

Variations microclimatiques et effet de la végétation dans la ville aride de Ghardaïa, Algérie

Rachid Amieur, Djamila Rouag Saffidine and Christiane Weber

Volume 22, Number 3, December 2022

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1101288ar>

DOI: <https://doi.org/10.4000/vertigo.36719>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Amieur, R., Rouag Saffidine, D. & Weber, C. (2022). Variations microclimatiques et effet de la végétation dans la ville aride de Ghardaïa, Algérie. *VertigO*, 22(3), 1–43. <https://doi.org/10.4000/vertigo.36719>

Article abstract

Characterizing urban climate in hot arid cities is a key step to understand the interactions of climatic variables with the built-up and the vegetation. Extreme heat waves in summer are a strong stress especially for heat-vulnerable populations such as young children, the elderly and the sick. Urban Heat Island (UHI) in hot arid regions shows some specific features compared to other regions. Vegetation is known to play a role in alleviating urban heat island especially in hot arid climates. This study aims to analyse intra-urban microclimatic variations and the impact of vegetation in the arid city of Ghardaïa via *in-situ* measurements. The thermal behavior of measurement sites varies between urban heat island and cool island. It was detected an "archipelago" of heat throughout the city. The maximum intensity of UHI is 2.98 °C. As for the intra-urban differences, the vegetation produces a maximum PCI of 5.61 °C. The minimum night-time temperature is above 30 °C, well above the thermal comfort limit. The moderating effect of vegetation is mainly due to the shade provided by tree canopy. Vegetated sites do not show a significant difference in humidity compared to other built-up sites. It seems that a denser urban vegetation cover would further improve comfort conditions in the city.



Variations microclimatiques et effet de la végétation dans la ville aride de Ghardaïa, Algérie.

Rachid Amieur, Djamila Rouag Saffidine et Christiane Weber

Introduction

- 1 La qualité des espaces extérieurs dans les villes aujourd'hui est une des priorités pour le bien-être des citoyens et le développement économique (Harlan et al., 2006). L'effet conjugué de l'îlot de chaleur urbain et le réchauffement global de la planète constitue un des problèmes majeurs de nos jours (Potchter et Ben-Shalom, 2013). Les chaleurs caniculaires durant les étés torrides des villes du Sud constituent une contrainte extrême pour les citoyens, en particulier les populations à risque comme les personnes âgées, les jeunes enfants ou les malades (Harlan et al., 2006).
- 2 La caractérisation du climat urbain dans les villes chaudes et arides est une étape importante pour comprendre les interactions des variables climatiques avec la configuration du bâti et la végétation afin de déterminer les solutions d'aménagement urbain qui créent un confort thermique opportun pour les individus. Plusieurs moyens sont proposés pour contrer la chaleur urbaine, telle que l'utilisation de la végétation et de l'eau, l'application de surfaces réfléchissantes sur les bâtiments et les infrastructures, la diminution de l'énergie anthropique ainsi qu'une bonne composition géométrique du milieu bâti (Yamamoto, 2006).
- 3 Cette étude a pour objectif l'analyse des variations microclimatiques et l'impact de la végétation en été dans la ville chaude et aride de Ghardaïa en Algérie à travers une campagne de mesure *in situ*. Il s'agit de chercher comment les caractéristiques des sites urbains influencent le microclimat urbain et en particulier l'effet de la végétation.
- 4 Cette étude se propose dans un premier temps de présenter une brève revue de la littérature sur l'îlot de chaleur urbain et ses particularités dans les régions chaudes et arides. La deuxième partie traite de l'effet de la végétation sur le microclimat, illustré à

travers divers exemples. Le protocole de mesure, l'instrumentation et la présentation de la zone d'étude sont exposés dans la section suivante, puis sont présentés les résultats et la discussion. Enfin, les principaux résultats de la recherche sont synthétisés dans la conclusion où sont proposées aussi des recommandations visant à l'amélioration de la planification urbaine en vue d'atténuer les effets des îlots de chaleur urbains.

