

L'ESTIMATION DE L'IMPACT DES ESPACES VERTS ET DES SURFACES D'EAU SUR LE CLIMAT URBAIN ET LA TEMPERATURE DE SURFACE DU SOL (MILA, ALGÉRIE)

HALIMA GHERRAZ*, DJAMEL ALKAMA**

Mots-clés : Landsat TM/ETM⁺/OLI; îlot de fraîcheur de l'espace vert; îlot de fraîcheur de l'eau; lac de la retenue du Barrage; la température de surface du sol.

Quantifying the impact of green spaces and water bodies on urban climate and land surface temperature (Mila, Algeria). In urban areas, green spaces and water bodies have a positive effect on the urban climate and microclimate. Green spaces help regulate urban climate and reduce the urban heat island (UHI) by creating a cooling effect. Additionally, water bodies such as rivers, streams and lakes play an important role in creating urban cool islands (UCI). They are relatively more efficient than green spaces due to the high rate of evapotranspiration. The aim of this study is to evaluate the impact of the green cover and water bodies on the urban climate to mitigate the urban heat island. It analyzes their effects on land surface temperature (LST) due to the change of green cover and characteristics of water bodies as well. The study area is the region of Mila; seven urban areas surrounding the Beni Haroune dam's reservoir were chosen to constitute the case study. To achieve this aim, the green cool island of vegetation (GCI) which is the temperature difference in LST between green spaces and their environment was analyzed by estimating the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST) before and after the appearance of this reservoir. The urban cool island effect of the water body (UCI) was analyzed by applying UCI indices such as UCI scale, temperature difference, and UCI intensity. The results show a negative relationship between vegetation index and temperature on the one hand, and water index and temperature on the other hand, as well as an increase in green cover after the appearance of this water body due to the increase in annual precipitation. Results also show that forests and dense vegetation such as Zouagha, Grarem and Madyous have the most important cooling effect (GCI) especially in 2015 (Zouagha forest with 9.5°C, Grarem forest with 9.2°C and Madyous forest 7.7°C less than the temperature of the urban area). Furthermore, the larger water body is recorded in 2015 as having the highest value of urban cool island (0.0057 °C/m), so the larger water space is more useful in reducing the urban heat island. In addition to that, a more complex water space is found to be more efficient than a simple one.

1. INTRODUCTION

Le désir de vivre ensemble dans des groupes était la principale raison de la croissance de grandes villes. Aujourd'hui, plus de 50% de la population mondiale vit dans les villes, un pourcentage qui continue à s'élever, en particulier dans les pays développés (United Nations, 2011). L'urbanisation est un processus qui influe sur la biodiversité, les écosystèmes, les climats régionaux et les microclimats. La démesure de cette dernière entraîne une diminution sévère des espaces verts et une augmentation rapide de la surface construite (Guo *et al.*, 2012; Landsberg, 1981). Il est clair que, ces surfaces construites sont caractérisées par un albédo faible, une imperméabilité élevée et des propriétés thermiques favorables pour le stockage d'énergie et le dégagement de chaleur (Pena, 2008). Ce manifeste rend le cœur de la ville plus chaud que sa périphérie. Un phénomène qui donne l'îlot de chaleur urbain (ICU), ce dernier est défini comme événement lorsque la zone urbaine est plus chaude

* PhD Student, Département d'architecture, laboratoire LACOMOFA, Université de Biskra, Algérie, halima.gherraz@gmail.com.

** Professeur, Département d'architecture, Université 8 Mai 1945 de Guelma, Algérie, dj.alkama@gmail.com.

que la périphérie. Les émissions de chaleur anthropique et le chauffage solaire indirect sont les principales raisons de l'effet de l'îlot de chaleur urbain. En outre, cette situation est causée par l'impulsion de plusieurs facteurs, tels que la pollution atmosphérique, le manque de végétation et de plans d'eau et le dégagement de chaleur excessive stocké par les constructions (Santamouris, 2014; Ridd, 1995).

La température de surface du sol a été considérée comme un facteur primordial pour examiner le bilan énergétique de surface et évaluer l'effet ICU de surface (Friedl, 2002; Weng & Fu, 2014; Weng *et al.*, 2004). Elle aide également à étudier les risques liés à la chaleur et à la susceptibilité dans les villes (Harlan *et al.*, 2006). L'augmentation de cette température est principalement influencée par les interactions d'énergie entre l'atmosphère et la surface de la Terre (Dousset & Gourmelon, 2003).

Les données de télédétection ont été largement utilisées pour analyser l'effet ICU dans de nombreuses études, en plus des données obtenues à partir de mesures au sol. La première observation d'ICU de la surface du sol utilisant des données de capteurs satellitaires a été signalée par Rao (1972), qui a exploré la possibilité de distinguer les régions urbaines sur la base de données infrarouges thermiques (TIR) acquises par un capteur. Depuis lors, diverses combinaisons de capteurs et de plates-formes basées sur des satellites ont été utilisées pour les observations à distance (Dousset & Gourmelon, 2003; Aniello *et al.*, 1995; Mathew *et al.*, 2017).

Les arbres et les plantes en tant qu'éléments importants du système terrestre, aident à réguler le climat urbain et atténuer l'îlot de chaleur urbain à travers la création d'un effet de fraîcheur en donnant de l'oxygène, absorbant le dioxyde de carbone, minimisant et interceptant les rayons solaires, générant de l'ombre et absorbant les flux de radiations (Kong *et al.*, 2014, Taha *et al.*, 1988; Oliveira *et al.*, 2011). En outre, le type, la densité, la taille et la forme des espaces verts et la zone d'ombre sont tous des paramètres importants pour déterminer l'effet de fraîcheur (Giridharan *et al.*, 2008). Les surfaces vertes peuvent effectivement contribuer à la réduction des températures plus élevées causées par les effets de l'îlot de chaleur urbain en maintenant sa température plus froide. Ils prolongent également cet effet de fraîcheur au-delà des limites de ces surfaces (Tan & Li, 2013).

Plusieurs études ont évalué l'impact des parcs et des espaces verts sur le microclimat, ils ont constaté que la réduction de la température dans un environnement urbain arboré peut atteindre jusqu'à 4°C. L'étude de Bernatzky à Frankfurt (Allemagne) a montré qu'une place urbaine abaisse la température de l'air de 3°C à 3,5°C et augmente l'humidité relative de 5% à 10%, elle purifie l'air pollué et le transforme en air frais dans le centre-ville (Gherraz *et al.*, 2018). Certaines études ont utilisé la télédétection pour estimer la température de la surface du sol et la couverture végétale pour un certain nombre de localités urbaines différentes. De nombreuses études suivant cette approche ont trouvé une corrélation négative entre les indices de végétation tels que l'indice de végétation à différence normalisée NDVI et la température de surface du sol (Hung *et al.*, 2006; Tiangco *et al.*, 2008). Cela confirme l'hypothèse qui énonce la couverture verte efficace pour réduire la température.

L'eau de surface génère un îlot de fraîcheur urbain (urban cool island UCI) pour atténuer les effets de l'îlot de chaleur urbain (Rizwan *et al.*, 2008; Bowler *et al.*, 2010; Chang *et al.*, 2007; Cao *et al.*, 2010). Les plans d'eau sont connus pour être le meilleur absorbeur de radiations et fournissent un refroidissement par évaporation; l'eau s'évapore lorsque le rayonnement solaire atteint la surface de l'eau et élimine la chaleur, refroidissant ainsi les éléments environnants. La disponibilité accrue d'augmentations d'eau d'évaporation et l'absorption de chaleur latente associée offrent un refroidissement supplémentaire pendant la journée (Wilson *et al.*, 2003). L'influence des caractéristiques de l'eau de surface sur la transformation des flux de chaleur sensibles et latents est très importante pour le microclimat urbain. La capacité calorifique élevée de l'eau forme les «effets thermostatiques» de la surface de l'eau par rapport aux matériaux des corps voisins. De plus, il absorbe moins de chaleur que les surfaces et les bâtiments imperméables. Comme il possède de moins en moins de surfaces qui absorbent et stockent les énergies sous rayonnement solaire (Zhou & Shu, 1994; Oke, 1987). Les plans

d'eau sont utilisés comme outils de conception essentiels à la planification scientifique pour contrôler le confort extérieur en milieu urbain (Coutts *et al.*, 2013). L'utilisation de matériaux à fort albédo sur les surfaces extérieures des bâtiments, l'amélioration de la porosité de surfaces et les caractéristiques des eaux intérieures urbaines telles que les lacs et les rivières sont considérés comme des moyens efficaces pour atténuer l'effet de ICU (Hathway & Sharples, 2012).

Les chercheurs ont prouvé que les plans d'eau possèdent un îlot de fraîcheur urbain évident. Adams et Dove (1989) ont constaté qu'une rivière de 35 m de large provoquait une chute de la température ambiante de 1°C à 1,5°C. Une chute de température plus importante pourrait être obtenue si la rivière était associée à une bande de verdure (Adams & Dove, 1989). Il est à signaler que d'autres études déclarent que les températures peuvent être diminuées d'environ 1°C à 2°C par rapport aux zones environnantes grâce à l'existence d'une surface d'eau, avec la plus grande baisse de température observée au cours de la journée (Coutts *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2009; Nishimura *et al.*, 1998). Chen *et al.* (2009) explique cette réduction de température par l'évaporation du plan d'eau. En outre, Saaroni & Ziv (2003) ont montré qu'un lac d'eau a un effet de fraîcheur (atténuation de la température par 1,6°C à la mi-journée) sur la partie la plus chaude d'une journée, car la surface du lac était en quelque sorte plus fraîche que la couverture herbeuse du parc environnant, et les influences de refroidissement diurne étaient clairement évidentes dans des conditions météorologiques étouffantes, chaudes et sèches (Coutts *et al.*, 2013).

