 159 p., (<hal-01794243>)
- Direction Régionale de l'Agriculture Région Casablanca-Settat (2018). *Monographie agricole, Région de Casablanca-Settat*. Ministère de l'agriculture, de la pêche maritime, du développement rural, et des eaux et forêts, Direction Régionale de l'Agriculture Région Casablanca-Settat, 19 p.
- Gadal, S. (2005). Urbanisation et dynamiques de peuplements : Casablanca 1994-2002. *Actes de colloque : Les villes aux défis du développement durable : quelle maîtrise de l'étalement urbain et des ségrégations associées ?* Université de Sfax, Tunisie, (<hal-01439646>)
- Hassani, N. (2017). *La sur-urbanisation de la ville de Casablanca : étude de l'évolution spatio-temporelle de la ville de Casablanca entre 1987 et 2017*. Mémoire de master 1, Centre de recherche en géographie (LOTERR), Université de Lorraine, Metz (<hal-03038454>)
- Jimenez-Munoz, J. C., Cristobal, J., Sobrino, J. A., Soria, G., Ninyerola, M., & Pons, X. (2009). Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1), 339-349, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2007125>
- Johnson, A. Jr. & O'Brien, J.J. (1973). A study of an Oregon sea breeze event. *Journal of Applied Meteorology*, 12 (8), 1267-1283, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1973\)012%3C1267:ASOAO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1973)012%3C1267:ASOAO%3E2.0.CO;2)
- Lazzarini, M., Marpu, P.R. & Ghedira, H. (2013). Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. *Remote Sensing of Environment*, 130, 136-152, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.11.007>
- Liao, W., Liu, X., Wang, D. & Sheng, Y. (2017). The impact of energy consumption on the surface urban heat island in China's 32 major cities. *Remote Sensing*, 9(3),250, <https://doi.org/10.3390/rs9030250>
- Markham, B., Barsi, J., Kvaran, G., Ong, L., Kaita, E., Biggar, S., Czapla-Myers, J., Mishra, N. & Helder, D. (2014). Landsat-8 operational land imager radiometric calibration and stability. *Remote Sensing* 6(12), 12275-12308, <https://doi.org/10.3390/rs61212275>
- Nassori, D. (2017). *Dynamiques urbaines et développement économique au Maroc*. Thèse de doctorat, Université de Toulon, France, 158 p., (<tel-01808013>).
- Ouattab, M., Hammoudy, W., Dahman, A., Ilmen, R., Saloui, A., Hsaine, M. & Sebbar, A. (2019). Évolution des températures observées et projections futures - région de Casablanca-Settat (Maroc). *Actes du XXXIIème colloque de l'association internationale de climatologie*, Thessalonique, Grèce, 33-38.
- Peel, M., Finlayson, B. & McMahon, T. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633-1644.
- Qin, Z., Karnieli, A. & Berliner, P. (2001) . A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3719-3746, <https://doi.org/10.1080/01431160010006971>
- Redano, A., Cruz, J. & Lorente, J. (1991). Main features of the sea breeze in Barcelona. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 46, 175-179, <https://doi.org/10.1007/BF01027342>
- Renard, F., Alonso, L., Fitts, Y., Hadjiosif, A. & Comby, J. (2019). Evaluation of the Effect of Urban Redevelopment on Surface Urban Heat Islands. *Remote Sensing*, 11(3), 299, <https://doi.org/10.3390/rs11030299>
- Rhinane, H., Hilali, A. Bahi, H. & Berrada, A. (2012). Contribution of Landsat TM data for the detection of urban heat islands areas case of Casablanca. *Journal of Geographic Information System*, 04(01), 20-26, <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2012.41003>
- Roth, M., Oke, T.R. & Emery, W.J. (1989). Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing*, 10(11), 1699-1720, doi.org/10.1080/01431168908904002
- Salisbury, J. W. & D'Aria, D. M. (1992). Emissivity

- of terrestrial materials in the 8–14 μm atmospheric window. *Remote Sensing of Environment*, 42(2), 83-106, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90092-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90092-X)
- Sebbar, A., Hsaine, M, Fougrach, H. & Badri, W. (2012). Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc. *Actes du XXVème colloque de l'association internationale de climatologie*, Grenoble, France, 709-714
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., El-Kharraz, J., Gómez, M., Romaguera, M. & Soria, G. (2010). Single-channel and two-channel methods for land surface temperature retrieval from DAIS data and its application to the Barrax site. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 215-230, <https://doi.org/10.1080/0143116031000115210>
- Sobrino, J. A. & Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring : Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2), 353-366, <https://doi.org/10.1080/014311600210876>
- Sobrino, J. A., Jimenez-Muoz, J. C., Soria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., Plaza, A. & Martinez, P. (2008). Land Surface Emissivity Retrieval From Different VNIR and TIR Sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), 316-327, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.904834>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C. & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434-440, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- Tang, H., & Li, Z. L. (2014). *Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared : Theory and Applications*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 281 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-642-42027-6>
- Troin, J.-F. (2011). Régionalisation et mondialisation au Maroc: interférences positives ou déséquilibres accrus ? *Méditerranée*, 116, 69-76, <https://doi.org/10.4000/mediterranee.5401>
- Van De Griend, A. A. & Owe, M. (1993). On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 14(6), 1119-1131, <https://doi.org/10.1080/01431169308904400>
- Walawender, J. P., Szymanowski, M., Hajto, M. J. & Bokwa, A. (2014). Land surface temperature patterns in the urban agglomeration of Krakow (Poland) derived from Landsat-7/ETM+ data. *Pure and Applied Geophysics*, 171(6), 913-940, <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0685-7>

Coordonnées des auteurs :

Nassima HASSANI
 Doctorante, Université de Lorraine
 LOTERR, F-57000 Metz, France
nassima.hassani@univ-lorraine.fr

Sébastien LEBAUT
 Maître de conférences, Université de Lorraine
 LOTERR, F-57000 Metz, France
sebastien.lebaut@univ-lorraine.fr

Gilles DROGUE
 Professeur, Université de Lorraine
 LOTERR, F-57000 Metz, France
gilles.drogue@univ-lorraine.fr

Said SGHIR
 Professeur, laboratoire de Recherche en Management du Territoire, Communication et Modélisation (MTCM), Université Sultan Moulay Slimane, Maroc
sghirs@yahoo.fr