L'îlot de chaleur urbain dans les régions chaudes et arides

- 5 Les changements d'occupation du sol d'une région ont des conséquences sur son bilan radiatif et donc sur le climat local. Le processus d'urbanisation provoque une altération des propriétés radiatives, hygrothermiques et aérodynamiques de l'environnement (Ringebach, 2004). Les éléments physiques comme le rayonnement solaire, l'écoulement du vent et l'humidité interagissent avec les éléments qui constituent la ville : les bâtiments, les rues et les activités qui s'y développent. Les villes produisent donc leur propre climat, qui se caractérise par des températures plus élevées que dans les zones rurales environnantes. Ce phénomène est appelé « l'îlot de chaleur urbain » (ICU) et il a été mis en évidence pour la première fois en 1830 à Londres (Howard, 1833). L'ICU est la manifestation physique la plus connue de la ville sur son climat. C'est un phénomène essentiellement nocturne (Sobstyl et al., 2017 ; Alcoforado et Matzarakis, 2010 ; Arnfield, 2003). Il désigne des élévations nocturnes de températures enregistrées en milieu urbain par rapport à la campagne voisine. Les températures de l'air augmentent graduellement de la périphérie jusqu'au centre-ville. Les conditions idéales climatiques à la formation de l'ICU sont les conditions anticycloniques stables, un ciel dégagé et des vents faibles.
- 6 L'ICU est aussi le résultat de plusieurs facteurs liés au rayonnement du milieu et au comportement des matériaux utilisés combinés :
 - La complexité et la densité du milieu bâti qui favorise l'accumulation et le piégeage de la chaleur ainsi que le stockage de l'énergie dans les matériaux de construction.
 - L'imperméabilisation des surfaces et leurs faibles albédos.
 - Le manque de surfaces évaporatives telles que les plans d'eau et la végétation.
 - La chaleur anthropique produite par les activités d'industrie, de transport, de climatisation et la pollution atmosphérique qui en résulte (Yamamoto, 2006).
- 7 Le Sky View Factor (SVF) ou le facteur d'ouverture au ciel permet de caractériser la morphologie urbaine et les échanges radiatifs qui en découlent. Il correspond au degré d'ouverture du ciel, c'est-à-dire la fraction de ciel visible en un point particulier (Hodul et al., 2016 ; Brown et Grimmond, 2001 ; Oke, 1987).
- 8 L'ICU est donc un phénomène urbain lié à l'hétérogénéité du milieu (Boukhabla et al., 2013), ses caractéristiques morphologiques (taille, hauteur, orientation et gabarit) des bâtiments et des infrastructures ainsi que l'existence d'espaces ouverts (parcs, plan d'eau, et *cetera*). S'il présente l'avantage de réduire la facture de chauffage en hiver, il peut provoquer en revanche de graves problèmes de qualité de l'air par piégeage des émissions et des particules, ainsi qu'une grande consommation d'énergie due à la climatisation et beaucoup d'inconfort thermique en été, conduisant à un surcroît de problèmes de santé. Des études ont ainsi montré qu'aux moments de vagues de chaleur, le taux de morbidité et de mortalité lié à la température augmente significativement (Harlan et al., 2006 ; Baker et al., 2002). La vague de chaleur d'août 2003 qui a frappé

l'Europe a causé le décès de milliers de personnes dont 15 000 en France (Cadot et Spira, 2006 ; Hémon et al., 2003). Les fortes chaleurs urbaines affectent aussi le secteur économique, le rendement des travailleurs étant diminué par les modifications d'horaires de travail ou la pénibilité des activités. Les villes à climat chaud et aride sont plus exposées aux aléas des ICUs.

- 9 La lutte contre l'ICU est donc primordiale pour la santé de la population, l'économie et la régulation de la consommation d'énergie. Parmi les stratégies de lutte on peut citer : la végétalisation des espaces urbains, une conception réfléchie de la morphologie du cadre bâti, l'utilisation de matériaux réfléchissants et peu absorbants, la création de plans d'eau, etc. (Akbari *et al.*, 2001).