Les études récentes sur les impacts positifs et négatifs des lacs de retenue des barrages sur l'environnement traitent souvent de leurs impacts sur le climat local et régional. Dans la plupart des études menées dans divers pays et zones climatiques (Phillips & McCulloch, 1972; Baxter & Glaude, 1980; Boakye, 2001; Miller *et al.*, 2005; Degu *et al.*, 2011; Kellogg & Zhou, 2014), ils confirment que les lacs affectent souvent le climat au niveau local. Ils montrent que les taux d'humidité augmentent près de grands lacs de retenue des barrages et que les différences de température annuelles diminuent; cependant, les valeurs de précipitation n'ont pas varié de manière significative. Ils ont constaté aussi que la quantité de changement dans le taux des éléments climatiques mentionnés devenait plus petite à mesure que la distance aux lacs de retenue augmentait. Des résultats contrastés dans ces études peuvent être expliqués avec la méthode de recherche, les données d'étude et les zones climatiques sélectionnées pour l'étude dans une mesure considérable. Par exemple, l'étude de Degu *et al.* (2011) indique que l'influence des grands lacs de retenue des barrages est la plus forte sur le climat local dans les climats méditerranéens et semi-arides, tandis que cette influence est signalée à un niveau minimum dans les climats humides. Une autre étude a été faite sur le lac de retenue du barrage de Keban en Turquie, situé sur l'Euphrate. Le lac a commencé à être planifié dans les années 1930, mais sa construction a été achevée après les années 1970, les résultats indiquent que les valeurs moyennes de la température augmentaient considérablement, notamment, pendant la saison chaude et froide après la construction du barrage. Donc selon cette étude les lacs de retenue peuvent créer leurs propres conditions climatiques (Kum, 2016).

Le barrage de Beni Haroun à Mila (bassin du Kebir-Rhumel), d'une capacité de 963 m³, présente actuellement le plus imposant aménagement hydraulique réalisé en Algérie, sa mise en eau a commencé en Août 2003. Cette grande étendue d'eau a constitué le cas d'étude de plusieurs recherches scientifiques qui sont portées généralement sur les apports hydrologiques, les complexités géologiques et morphologiques du barrage, la qualité de l'eau et la pollution (Kerdoud, 2006; Marouf, 2012; Boulahbel & Mebarki, 2013). Alors que, les études sur le climat se limitent à la recherche de l'impact du lac de la retenue sur les changements de précipitations et d'humidité. Dans leur étude Chebbah & Kabour (2018) ont évalué l'impact de la retenue d'un barrage sur le régime climatique local, à travers le choix de cinq stations climatiques réparties autour de la retenue, ils ont montré que cette retenue du a exercé un effet palpable sur les paramètres climatiques de la région, principalement l'augmentation des précipitations au niveau annuel pour les stations les plus proches (Béni-Haroun, Hamala, Mechta Serradj) et créé l'inverse pour les stations situées plus loin de la retenue (El Kheneg,

Ain Tinn), ainsi que l'abaissement de la température moyenne mensuelle dans toutes les stations examinées (Chebbah & Kabour, 2018).

L'objectif de cette recherche est d'évaluer l'impact de la couverture végétale et du lac de la retenue du barrage de Beni Haroun sur le climat urbain pour atténuer l'îlot de chaleur urbain (ICU), en analysant leurs effets sur la température de surface du sol (LST) dus au changement de couverture végétale et aux caractéristiques du lac de retenue à l'aide de la technique de télédétection. Sept centres urbains entourent le lac de retenue font objet de notre investigation à savoir Mila, Grarem Gouga, Hamala, Chigara, Terrai Bainan, Zeghaia et Sidi Merouen. Plusieurs indices ont été estimés pour évaluer l'effet de rafraîchissement de l'espace vert et de l'eau sur les centres urbains avant et après l'apparition de ce lac de retenue. Il est à signaler qu'il n'existe pas des études faites sur ce sujet en utilisant la télédétection auparavant.

2. CAS D'ÉTUDE

Le cas d'étude se situe au Nord-Est de l'Algérie sur oued El-kébir, à environ 40 km de la mer méditerranéenne (Fig. 1). Un site à relief accidenté, montrant des contrastes topographiques remarquables, avec des massifs culminants à des hauteurs élevées (Fig. 2). La région se distingue par sa vocation agricole dont la superficie agricole utile est de 239.150 ha, représentant plus de 63% des terres agricoles et bénéficiant d'une pluviométrie de près de 750 mm par ans au nord et de 400 mm par an au sud. Le terrain d'étude se compose de sept centres urbains à savoir Mila, Grarem Gouga, Hamala, Chigara, Terrai Bainan, Zeghaia et Sidi Merouen avec une différence de distance entre les centres urbains et le lac de retenue.

La capacité de stockage de ce barrage est de 963 millions m^3 , le volume de la tranche utile est de 723 millions m^3 répartis sur 7 725 km^2 de bassin-versant, le barrage reçoit les eaux de 3 rivières, celles d'Oued Rhumel, Oued Endja et Oued Smendou, En février 2012, il a atteint le volume de 1 milliard de m^3 d'eau soit 40 millions de m^3 au-delà de sa capacité d'objectif (Toumi & Remini, 2018) (Fig. 3).

La région de Mila est régie par trois microclimats, résultants de l'agencement des trois grands ensembles morphologiques, ces climats sont:

- ✓ Le climat humide, pour les reliefs montagneux du Nord et de la partie médiane, qui s'étend de Bouhatem à Aïn Tine (le climat de notre cas d'étude);
- ✓ Le climat semi-aride à subhumide, pour la partie médiane de la région (dépression et ses versants);
- ✓ Le climat semi-aride, pour les "hautes plaines".



Fig. 1 – La situation de cas d'étude.
Composition de sept centres urbains entourant le lac.

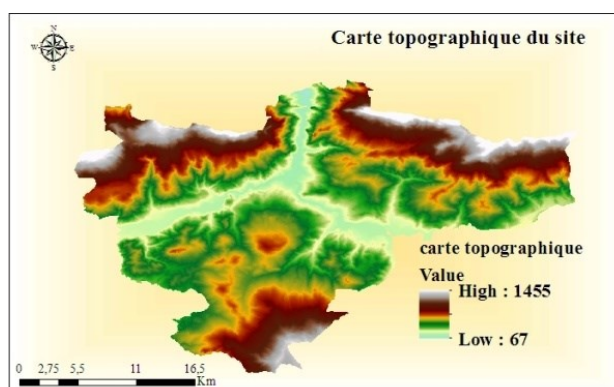


Fig. 2 – Carte topographique du site montre les altitudes et le bassin versant du lac.



Fig. 3 – Vue sur le lac de retenue du barrage de Béni Haroun.

Source: <https://www.radioalgerie.dz/news/fr/article/20180325/137359.html>.

3. MÉTHODOLOGIE

Afin d'évaluer l'impact de la couverture végétale et du lac de la retenue du barrage de Beni Haroun sur le climat urbain de la ville de Mila pour atténuer l'îlot de chaleur urbain (ICU) nous avons fait recours à la technique de télédétection. L'ensemble de données utilisées dans cette étude est une série chronologique d'images Landsat saisies par les capteurs Landsat 5TM, 7 ETM⁺ et 8 OLI/TIRS. Les informations sur les données sont présentées dans le Tableau 1. Les images ont été téléchargées en tant qu'ensemble de données géo-référencées à partir du site web de l'United States Geological Survey (USGS <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Ces images ont été acquises par des intervalles de 4 à 5 ans (avant et après la création du barrage) et au cours de la même saison (une composition de plusieurs images du mois de Juin; selon la disponibilité a été utilisée pour éviter de coïncider avec les conditions extrêmes et les vagues de chaleur). Le logiciel de traitement d'images utilisé est ArcGIS (version 10.5), dans le but est de générer des cartes de l'indice NDVI (l'Indice différentiel normalisée de l'eau), NDWI (l'Indice différentiel normalisée de végétation) et LST (température de surface du sol), afin d'estimer l'îlot de fraîcheur de l'espace vert (GCI) et de l'eau (UCI). D'un autre côté les images de Google Earth pro, nous ont servi pour faire la classification supervisée et générer les cartes de l'usage du sol, afin d'étudier les changements spatiotemporels de la couverture végétale, des centres urbains et du lac de la retenue, le calcul de l'indice de la forme du lac a pour objectif évaluer l'effet de la forme sur l'îlot de fraîcheur. Le processus méthodologique est présenté dans la Figure 4.

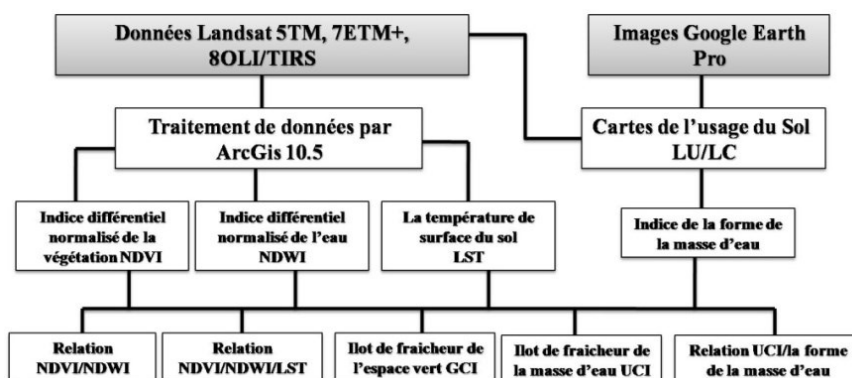


Fig. 4 – Processus méthodologique effectué dans cette étude.

3.1. Acquisition de données

Les données utilisées dans cette étude sont:

- Des images de satellite Landsat 5TM qui se composent de 6 bandes spectrales d'une résolution de 30 m et une bande infrarouge thermique d'une résolution de 120 m;
- Des images de Landsat 7 ETM⁺ qui se composent de 6 bandes spectrales d'une résolution de 30 m, une bande panchromatique d'une résolution de 15 m et une bande infrarouge thermique d'une résolution de 60 m;
- Et des images de Landsat 8 OLI/TIRS qui se composent de 8 bandes spectrales d'une résolution de 30 m, une bande panchromatique d'une résolution de 15 m et deux bandes infrarouges thermiques d'une résolution de 100 m.