La particularité des régions chaudes et arides

- 10 L'ICU dans ces régions présente des particularités différentes des villes à climat froid, tempéré ou équatorial. Les climats chauds et arides sont caractérisés généralement par des hivers doux, mais des étés très chauds et secs. Le régime hydrique des cours d'eau dans le désert est souvent intermittent en fonction des pluies, les types de cours d'eau de surface (oueds) ne permettent pas d'assurer un flux continu de la ressource. Dans ce contexte, la ville est plus végétalisée que l'environnement désertique (Ben Shalom et al., 2009 ; Pearlmutter et al., 2007 ; Roth, 2007), ce qui mène à une formation d'un IFU (Ilot de Fraîcheur Urbain) en journée quand le désert est plus chaud que la ville. En effet, par le passé, les établissements humains dans le désert formaient une agglomération minérale compacte. La végétation et l'eau étant rares dans le désert (Besancenot, 2013), des palmeraies avec leurs systèmes d'irrigation ont été créées de toutes pièces par l'Homme. L'oasis formait ainsi une tache de verdure dans le désert et était toujours adjacente à la ville ou ksar qui, lui, était dépourvu de végétation. Les villes contemporaines, en revanche, contiennent de la végétation, que ce soit dans les espaces et équipements publics ou dans les cours et terrasses des propriétés privées. Les palmeraies résistent à la progression urbaine, mais cèdent souvent la place à des bâtiments ou des infrastructures laissant çà et là des espaces verts résiduels. La végétation plantée est irriguée, car les plans d'eau n'existent pas et les cours d'eau sont à sec une grande partie de l'année (Côte, 2005). L'entretien de sources d'alimentation en eau pour l'irrigation ou l'arrosage constitue une charge qui peut s'avérer importante selon la taille de la ville (Côte, 2005).
- 11 Au sein d'une agglomération, les bâtiments et les arbres créent des espaces ombragés, et offrent un abri contre le rayonnement solaire intense et les vents violents. En dehors de la ville, dans le désert environnant, les gens sont exposés au soleil et au vent. Cette situation fait que les villes désertiques présentent des îlots de fraîcheur diurne recherchés (Garcia-cueto et al., 2007 ; Correa et al., 2006 a,b ; Brazel et al., 2000). Après le coucher du soleil, en revanche, le désert connaît un refroidissement rapide dû à la faible capacité thermique du sol et la grande ouverture vers le ciel. La ville, quant à elle, voit l'émergence d'îlots de chaleur (ICU) nocturne liée à la forte inertie thermique des matériaux de construction et au faible facteur de vue (SVF) des rues. L'énergie emmagasinée le jour est ainsi réémise vers l'atmosphère durant la nuit. S'ajoute à cela la chaleur anthropique produite par les activités humaines : circulation, activités de production, climatisation (Roth, 2007). Toute cette chaleur est ainsi piégée dans la

complexité géométrique de la ville, ce qui entraîne des températures nocturnes élevées par rapport au désert.

- 12 À titre d'exemple, l'urbanisation rapide de la ville de Phoenix (Arizona, US) a conduit à une élévation de sa température minimale nocturne de 5°C et de sa moyenne journalière de 3.1°C (Rosheidat et al., 2008). Sofer et Potchter (2006) rapportent un ICU d'une intensité de 1.7°C à d'Eilat en Israël ville chaude et aride, tout comme à Beer Sheva, où Potchter et al. (2010) enregistraient un îlot de chaleur d'une intensité de 4°C. Ce schéma entre la ville désertique et la campagne environnante est donc différent de celui qui se trouve dans les régions tempérées ou tropicales où la ville est constituée de bâtiments et de surfaces imperméables avec peu de végétation comparée à la campagne. Ces espaces environnants, caractérisés par des espaces naturels, des champs ou des forêts sont recherchés en journée. En revanche, dans le désert, la ville est le seul îlot de végétation concentré (oasis et végétation urbaine) : ainsi, le gradient ville-campagne s'inverse en journée et, selon les quartiers, il fait plus frais en ville.
- 13 Ce constat est également confirmé dans les études de la relation de l'occupation du sol avec l'îlot de chaleur urbain de surface dans les villes chaudes et arides. Les agglomérations contemporaines (en dehors des noyaux historiques) sont plus végétalisées en comparaison aux alentours désertiques. Ces études montrent que les villes présentent souvent un îlot de fraîcheur urbain durant le jour (Dialesandro et al., 2019 ; Fan et al., 2017 ; Nassar et al., 2016 ; Hao et Li, 2016 ; Rasul et al., 2015 ; Lazzarini et al., 2013 ; Frey et al., 2006). Dans le cadre de cette étude, bien que l'îlot de chaleur urbain soit largement constaté la nuit, nous considérons comme certains auteurs l'apparition en journée d'un « l'îlot de chaleur urbain diurne » ("diurnal urban heat island" ou "daytime urban heat island") (Li et Zhang, 2021 ; Krüger et al., 2018 ; Hidalgo et al., 2010 ; Giridharan et al., 2004). Dans les villes désertiques où la différence entre ville et zones alentour est inversée en journée, le concept d'îlot de chaleur urbain diurne peut dès lors s'appliquer.
- 14 De ce qui précède, il apparaît que la végétation et l'hétérogénéité du bâti (spatiale, verticale et des matériaux) requièrent une importance toute particulière selon la zone étudiée. La caractérisation de l'îlot de chaleur urbain doit permettre de mieux cerner les éléments favorisant une planification urbaine plus efficace face au stress thermique des villes désertiques.