Ces images ont été acquises par un intervalle de 4 à 5 ans et dans la même saison, une composition de plusieurs images (la moyenne) selon la disponibilité a été utilisée dans toutes les années sauf en 2005 et 2019 (il existe qu'une seule image). Le Tableau 1 présente les informations sur les dates et les heures d'acquisition, l'azimut et l'élévation du soleil au temps de capture, la couverture nuageuse et l'altitude de capteur.

Tableau 1

Les données des images acquises utilisées dans cette étude

satellite	DATE	Heure	Azimut du soleil	Elévation du soleil	Couverture nuageuse	Altitude Km
Landsat 7ETM ⁺	05 juin 2001	10:03:10	117.47641556	65.81188252	0.00	705
	21 juin 2001	10:02:58	114.64274787	65.72566725	0.00	705
	05 juin 2004	09:54:39	114.63456365	64.33716524	1.00	705
	21 juin 2004	09:55:07	112.19119004	64.30042551	2.00	705
Landsat 5TM	08 juin 2005	10:01:00	116.02550420	65.53776271	1.00	705
	06 juin 2010	10:04:11	117.69946590	66.05085550	0.00	705
	22 juin 2010	10:04:06	115.01243985	65.91165366	0.00	705
	04 juin 2015	10:12:40	121.57655502	67.47442604	0.81	705
Landsat 8OLI/TIRS	20 juin 2015	10:12:49	118.34941822	67.59134682	2.37	705
	15 juin 2019	10:13:20	119.19197089	67.78037943	1.00	705

3.2. Traitement et analyse de données

Les différents indices utilisés dans cette étude sont:

3.2.1. L'indice différentiel normalisé de l'eau (Normalized Difference Water Index NDWI)

Cet indice est utilisé pour l'analyse des masses d'eau. Le NDWI peut améliorer efficacement les informations sur l'eau dans la plupart des cas. Il est sensible à la construction de terrains et entraîne des masses d'eau surestimées. Les produits NDWI peuvent être utilisés conjointement avec les produits de changement NDVI pour évaluer le contexte des zones de changement apparent (Yun *et al.*, 2016). Il peut être calculé à l'aide de la formule suivante:

$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (1)$$

Connaissant que, NIR est la bande proche de l'infrarouge (Near Infrared), représentée par la bande 4 dans les images de Landsat 5TM et 7ETM⁺ et la bande 5 dans les images de Landsat 8OLI/TIRS;

- SWIR est la bande Infrarouge courte (Short-Wave Infrared), représentée par la bande 5 dans les images de Landsat 5TM et 7ETM⁺ et la bande 6 dans les images de Landsat 8OLI/TIRS.

Les valeurs des plans d'eau sont supérieures à 0,5. La végétation présente des valeurs beaucoup plus petites, ce qui permet de distinguer plus facilement la végétation des plans d'eau. Le bâti a des valeurs positives comprises entre zéro et 0,2. L'utilisation de cet indice est pour but d'analyser la croissance du lac de la retenue du barrage entre 2001 et 2019.

3.2.2. Indice différentiel normalisé de la végétation (Normalized Difference Vegetation Index NDVI)

C'est l'indice de végétation le plus utilisé, il est calculé à partir de la lumière visible et proche infrarouge réfléchi par la végétation. La végétation saine absorbe la plus grande partie de la lumière visible qui l'atteint et réfléchit une grande partie de la lumière proche infrarouge. Cependant, la végétation malsaine reflète plus de lumière visible et moins de lumière dans le proche infrarouge (Weier & Herring, 2000). Il est calculé à l'aide de cette formule:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (2)$$

Connaissant que NIR est la bande proche de l'infrarouge (Near Infrared), représentée par la bande 4 dans les images de Landsat 5TM et 7ETM⁺ et la bande 5 dans les images de Landsat 8 OLI/TIRS;

– Red est la bande rouge (Red Band), représentée par la bande 3 dans les images de Landsat 5TM et 7ETM⁺ et la bande 4 dans les images de Landsat 8OLI/TIRS.

Sachant que les valeurs de l'indice NDVI sont comprises en théorie entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondent aux surfaces non végétales comme la neige, l'eau ou les nuages. Pour les sols nus, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Quant aux formations végétales elles ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7, les valeurs les plus élevées correspondent aux couverts les plus denses.

L'indice NDVI nous offre la possibilité d'analyser le changement de la couverture végétale durant les années d'étude. Il a été corrélé avec la température de la surface du sol (LST) pour analyser l'effet de la couverture végétale sur la température de surface.

3.2.3. Température de surface du sol (Land Surface Temperature LST)

Cet indice joue un rôle important dans la physique de la surface terrestre car il est impliqué dans les processus d'échange d'énergie et d'eau avec l'atmosphère (Boudjellal & Bourbia, 2018). La température de surface de sol de notre cas d'étude a été extraite de la bande infrarouge thermique des images Landsat (la bande 6 de Landsat 5TM et 7 ETM⁺ et les deux bandes 10 et 11 de Landsat 8 OLI/TIRS). L'approche utilisée pour la récupération du LST est un algorithme simple à canal unique qui peut être utilisé pour des images à grande résolution. La méthode intègre les valeurs du profil atmosphérique et l'émissivité obtenues à partir de l'indice NDVI, améliorant ainsi la précision de l'extraction. Étant donné que la période considérée pour l'étude va de 2001 à 2019 et que l'ensemble de données utilisé est de Landsat 5TM, 7ETM⁺ et 8 OLI / TIRS, une méthode d'extraction LST qui peut être appliquée à des capteurs avec des données à bande thermique unique a été adaptée pour l'étude.

Cet indice a été utilisé pour estimer les îlots de fraîcheur de l'espace vert et de l'eau, il nous offre des informations pour analyser la distribution spatiale de la température de surface du sol durant la période entre 2001 et 2019.

3.2.4. Estimation de l'îlot de fraîcheur de l'espace vert (green cool island GCI)

Il s'avère que, l'effet de l'îlot de fraîcheur des espaces verts a été largement investi. Jusuf *et al.* (2007) ont étudié la distribution de la température de l'air à Singapour en utilisant des données de télédétection et des données de mobiles. Il a été constaté que la température était significativement corrélée aux caractéristiques du sol; elle a diminué à mesure que la densité de la verdure augmentait (Jusuf *et al.*, 2007). La végétation pourrait compenser le réchauffement atmosphérique d'environ 0,6°C sur terre sur une période de 30 ans (Bounoua *et al.*, 2010). En fine, l'effet de l'îlot de fraîcheur des espaces verts est évalué par la différence de température de surface du sol (LST) entre les espaces verts et leur environnement à l'aide de cette formule (Boudjellal & Bourbia, 2018):

$$GCI = \Delta LST = LST_U - LST_O \quad (3)$$

Connaissant que LST_O représente la valeur LST moyenne à l'intérieur de la classe de végétation et LST_U représente la moyenne de LST dans la zone urbaine.

3.2.5. Estimation de l'îlot de fraîcheur urbain de l'eau (urban cool island UCI)

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain est la différence entre la température de milieu urbain et la température de milieux alentours (Oke, 1973). De même, l'îlot de fraîcheur urbain de l'eau (UCI) est défini comme la différence de température entre la d'eau et son environnement. Dans cette étude nous avons estimé l'indice UCI à travers:

- L'échelle de l'îlot de fraîcheur de l'eau est la distance entre la limite de la surface d'eau et une zone tampon ayant la température maximale au premier point d'inflexion ;
- La différence de température ΔT_{est} la valeur de différence entre la température moyenne des espaces d'eau et la température moyenne de chaque centre urbain.
- L'intensité de l'îlot de fraîcheur de l'eau est la différence de température par unité de distance.

3.2.6. L'estimation de l'indice de la forme d'eau

L'étude des caractéristiques de la surface d'eau concerne les indices structurels. La température moyenne du plan d'eau, la surface, le périmètre, la largeur et la forme ont été déterminés en tant que caractéristiques structurelles. Les formes des plans d'eau ont été estimées à l'aide de l'indice de forme. Cette dernière signifie que dans le cas où le cercle parfait vaut 1, le carré vaut 1,13. En d'autres termes, plus la valeur est complexe, plus l'augmentation à l'infini est élevée (McGarigal & Marks, 1995). Ceci donne la possibilité de calculer l'indice de la forme à travers la formule suivante:

$$\text{Indice de la forme} = \frac{\text{Perimetre}}{2\sqrt{\text{surface} \times \pi}} \quad (4)$$

Cet indice sera utilisé pour estimer l'effet de la complexité de la forme du lac de la retenue sur l'îlot de fraîcheur urbain de l'eau.

4. RÉSULTATS ET ANALYSE

4.1. Production des cartes de l'usage du sol

La région de Mila est une région agricole par excellence, son couvert végétal occupe une superficie de 36674,7 ha, soit un taux de couverture de 09,68% par rapport à la superficie totale, la majorité de ce couvert se localise dans le nord qui se caractérise par un climat humide.

Les données de télédétection sont couramment utilisées pour la cartographie de l'usage du sol. La technique appliquée dans cette étude est la classification supervisée de la probabilité maximale (maximum likelihood classification). Ce type de classification est généralement utilisé dans une variété d'applications. Les avantages de cette méthode en tant que classificateur paramétrique c'est qu'elle prend en compte la variance-covariance au sein des distributions des classes, elle est plus performante que les autres classifications paramétriques établies. Ces cartes nous offrent d'informations sur les changements spatiotemporels de l'usage du sol entre 2001 et 2019 et nous aident à calculer l'indice de la forme du lac (Fig. 5).

Les cartes dans la Figure 5 présentent une dominance des terres nues et agricoles par rapport aux zones urbaines et à la couverture végétale. Les résultats affirment une augmentation importante de la surface du lac de la retenue qui a pris la forme du bassin versant en s'étalant sur deux côtes et envahissant quelques zones urbaines. Une croissance assez considérable de la couverture végétale qui prédomine, notamment, dans la partie nord (Massif Forestier de Zouagha, Bas Versant de Tamezguida-Zouagha, bas piémonts de Grarem et les hauts Piémonts de Grarem). Et une autre croissance urbaine importante a été enregistrée au niveau de tous les centres urbains au détriment des terres agricoles.

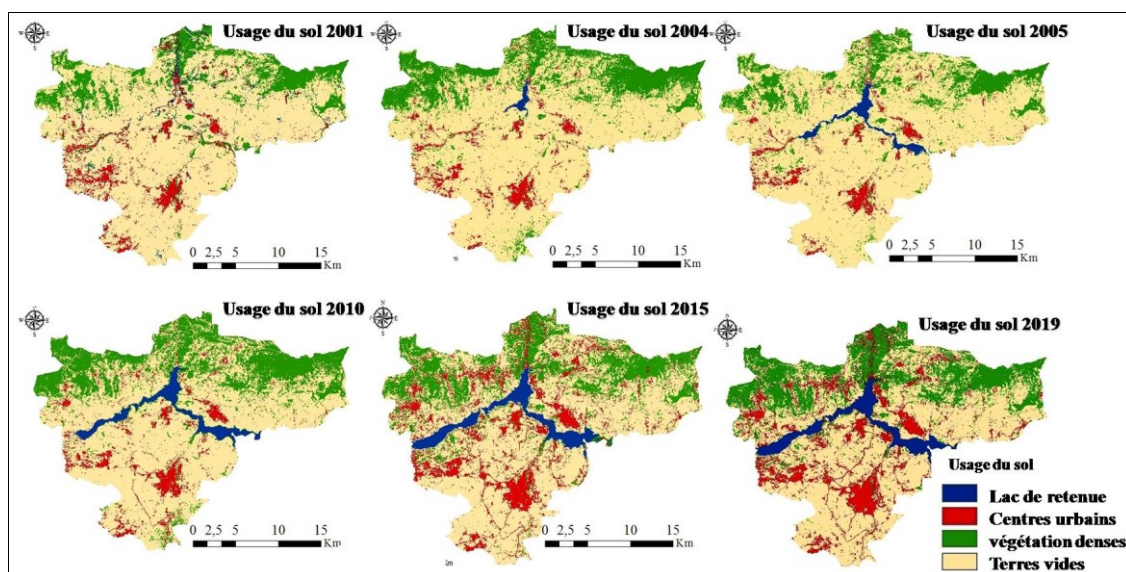


Fig. 5 – Cartes de l'usage du sol, de 2001, 2004, 2005, 2010, 2015 et 2019, respectivement, montrent les changements spatiotemporels de la couverture végétale, les centres urbains et le lac de la retenue.

4.2. Estimation de l'indice différentiel normalisé de la végétation NDVI

Les cartes de l'indice de NDVI dans la Figure 6 montrent une différence remarquable entre les années de cette période, une couverture végétale qui s'accroît d'une année à une autre spécialement dans la partie nord qui appartient au climat humide, les valeurs enregistrées de l'indice NDVI sont présentées dans le Tableau 2. Les valeurs basses de NDVI sont enregistrées au niveau du Lac de retenue tandis que les valeurs maximales sont enregistrées au niveau du Massif Forestier de Zouagha, Bas Versant de Tamezguida-Zouagha, et les hauts Piémonts de Grarem.

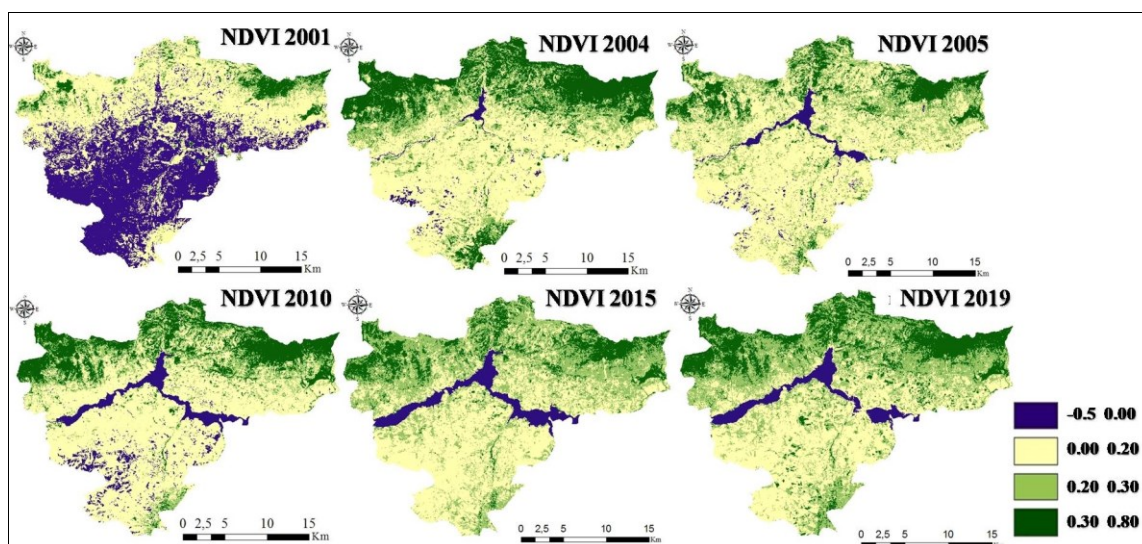


Fig. 6 – Cartes de l'indice de végétation NDVI des années 2001, 2004, 2005, 2010, 2015 et 2019, respectivement, montrent les changements de la couverture végétale entre 2001 et 2019.

Tableau 2

Les valeurs de l'indice NDVI enregistrées durant la période d'étude

NDVI	Juin 2001	Juin 2004	Juin 2005	Juin 2010	Juin 2015	Juin 2019
MIN	-0,49	-0,33	-0,4	-0,42	-0,15	-0,11
MOY	0,04	0,21	0,17	0,17	0,2	0,21
MAX	0,67	0,68	0,7	0,76	0,6	0,57

Les résultats affirment une dominance des valeurs négatives qui représentent les terres nues, les roches et les surfaces d'eau en 2001, une dominance de valeurs qui varient entre 00.00 et 0.2 qui représentent la végétation moins dense, notamment dans la partie sud de la zone d'étude en 2004, 2005 et 2010. Alors qu'une dominance des valeurs qui dépassent 0,3 et qui représentent la végétation dense en 2015 et 2019.

4.3. Estimation de l'indice différentiel normalisée de l'eau NDWI

Les cartes de NDWI dans la Figure 7 montrent une grande différence avant la mise en marche de barrage et après, la surface du lac d'eau s'agrandi d'une année à une autre, sachant que le barrage a atteint une réserve de 40 millions de m³ au-delà de sa capacité en 2012. Les valeurs de l'indice NDWI enregistrées sont présentées dans le Tableau 3. Les valeurs négatives présentent les terres nues, les centres urbains et les espaces verts, tandis que les valeurs positives présentent la surface d'Eau. Nous avons enregistré une croissance de la surface occupée par le lac de la retenue en pérennant la forme du bassin versant, la plus grande surface est celle de 2015 et 2019.

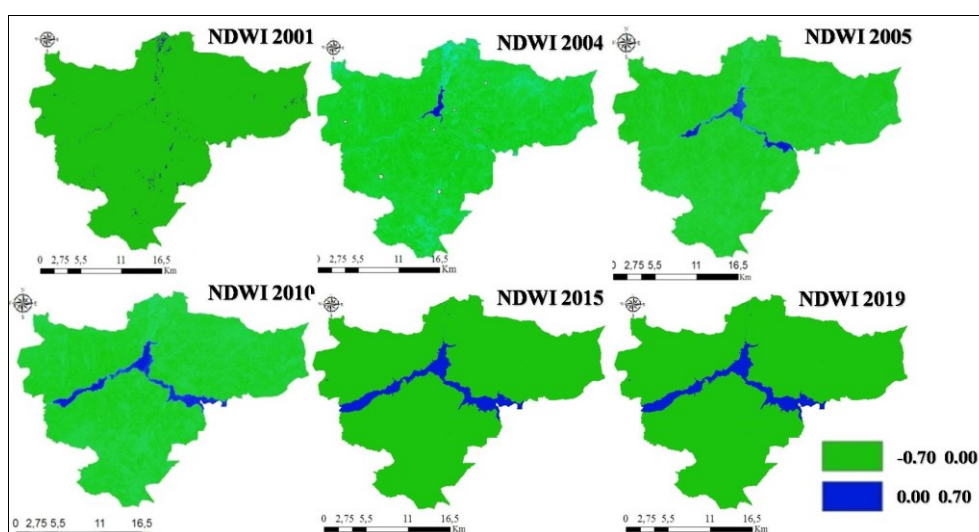


Fig. 7 – Carte de l'indice différentiel normalisé de l'eau NDWI de 2001, 2004, 2005, 2010, 2015 et 2019, respectivement, montrent la croissance de la retenue entre 2001 et 2019.

Tableau 3

Les valeurs de l'indice NDWI enregistrées durant la période d'étude

NDWI	Juin 2001	Juin 2004	Juin 2005	Juin 2010	Juin 2015	Juin 2019
MIN	-0,61	-0,59	-0,61	-0,63	-0,41	-0,37
MOY	-0,43	-0,46	-0,46	-0,43	-0,21	-0,19
MAX	0,53	0,46	0,72	0,67	0,39	0,23

4.4. Estimation de la température de surface du sol LST

Les cartes de température de surface du sol LST dans la Figure 8 montrent une variation remarquable avant et après l'apparition de ce grand lac de la retenue du barrage. Les valeurs de LST enregistrées sont présentées dans le Tableau 4. Les valeurs les plus basses sont enregistrées en 2004, alors que les valeurs les plus élevées sont enregistrées en 2015. La distribution spatiale des températures est presque la même dans toutes les années d'étude; les pics des températures sont enregistrés au niveau des terres vides et imperméables, les centres urbains adoptent les températures moyennes, alors que les basses valeurs sont enregistrées au niveau de la couverture végétale dense des forêts et la surface d'eau.