L'effet de la végétation

- 15 La végétation offre un certain nombre de services écosystémiques en milieu urbain. D'un côté, elle a une action positive sur les processus naturels comme la capture et le stockage du carbone, l'érosion des sols, le cycle naturel de l'eau dans les sols, et elle favorise la biodiversité (Laïlle et al., 2015 ; Mestayer et Brunet, 2015). De l'autre côté, la végétation fournit des services pour les citoyens à travers trois facteurs : l'ombrage, l'humidification de l'air et la modification de la vitesse et de la direction du vent. Par effet cumulatif de ces facteurs, la végétation permet la réduction de la température de l'air et l'amélioration des conditions de confort. Celle-ci, notamment pendant les pics de chaleur, a un fort impact sur la qualité de vie en ville et la santé des citoyens. Un des moyens de limiter ces impacts est de végétaliser les espaces urbains, et d'optimiser l'évapotranspiration (Motazedian et Leardini, 2012 ; Yu et Hien, 2006). En optimisant l'évapotranspiration des zones végétalisées la température de surface peut être réduite,

ainsi que celle de l'air localement (Makhelouf Ali, 2013 ; Oliveira et al., 2011 ; Bowler et al., 2010 ; Dimoudi et Nikolopoulou, 2003 ; Givoni, 1991). En effet les arbres absorbent par leur feuillage les flux radiatifs. Plus de 80 % du rayonnement solaire incident est intercepté par les feuilles (Saudreau et al., 2015). La réduction du rayonnement solaire sous une canopée dense peut être de 70 à 90 % par une journée claire d'été (Heisler, 1986). Une partie du rayonnement est utilisée dans la photosynthèse et une autre est utilisée pour l'évaporation de l'eau des feuilles. Ainsi l'évaporation refroidit l'air en contact avec les feuilles. Cet effet rafraîchissant ou « Parc Cool Island - PCI » (Spronken-Smith et Oke, 1998) dépend aussi de la surface du couvert, de sa densité, des espèces en présence, de l'orientation, de la hauteur et de l'âge des arbres, et *cetera*. Le rafraîchissement généré peut être ressenti à des distances variables selon l'importance de la surface et du type de végétation.