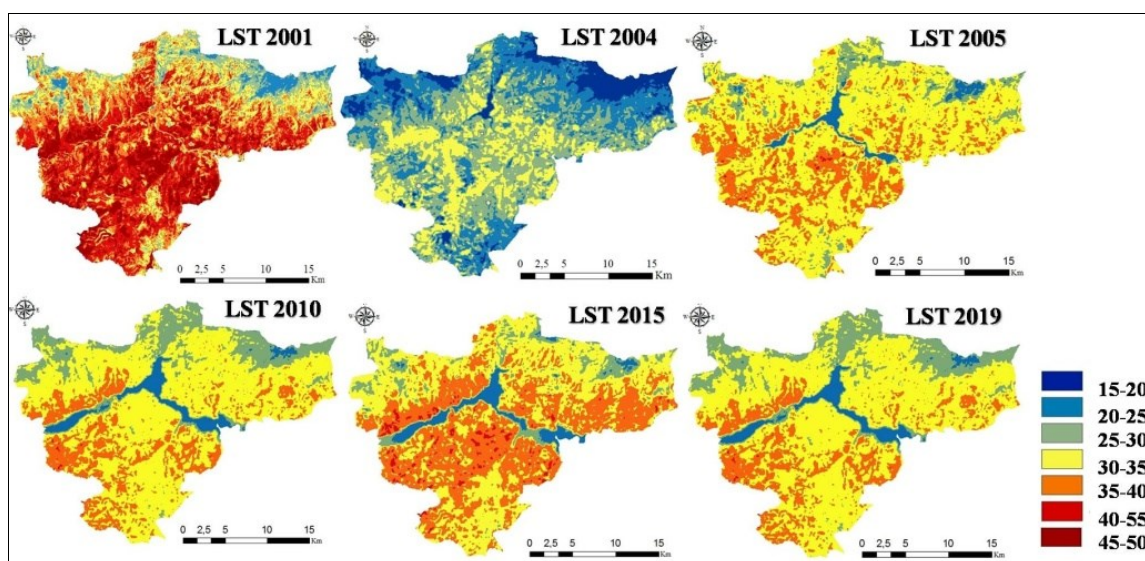


Fig. 8 – Cartes de la température de surface du sol LST de 2001, 2004, 2005, 2010, 2015 et 2019, respectivement.

4.5. Etude des caractéristiques de la forme du lac de la retenue

L'étude de la forme du lac de la retenue est pour but de révéler l'impact de la forme sur l'intensité de l'îlot de fraîcheur urbain. Les résultats de l'indice de la forme sont enregistrés dans le Tableau 5.

Tableau 4

Les valeurs de la température de surface du sol LST enregistrées durant la période d'étude

LST	Juin 2001	Juin 2004	Juin 2005	Juin 2010	Juin 2015	Juin 2019
MIN	22,8°C	15,1°C	19,2°C	19°C	21,6°C	21,4°C
MOY	39,9°C	25,4°C	33°C	32,8°C	34°C	32,3°C
MAX	49,3°C	34°C	43,7°C	43,8°C	43,4°C	41,4°C

Tableau 5

Caractéristiques de la forme du lac de la retenue durant la période d'étude.

Année	Périmètre	Largeur maximale	Surface	Indice de la forme
2004	18364	942	155230,8	13,14
2005	56130	2148	622816,4	20,06
2010	84586	2658	898047,2	25,17
2015	92420	2770	1065792,2	25,25
2019	90539	2749	1024144,9	25,23

Les successions des résultats enregistrés dans le Tableau 5, prédisent que la forme du barrage est une forme très compliquée, et cette complication s'augmente d'une année à une autre avec la croissance de la surface d'eau en prenant la forme du bassin versant, du périmètre et de la largeur, la forme la plus compliquée est celle de 2015 avec un indice égale à 25,25, tandis que la plus simple est celle de 2004, avec un indice égale à 13,14.

4.6. Analyse de la relation entre l'indice de végétation NDVI et l'indice de l'eau NDWI

L'analyse des cartes obtenues des deux indices NDVI et NDWI nous donne les résultats de changement spatial de la couverture végétale et la surface d'eau, qui sont présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6

Évolution de la surface du lac de la retenue et de l'espace vert durant la période d'étude.

Pourcentage %	2001	2004	2005	2010	2015	2019
Lac de la retenue	0,22	0,82	3,29	4,11	5,63	5,41
Terres nues et bâtis	79,36	64,52	60,50	54,76	38,85	40,15
Espace vert	20,42	34,66	36,21	40,80	55,52	54,44

L'interprétation des résultats du Tableau 6 énonce qu'une croissance remarquable a été enregistrée au niveau de la couverture végétale, qui s'est développé d'une année à une autre, passant de 20,47% en 2001 à 55,56% en 2015 au détriment des terres vides et imperméables, cette croissance était accompagnée par une croissance considérable au niveau du lac de la retenue passant de 0,22% avant la construction de barrage à 0.82% en 2004 après la mise en marche et arrivant jusqu'à 5,63% en 2015 quand le lac a atteint son niveau maximal (Fig. 9).

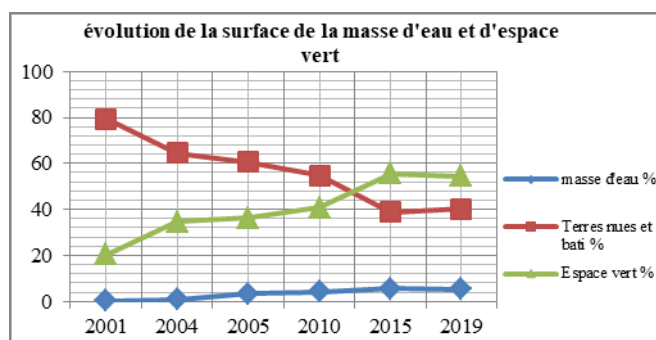


Fig. 9 – Évolution de la surface du lac et de l'espace vert durant la période 2001, 2019.

4.7. Analyse de la relation entre les indices NDVI, NDWI et LST

L'analyse de la relation entre les différents indices montre qu'une régression linéaire a été établie entre l'indice NDVI et la température LST. L'indice de végétation NDVI a montré une relation négative (inverse) avec la température de surface du sol LST. Le modèle de régression a été appliqué comme formule de conversion avec le coefficient de détermination $R^2=42,84\%$, $R^2=54,14\%$, $R^2=6,73\%$, $R^2=21,13\%$, $R^2=0,27\%$, $R^2=2,82\%$ obtenus respectivement en 2001, 2004, 2005, 2010, 2015 et 2019. Les différents espaces verts possèdent les températures les plus basses alors que les terres nues et imperméables possèdent les températures les plus élevées (Fig. 10).

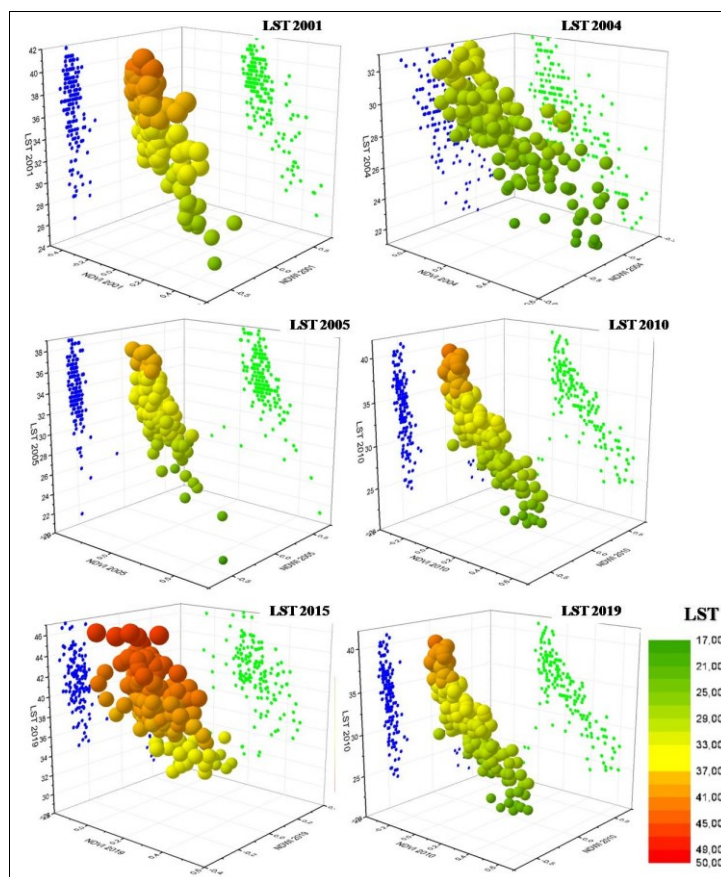


Fig. 10 – Corrélation entre les trois indices NDVI/NDWI/LST en 2001, 2004, 2005, 2010, 2015 et 2019, respectivement.

L'indice NDWI a montré une relation linéaire négative avec la température de surface LST, le modèle de régression a été appliqué comme formule de conversion avec le coefficient de détermination $R^2=2,84\%$, $R^2=23,21\%$, $R^2=28,48\%$, $R^2=28,93\%$; $R^2=49,04\%$; $R^2=43,75\%$ obtenus respectivement en 2001, 2004, 2005, 2010, 2015 et 2019. Nous avons constaté qu'il existe une très faible corrélation entre les deux indices en 2001, ça revient à la très petite surface d'eau (la présence des eaux des deux rivières avant la construction du barrage), la corrélation la plus forte est celle de 2015 enregistrée grâce à la plus grande surface du lac de le retenue (Fig. 10).

Les graphes de la Figure 10 montrent une corrélation 3D entre les trois indices, les surfaces ayant les valeurs basses de l'indice de végétation et l'indice de l'eau possèdent les valeurs les plus élevées de la température LST, alors que les espaces verts et les surfaces d'eau ayant les valeurs les plus élevées de l'indice de végétation et l'indice de l'eau respectivement possèdent les températures les plus basses.

4.8. Estimation de l'effet de fraîcheur de l'espace vert GCI

Cette étape nécessite l'extraction des valeurs de LST de chaque classe de végétation ainsi que les valeurs de LST de chaque centre urbain pour calculer l'îlot de fraîcheur de l'espace vert en utilisant la formule présentée précédemment. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7

Les valeurs de l'îlot de fraîcheur de l'espace vert (GCI) d'étude de chaque classe de végétation durant la période d'étude

	2001	2004	2005	2010	2015	2019
<i>Forêt de bas Versant de Tamezguida-Zouagha</i>	1,1°C	1,4°C	4,3°C	5,1°C	5,5°C	3,8°C
<i>Massif Forestier de Zouagha</i>	5,6°C	6,2°C	8,5°C	9,2°C	9,5°C	6,0°C
<i>Forêt bas piémonts de Grarem</i>	1,1°C	0,9°C	1,0°C	0,8°C	2,0°C	1,1°C
<i>Forêt Hauts Piémonts de Grarem</i>	7,1°C	7,4°C	6,0°C	7,7°C	9,2°C	3,9°C
<i>Forêt de Madyous (colline de Mila)</i>	4,1°C	4,2°C	6,0°C	6,4°C	7,7°C	6,6°C
<i>Berges du lac de la retenue</i>	-	0,5°C	3,0°C	3,5°C	4,4°C	2,9°C

Les températures enregistrées dans le Tableau 7 affirment les variations des îlots de fraîcheur de l'espace vert de chaque classe de végétation durant la période d'étude. Les valeurs maximales sont enregistrées en 2015.

Nous constatons que les deux forêts (le massif forestier de Zouagha et la forêt des hauts piémonts de Grarem) possèdent les îlots de fraîcheur les plus élevés, ce qui fait, ces deux denses forêts sont les espaces verts les plus influents. Les berges du lac possèdent les petites valeurs de l'îlot de fraîcheur qui s'augmentent avec la croissance de la surface du lac. La forêt d'El Madyous est une moins dense que les précédentes, elle se situe sur les bords du lac de la retenue, les résultats montrent que cette forêt possède un îlot de fraîcheur assez considérable qui atteint sa valeur maximale par 7,7°C en 2015. Quand à la forêt de bas versant de Tamezguida-Zouagha et la Forêt de bas piémonts de Grarem, elles possèdent des valeurs moyennes.

4.9. Estimation de l'intensité de l'îlot de fraîcheur urbain de l'eau (UCI)

Le Tableau 8 résume les valeurs de la température de surface du sol de chaque centre urbain et la température de l'eau dans la période entre 2001 et 2019 afin de calculer la différence de température ΔT , la distance entre les limites du lac et chaque centre urbain qui représente la distance du point dont la température est changée (l'échelle de l'îlot de fraîcheur). Les données acquises sont utilisées pour calculer l'intensité de l'îlot de fraîcheur du lac, les résultats de cette dernière sont présentés dans le Tableau 9.

Tableau 8

Variations de LST moyenne (°C) de chaque centre urbain et l'échelle de l'îlot de fraîcheur durant la période d'étude

centre urbain	2001		2004		2005		2010		2015		2019	
	T (°C)	échelle (m)	T (°C)	échelle (m)	T (°C)	échelle (m)	T (°C)	échelle (m)	T (°C)	échelle (m)	T (°C)	échelle (m)
Mila	36,6	—	26,8	9670	33,2	6690	31,8	5940	33,1	5602	33	5560
S.merouen	36,8	—	26	1840	31,6	1050	30,4	1006	32,9	870	31	861
Grarem	38,2	—	27	5920	32,2	1990	31,6	1580	33,3	1490	32	1482
Sibari	36,8	—	26	1878	31,6	1070	31,3	890	33,1	680	31	675
Zeghaia	37,9	—	26,6	9215	32,6	4570	33	3600	33,5	3520	32,7	3510
Bainan	37,2	—	26,2	12520	33,2	6560	32,2	4150	33,2	3370	32,5	3365
Hamala	34	—	24,5	6540	31,2	6180	29,5	5830	31,2	5680	30	5673
chigara	37,7	—	26,5	3308	32,8	3260	32,6	3055	33,9	2960	32,9	2955
T du lac °C	—		19,5°C		21,5°C		21,3°C		23°C		22,3°C	

Les lectures des résultats enregistrés dans le Tableau 9 nous donnent à constater que les valeurs les plus élevées de l'intensité de l'îlot de fraîcheur de l'eau sont enregistrées à Sidi Merouene et Sibari, les centres urbains les plus proches au lac de la retenue, le centre urbain de Grarem Gouga (moins

proche que les autres précédents) possède des valeurs moyennes. Les valeurs les plus basse sont enregistrées au niveau de Bainan le centre urbain le plus loin parmi les autres (Fig. 11). Nous constatons aussi que l'intensité de l'îlot de fraîcheur la plus élevée est celle de 2015, causée par la plus grande surface du lac de la retenue du barrage.

Tableau 9

Les valeurs de l'intensité de l'îlot de fraîcheur de l'eau (T/échelle) pour chaque centre urbain

	Intensité UCI (C°/m) 2004	Intensité UCI (C°/m) 2005	Intensité UCI (C°/m) 2010	Intensité UCI (C°/m) 2015	Intensité UCI (C°/m) 2019
Mila	0,0007	0,0017	0,0017	0,0019	0,0018
S.Merouen	0,0035	0,0096	0,0090	0,0113	0,0101
Grarem	0,0012	0,0053	0,0065	0,0069	0,0065
Sibari	0,0034	0,0094	0,0147	0,0148	0,0128
Zeghaia	0,0007	0,0024	0,0032	0,0029	0,0028
Bainan	0,0005	0,0017	0,0026	0,0030	0,0029
Hamala	0,0007	0,0015	0,0014	0,0014	0,0013
Chigara	0,0021	0,0034	0,0036	0,0037	0,0035
La moyenne	0.0015	0.0043	0.0052	0.0057	0.0053

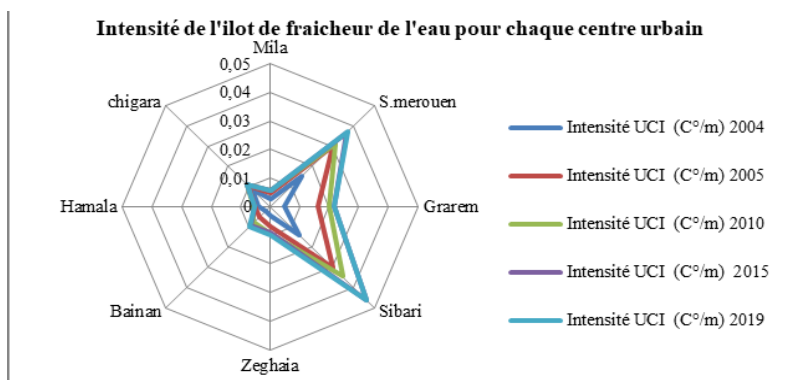


Fig. 11 – Intensité de l'îlot de fraîcheur urbain pour chaque centre urbain durant la période de l'étude.

4.10. Étude de la relation entre l'intensité de l'îlot de fraîcheur de l'eau et l'indice de la forme

Après avoir estimé l'intensité de l'îlot de fraîcheur urbain et l'indice de la forme du lac, il nous paraît nécessaire d'évaluer la relation entre les deux indices pour comprendre comment les caractéristiques de la forme peuvent influencer sur l'îlot de fraîcheur. Le Tableau 10 résume les données des deux indices et les résultats de la corrélation sont présentés par le Figure 12.

Tableau 10

Relation entre l'indice de la forme et l'îlot de fraîcheur urbain de l'eau

	2004	2005	2010	2015	2019
Indice de la forme	13,14	20,06	25,17	25,25	25,23
Ilot de fraîcheur moyen	0,0015	0,0043	0,0052	0,0057	0,0053

En somme, une régression linéaire a été établie entre l'indice de la forme et l'îlot de fraîcheur urbain. Les résultats acquis montrent une forte relation positive entre les deux indices, le modèle de régression a été appliqué comme formule de conversion avec un coefficient de détermination $R^2=96,7\%$ (Fig. 12). La forme la plus simple est celle de 2004 qui porte la valeur minimale de l'îlot de

fraîcheur UCI, alors que la forme la plus complexe est celle de 2015 en portant les valeurs maximales de l'îlot de fraîcheur, cela indique que les caractéristiques de la forme du lac influencent sur l'intensité de l'îlot de fraîcheur UCI positivement; les formes les plus complexes engendrent les valeurs les plus élevées de l'îlot de fraîcheur de l'eau.

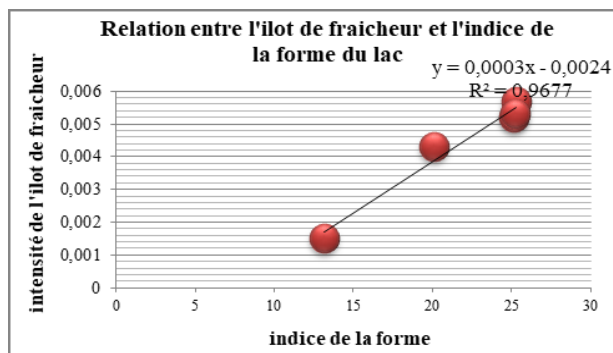


Fig. 12 – Relation entre l'îlot de fraîcheur urbain et l'indice de la forme du lac de la retenue.

5. DISCUSSION

5.1. Relation entre l'indice de végétation NDVI et l'indice de l'eau NDWI

Les résultats montrent une croissance de la couverture végétale durant la période d'étude notamment dans la partie nord qui appartient à un climat humide (Massif Forestier de Zouagha, Bas Versant de Tamezguida-Zouagha, bas piémonts de Grarem et les hauts Piémonts de Grarem). L'étude de Chebbah & Kabour (2018) a montré que la retenue du barrage a exercé un effet clair sur les paramètres climatiques de la région, principalement l'augmentation des précipitations au niveau annuel pour les stations les plus proches, cette augmentation influe particulièrement la couverture végétale de notre cas d'étude de fait que les centres sélectionnés sont les plus proches. Nous avons remarqué aussi l'apparition d'un nouveau type d'espace vert les berges du lac de la retenue qui possèdent un bon indice de végétation NDVI. La surface du lac a atteint son niveau maximal en 2015 (selon les données acquises et traitées), dont nous avons enregistré les valeurs les plus élevées des deux indices NDVI et NDWI.