- 16 La taille des espaces verts, le type de végétation, mais aussi la topographie, la vitesse du vent influencent l'effet de la végétation (Chow et al., 2010). Certains chercheurs indiquent notamment que plus le parc est grand, plus l'effet rafraîchissant est important (Bacci et al., 2003 ; Jauregui, 1991 ; Barradas, 1991). Néanmoins, même un arbre isolé peut avoir un effet (Streiling et Matzarakis, 2003 ; Souch et Souch, 1993). L'espèce de la plante, sa localisation et le climat sont des facteurs primordiaux car ils impactent le taux d'évaporation. Ceci renvoie à la nécessité de penser la plantation du bon arbre au bon endroit (Kotzen, 2003). Les résultats de plusieurs recherches indiquent qu'en général, cet effet de refroidissement est de l'ordre de 2 à 3°C (Hamada et al., 2013 ; Ren et al., 2013 ; Bacci et al., 2003 ; Shashua-Bar et Hoffman, 2000 ; Spronken-Smith et Oke, 1998 ; Kurn et al., 1994 ; Saito et al., 1991). Potchter et al. (2010) montrent que l'effet rafraîchissant des arbres se situe autour de 1.5 et 3°C en été dans le climat désertique de Beer Sheva. Taleb et Taleb (2014), dans une étude de quantification de l'effet rafraîchissant de la végétation, concluent que la plantation d'arbres pourrait faire baisser les pics de température à Dubaï (Émirats Arabes Unis) de 2 à 6°C et augmenter ainsi le confort thermique des piétons.
- 17 Cependant, les zones chaudes et arides souffrent d'une très faible pluviométrie (Chen et Chen, 2013 ; Kottek et al., 2006). L'absence de précipitations et de ressources en eau est également un élément majeur de la compréhension des interactions entre ville, végétation et conditions microclimatiques. Les besoins d'évapotranspiration sont calculés d'après les caractéristiques de température et d'humidité, les espaces végétalisés en milieu aride ne pouvant pas en émettre autant qu'une végétation en milieu tempéré en raison du manque d'eau dans le sol et du stress hydrique continu (Kotzen, 2003). La faible humidité rend donc le refroidissement par évapotranspiration très limité. Le manque de l'eau dans les villes arides constitue un frein quant à l'usage de stratégies de rafraîchissement par évaporation (Wheeler et al., 2019). Ainsi Guhathakurta et Gober (2007) et Middel et al. (2012) indiquent que la consommation d'eau pour le rafraîchissement augmente considérablement en été dans la ville de Phoenix, dans le sud des États-Unis. La plantation de la végétation pour son rôle microclimatique (humidité et ombre) se heurte à la nécessité d'économie d'eau d'irrigation. Shashua-Bar et al. (2009) recommandent la plantation d'arbres plutôt que le gazon pour une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau dans le désert. Le choix d'espèces xérophytes s'impose souvent pour leur faible consommation d'eau (Chow et Brazel, 2012).

- 18 Un autre service écosystémique est à souligner : la présence de la végétation augmente la performance énergétique des bâtiments, soit par protection directe des parois (du soleil et du vent) ou par la régulation de la température extérieure (Pandit et Laband, 2010 ; Akbari et al., 2001 ; Akbari et al., 1997 ; Huang et al., 1987). La végétalisation paraît ainsi d'autant plus préconisée que le climat est chaud et sec, et son utilisation dans les climats chauds et arides trouverait tout son intérêt en intégrant une réflexion sur la planification urbaine, les ressources en eau disponibles et la végétalisation de la ville. Cependant, les plans d'urbanisme actuels ne prennent en compte l'intérêt du végétal que sous l'angle de l'esthétique ou de l'embellissement, et négligent souvent les caractéristiques climatiques ainsi que les besoins en confort thermique des citoyens. Il convient donc de fournir des éléments de compréhension des phénomènes ci-dessus et de leur intégration dans les procédures de planification.

Site d'étude, données et méthodes

Zone d'étude

- 19 L'étude a été menée dans la ville de Ghardaïa (Latitude : 32°29'27" Nord, Longitude : 3°40'24" Est) située au nord du Sahara à 600 kilomètres au sud de la capitale Alger (Algérie) dans la région du M'zab (Figure 1). La vallée du M'zab est connue pour ses cinq ksour classés patrimoine mondial par l'UNESCO en 1982. Le paysage géomorphologique de la vallée du M'zab se trouve sur un grand plateau rocheux, la Hamada ; il est dominé par des escarpements rocheux, la Chebka (« filet » en arabe). Il s'agit d'une vaste étendue pierreuse sans dunes. Le manque d'eau est associé au type de végétation présent sur le site. L'allocation de la ressource doit en effet répondre aux besoins des habitants, des activités économiques, et ensuite à ceux des palmeraies et autres espaces de végétation. Les besoins d'irrigation ne sont pas *a priori* prépondérants sauf pour des activités économiques. L'oued est totalement intermittent : il ne soutient pas les besoins en eau de la végétation urbaine et ne permet pas de rafraîchir les quartiers qu'il jouxte, en revanche, son orientation favorise des coulées de vent dans son lit.