5.2. Relation les indices NDVI/NDWI/LST

Le NDVI est un bon indicateur pour calculer l'impact du couvert végétal sur la température de surface du sol. Les chercheurs ont révélé que la végétation pourrait sensiblement réduire la température si le NDVI dépassait 0,35 (Mackey *et al.*, 2012). Dans notre étude, les résultats montrent qu'une forte relation négative a été établie entre les deux indices NDVI et LST dans la période entre 2001 et 2019. Les pics de températures sont enregistrés dans les terres nues, imperméables et non végétalisées, alors que les valeurs basses sont enregistrées au niveau des forêts denses et au niveau de la retenue. En conséquence, l'augmentation de la couverture végétale diminue les températures de surface du sol LST.

Une relation forte négative a été établie aussi entre les deux indices NDWI et LST, les résultats montrent que l'accroissement de la surface de la retenue abaisse la température des surfaces environnantes. Les pics des températures sont enregistrés dans les surfaces situées loin du lac.

De notre étude, on constate que les espaces verts et les surfaces d'eau sont des éléments qui affectent positivement le climat urbain et le microclimat surtout s'ils se rejoignent.

5.3. L'îlot de fraîcheur de l'espace vert (GCI)

Le massif forestier de Zouagha, les Forêts de bas Versant de tamezguida-Zouagha, et les Forêt de bas piémonts de Grarem sont les espaces verts les plus influents en ayant les îlots de fraîcheur les plus élevés, causé par la grande densité de ces forêts. Les espaces les moins influents sont les berges de la retenue du barrage en raison de la faible densité et le type de végétation. La forêt de Madyous qui se localise au bord du lac possède un îlot de fraîcheur très important malgré qu'elle n'est pas assez dense, donc on constate que la densité et la position de l'espace vert par rapport au lac sont des éléments très important dans la détermination de l'effet de végétation sur l'îlot de chaleur urbain.

5.4. L'îlot de fraîcheur urbain de l'eau (UCI)

Dans son étude sur l'îlot de fraîcheur urbain des lacs et des cours d'eau à la Corée, Lee *et al.* (2016) a montré que dans le cas des cours d'eau, l'augmentation de la longueur du flux avec une forme simplifiée est plus préférable pour plus de différence de température et d'intensité UCI (les résultats de son étude sont $0,003^{\circ}\text{C}/\text{m}$ pour les cours d'eau et $0,005^{\circ}\text{C}/\text{m}$ pour les lacs). Par conséquent, si la superficie du cours d'eau est augmentée par la présence d'un espace vert, l'effet de l'UCI pourrait augmenter davantage. Tandis que pour les lacs, la taille est un élément important pour expliquer la réduction de la température de l'air. De plus, contrairement aux cours d'eau, une forme plus complexe est préférable pour l'UCI (Lee *et al.*, 2016). Les résultats de notre analyse montrent qu'une relation négative a été établie entre l'intensité de l'îlot de fraîcheur et la distance, autrement dit, l'intensité de l'îlot de fraîcheur urbain augmente lorsque la distance entre les limites du lac et les centres urbains diminue, et vice versa, donc les centres urbains les plus proches sont les espaces qui bénéficient en premier par l'effet de l'îlot de fraîcheur.

En plus, la taille du lac de la retenue influe positivement sur l'intensité d'UCI, la forme du lac est une forme très complexe, cette complexité aide à élever l'effet de fraîcheur davantage et réduire la température de surface du sol. C'est une forme naturelle soumise aux caractéristiques du site qui favorisent l'augmentation de la complication de la forme.

6. CONCLUSIONS

En sus de conclusion, il s'avère que, les espaces verts et les plans d'eau en milieu urbain ont des effets évidents sur la réduction de la température de l'air par évapotranspiration. Le travail présent tend à évaluer l'effet de l'espace vert et le lac de retenue du barrage de Beni Haroune à Mila sur le climat urbain pour atténuer l'îlot de chaleur urbain. Les recherches précédentes sur cette retenue du barrage de Beni Haroun sont portées généralement sur les apports hydrologiques, les complexités géologiques et morphologiques du barrage, la qualité de l'eau et la pollution, et des études climatiques qui ont montré l'augmentation des précipitations annuelles. Nos résultats d'étude montrent que le lac qui possède un îlot de fraîcheur de $0.0057^{\circ}\text{C}/\text{m}$ a entraîné un effet positif sur la couverture végétale, et le climat local de la ville, les forêts denses peuvent réduire la température de la zone urbaine par $9,5^{\circ}\text{C}$ (le massif forestier de Zouagha) et $9,2^{\circ}\text{C}$ (la Forêt Hauts Piémonts de Grarem). Notre étude contribue à fournir un outil scientifique pour planifier de manière optimale le développement d'une ville de telle sorte que l'effet de l'îlot de chaleur urbain soit minimisé en fournissant diverses stratégies d'atténuation comme la végétation et les plans d'eau. Notre étude peut aider les urbanistes à comprendre la formation d'un îlot de fraîcheur pour concevoir des espaces verts et des plans d'eau frais.

La télédétection nous a offert un moyen pertinent pour atteindre l'objectif visé, des images de Landsat 5TM, 7ETM⁺ et Landsat 8 OLI/TIRS ont été téléchargées et analysées par le logiciel ArcGis 10.5 afin d'extraire l'indice de végétation, l'indice de l'eau et la température de surface du sol, puis estimer les îlots de fraîcheur de l'espace vert et de la surface d'eau d'une zone d'étude composée de sept centres urbains autour le lac de retenue, à savoir Mila, Grarem Gouga, Hamala, Chigara, Terrai Bainan, Zeghaia et Sidi Merouen.

Plus loin encore, l'analyse de l'indice de végétation NDVI affirme un accroissement de la couverture végétale accompagnée par la croissance de surface du lac de la retenue, par conséquent l'augmentation de taux de précipitations annuelles qui ont influencé positivement le couvert végétal, nous avons enregistré des valeurs maximales de l'indice NDVI et NDWI en 2015 et 2019.

Les études précédentes sur l'effet de la végétation sur le microclimat confirment qu'il existe des relations linéaires évidentes entre la température de l'air, les îlots de chaleur urbains et les espaces verts. La température de l'air et l'îlot de chaleur urbain diminuent linéairement avec l'augmentation de l'espace vert urbain. Nous avons confirmé que la végétation montre une relation négative avec LST, en analysant les cartes de la distribution spatiale de LST, les pics de température sont enregistrés toujours au niveau des surfaces imperméables et les surface non végétalisées. Les résultats montrent que la température de surface du sol correspond étroitement à la distribution de la couverture végétale. Nous confirmons que la végétation forestière dense possède un îlot de fraîcheur mieux que celui de la végétation urbaine et la végétation des berges du lac, le massif forestier de Zouagha (9,5°C en 2015) et les Forêts des hauts Piémonts de Grarem (9,2°C en 2015) sont les espaces verts les plus influents. Alors, l'effet de fraîcheur de la végétation sur la température de l'air et l'îlot de chaleur urbain pourrait toujours être contrôlé car il est déterminé par les différences inhérentes des surfaces sous-jacentes, y compris l'albédo, l'absorption et le stockage de la chaleur, l'évapotranspiration.

La surveillance précise des plans d'eau est une application importante et fondamentale de la télédétection. Diverses approches de cartographie des plans d'eau ont été développées pour extraire des plans d'eau à partir d'images multi-spectrales. La méthode basée sur l'indice spectral de l'eau, en particulier l'indice d'eau à différence normalisée (NDWI) calculé à partir des bandes verte et infrarouge courte (SWIR) est l'une des méthodes les plus populaires.

L'eau qui a une température plus basse par rapport à son environnement fonctionnera toujours comme facteur de rafraîchissement et vice versa. Les surfaces d'eau possèdent un îlot de fraîcheur urbain moins important que celui de l'espace vert, les résultats indiquent que l'intensité de l'îlot de fraîcheur de l'eau dépend de la distance entre la surface d'eau et les centres urbains, nous avons confirmé que les îlots de fraîcheur les plus élevés sont enregistrés à Sidi Merouene (0,0113°C/m en 2015) et Sibari (0,0148°C/m en 2015) les centres les plus proches. Dans leur étude Adams et Dove (1989) ont constaté qu'une rivière de 35 m de large provoquait une chute de la température ambiante de 1°C à 1,5°C. Une chute de température plus importante pourrait être obtenue si la rivière était associée à une bande de verdure (Adams & Dove, 1989), dans notre étude, on constate qu'une petite forêt (Madyous) située au bord du lac peut réduire la température par 7,7°C grâce à sa situation. En outre, les résultats montrent que la complexité de la forme de plans d'eau est un facteur très important dans la détermination de l'îlot de fraîcheur, un lac qui a une forme plus complexe possède un îlot de fraîcheur plus important.

Nous concluons que les méthodes efficaces pour réduire la température de l'air et de surface comprennent l'augmentation de la superficie des espaces verts tout en restant en dessous du seuil, l'ajout de la complexité de la forme des espaces verts, la diminution des surfaces imperméables et l'agrandissement de la superficie des plans d'eau. Pour l'environnement environnant des espaces verts, l'augmentation des fractions de végétation et des plans d'eau ou la diminution des surfaces imperméables contribuera à renforcer les effets de fraîcheur. En outre, les niveaux plus élevés d'humidité causés par l'eau doivent également être considérés sous la forme d'un risque potentiel pour la santé. Afin de créer

des environnements sains dans les villes futures, une meilleure compréhension de la capacité en eau est nécessaire pour tenter d'obtenir des opportunités pour l'action, ainsi que l'implantation de la végétation aux bords du lac peut augmenter l'intensité des îlots de fraîcheur et réduire le taux de l'humidité.

RÉFÉRENCES

- Adams Lowell, M., Dove Louise, E. (1989), *Wildlife Reserves and Corridors in the Urban Environment: A Guide to Ecological Landscape Planning and Resource Conservation*, National Institute for Urban Wildlife, Washington, DC.
- Aniello, Cathy, Morgan, Ken, Busbey, Arthur, Newland, Leo (1995), *Mapping micro-urban heat islands using Landsat TM and a GIS*, Computers & Geosciences, **21**, 8, pp. 965–969.
- Baxter, R.M., Glaude, Pierre (1980), *Les effets des barrages et des retenues d'eau sur l'environnement au Canada: expérience et perspectives d'avenir*, Bulletins canadiens des sciences halieutiques et aquatiques, B205 F.
- Boakye Gyau, P. (2001), *Environmental Impacts of the Akasombo Dam and Effects of Climate Change on the Lake Levels*. Environment, Development and Sustainability, **3**, 1, pp. 17–29.
- Bounoua, Lahouari, Hall, F.G., Sellers, P.J., Kumar, A., Collatz, G.J., Tucker, C.J., Imhoff, M.L. (2010), *Quantifying the negative feedback of vegetation to greenhouse warming: A modeling approach*, Geophysical Research Letters, **37**, 23.
- Boudjellal, Lazher, Bourbia, Fatiha (2018), *An evaluation of the cooling effect efficiency of the oasis structure in a Saharan town through remotely sensed data*, International Journal of Environmental Studies, **75**, 2, pp. 309–320.
- Boulahbal, Soumiya, Mebarki, Azeddine (2013), *Bilan Et Fonctionnement Hydrologique Du Barrage De Béni Haroun (Oued Kébir-Rhumel, Algérie Orientale)*, 5^{ème} Colloque International: Ressources en eau et Développement Durable, Alger, ENSH Blida.
- Bowler, Diana E., Buyung-Ali, Lisette, Knight, Teri M., Pullin, A.S (2010), *Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence*, Landscape and Urban Planning, **97**, 3, pp. 147–155.
- Cao, Xin, Onishi, Akio, Jin, Chen, Imura, Hidefumi (2010), *Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data*, Landscape and Urban Planning, **96**, pp. 224–231.
- Chebbah, Lynda, Kabour, Abdesslem (2018), *Impact de la retenue d'un barrage sur le régime climatique local : cas de Beni Haroun (Est Algerien)*, Larhyss Journal, **33**, pp. 51–69.
- Chang, Chi-Ru, Li, Ming-Huang, Chang, Shyh-Dean (2007), *A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks*, Landscape and Urban Planning, **80**, pp. 386–395.
- Chen, Zhuolun, Zhao, Lihua, Meng, Qinglin, Wang, Changshan, Zhai, Yongchao, Wang, Fei (2009), *Field measurements on microclimate in residential community in Guangzhou, China*, Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, **3**, 4, pp. 462–468.
- Coutts, Andrew M., Tapper, Nigel J., Beringer, Jason, Loughnan, Margaret, Demuzere, Matthias (2013), *Watering our cities: the capacity for water sensitive urban design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context*, Progress in Physical Geography: Earth and Environment, **37**, 1, pp. 2–28.
- Degu, Ahmed, Hossain, Faisal, Niyogi, Dev, Pielke, Roger, Sr., Shepherd, Marshall, Voisin, Nathalie, Chronis, Themis (2011), *The Influence of Large Dams on Surrounding Climate and Precipitation Patterns*, Geophysical Research Letters, **38**, 4, pp. 1–7.
- Dousset, Benedicte, Gourmelon, Françoise (2003), *Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover*, Photogrammetry and Remote Sensing, **58**, 1-2, pp. 43–54.
- Friedl, Mark A (2002), *Forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements*, Remote Sensing and Environment, **79**, 2-3, pp. 344–354.
- Gherraz, Halima, Guechi, Imen, Benzaoui, Amel (2018), *Strategy to Improve Outdoor Thermal Comfort in Open Public Space of a Desert City, Ouargla, Algeria*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, **151**.
- Giridharan, Renganathan, Lau, Stephen, Siu Yu, Ganesan, Sivaguru, Givoni, Baruch (2008), *Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: the vegetation influence*, Building and Environment, **43**, pp. 1583–2159.
- Guo, Zheng, Wanga, S.D., Chengc, M.M., Shub, Y. (2012), *Assess the effect of different degrees of urbanization on land surface temperature using remote sensing images*, Procedia Environmental Science, **13**, pp. 935–942.
- Harlan, Sharon, Brazel, Anthony, Prashad, Lela, Stefanov, William, Larsen, Larissa (2006), *Neighbourhood microclimates and vulnerability to heat stress*, Social Science & Medicine, **63**, 11, pp. 2847–2863.
- Hathway, Abigail, Sharples, Steve (2012), *The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: a UK case study*, Building and Environment, **58**, pp. 14–22.
- Hung, Tran, Uchihamma, Daisuke, Ochi, Shiro, Yasuoka, Yoshifumi (2006), *Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities*, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, **8**, 1, pp. 34–48.
- Jusuf, Kardinal, Wong, Nyuk, Hien, Hagen, Emlyn, Anggoro, Roni, Hong, Yan (2007), *The influence of land use on the urban heat island in Singapore*, Habitat international, **31**, 2, pp. 232–242.
- Kellogg, Christopher, Zhou, Xiaobing (2014), *Impact of the Construction of a Large Dam on Riparian Vegetation Cover at Different Elevation Zones as Observed from Remotely Sensed Data*, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, **32**, 1, pp. 19–34.

- Kerdoud, Souheila (2006), *Le bassin versant de Beni Haroun eau et pollution*, Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine, Algérie.
- Kong, Fanhua, Yin, Haiwei, James, Philip, Hutyra, Lucy, R., He, S. Hong (2014), *Effects of spatial pattern of green space on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China*, *Landscape and Urban Planning*, **128**, pp. 35–47.
- Kum, Gülşen (2016), *The Influence of Dams on Surrounding Climate: The Case of Keban Dam*, *Gaziantep University Journal of Social Sciences*, **15**, 1, pp. 193–204.
- Landsberg, Helmut (1981), *The Urban Climate*, Edit. Academic Press, New York, USA.
- Lee, D., Ho, K., Seo, J. (2016), *An Analysis of Urban Cooling Island (UCI) Effects by Water Spaces Applying UCI Indices*, *International Journal of Environmental Science and Development*, **7**, 11, pp. 810–815.
- Mackey, Christopher, Lee, Xuhui, Smith, Ronald (2012), *Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island*, *Building and Environment*, **49**, pp. 348–358.
- Marouf, Nadir (2012), *Etude de la Qualité des Eaux et de Transport Solide dans le Barrage de Beni-Haroun (Mila), Son Impact sur l'Environnement de la Région*, Thèse de Doctorat en science, université de Biskra.
- Mathew, Aneesh, Khandelwal, Sumit, Kaul, Nivedita (2017), *Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities*, *Energy and Buildings*, **159**, pp. 271–295.
- McGarigal, Kevin, Marks, Barbara (1995), *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure*, United States Department of Agriculture, Pacific Northwest Research Station, General Technical Report PNW-GTR-35.
- Miller, Norman, Jin, Jiming, Tsang, Chin-Fu (2005), *Local Climate Sensitivity of the Three Gorges Dam*, *Geophysical Research Letters*, **32**, 16, pp. 1–4.
- Nishimura, N, Nomura, Tomohiro, Iyota, Hiroyuki, Kimoto, Shinya (1998), *Novel water facilities for creation of comfortable urban micrometeorology*, *Solar Energy*, **64**, 4, pp. 197–207.
- Oke, T.R. (1987), *Boundary Layer Climates*, Edit. Methuen & Co, LTD, London.
- Oke, T.R. (1973), *City size and the urban heat island*, *Atmospheric Environment*, **7**, 8, pp. 769–799.
- Oliveira, Sandra, Andrade, Henrique, Vaz, Teresa (2011), *The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon*, *Building and Environment*, **46**, 11, pp. 2186–2194.
- Pena, M.A. (2008), *Relationship between remotely sensed surface parameters associated with urban heat sink formation in Santiago, Chile*, *International Journal of Remote Sensing*, **29**, 15, pp. 4385–4404.
- Phillips, D., McCulloch, J.A.W. (1972), *The Climate of the Great Lakes Basin, Toronto*, *Environment Canada*, Atmospheric Environment Service, 40 p., Climatological Studies, **20**.
- Ridd, M.K. (1995), *Exploring a V-I-S (vegetation – impervious surface – soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities*, *International Journal of Remote Sensing*, **16**, 12, pp. 2165–2185.
- Rizwan, Ahmed Memon, Dennis, Y.C., Leung, Liu Chunho (2008), *A review on the generation, determination, and mitigation of Urban Heat Island*, *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**, 1, pp. 120–128.
- Santamouris, Mat (2014), *Cooling the cities - a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments*, *Solar Energy*, **103**, pp. 682–703.
- Taha, Haider, Akbari, Hashem, Rosenfeld, Arthur, Huang, Joe (1988), *Residential cooling loads and the urban heat island, the effects of Albedo*, *Building and Environment*, **23**, pp. 271–283.
- Tan, Minghong, Li, Xiubin (2013), *Integrated assessment of the cool island intensity of green spaces in the mega city of Beijing*, *International Journal of Remote Sensing*, **34**, 8, pp. 3028–3043.
- Toumi, Abdelouahab, Remini, B. (2018), *Perte de la capacité de stockage d'eau au barrage de Beni Haroun, Algérie*, *SAGREN*, **02**, 1, pp. 80–97.
- United Nations (2011), *World Urbanization Prospects the Revision*, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York.
- Weier, John, Herring, David (2000), *Measuring vegetation (NDVI & EVI)*, August 3, <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation>.
- Weng, Qihao, Fu, Peng (2014), *Modeling diurnal land temperature cycles over Los Angeles using downscaled GOES imagery*, *Photogrammetry and Remote Sensing*, **97**, pp. 78–88.
- Weng, Qihao, Lu, Dengsheng, Schubring, Jacquelyn (2004), *Estimation of land surface temperature vegetation abundance relationship for urban heat island studies*, *Remote Sensing and Environment*, **89**, 4, pp. 467–483.
- Wilson, Jeffrey, Clay, Michaun, Martin, Eden, Stuckey, Denise, Vedder-Risch, Kim (2003), *Evaluating environmental influences of zoning in urban ecosystems with remote sensing*, *Remote Sensing and Environment*, **86**, 3, pp. 303–321.
- Yun, Du, Yihang, Zhang, Feng, Ling, Qunming, Wang, Wenbo, Li, Xiaodong, Li (2016), *Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band*, *Remote Sensing*, **8**, 4, 354.