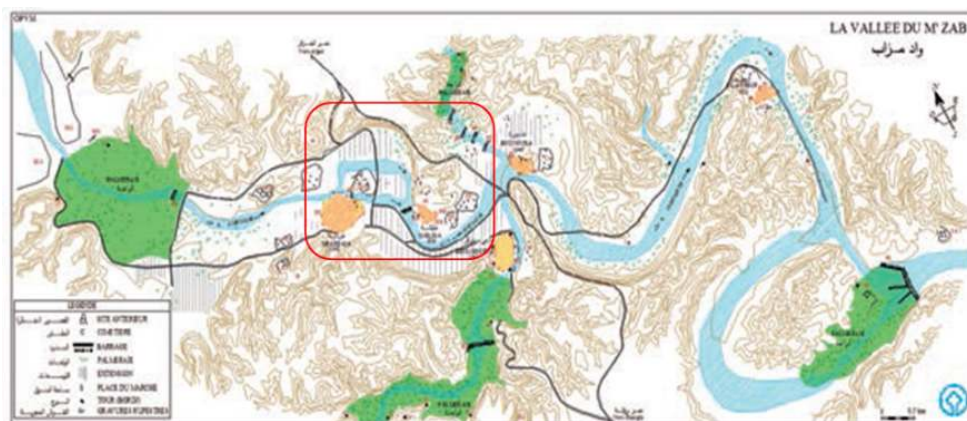
Figure 1. Situation de la ville de Ghardaïa.



RFI [en ligne] URL : http://www1.rfi.fr/actufr/articles/106/article_73099.asp

- 20 Le territoire géomorphologique de Ghardaïa est situé sur un plateau rocheux (calcaire). L'Oued M'zab traverse la vallée d'Ouest en Est. Les cinq cités du M'zab (Benyoucef, 2010) sont disséminées le long du cours d'eau (figure 2).

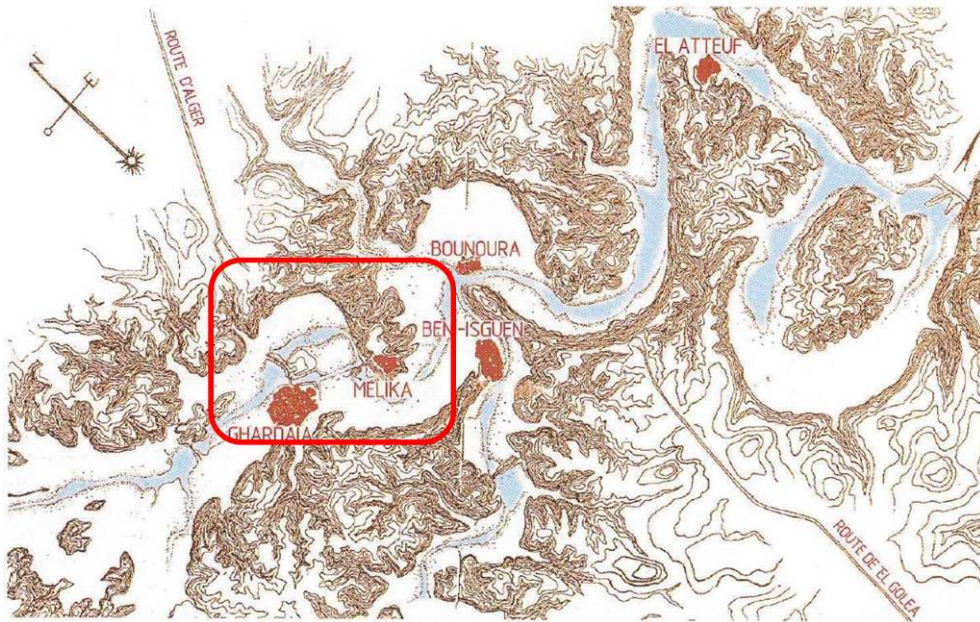
Figure 2. La vallée du M'zab



OPVM, 2012.

- 21 Les ksour sont des agglomérations fortifiées datant de 1000 ans, érigées sur des pitons rocheux et s'étalant le long de l'oued du M'zab. Dans une logique de préservation de l'équilibre nature/culture, les monts servaient à bâtir et à la défense et les vallées à cultiver (figure 3) (Ben-youcef 1986). Au fond de la vallée, les oasis étaient constituées de palmeraies (chacune rattachée à un ksar, figure 2). Elles étaient un lieu de subsistance pour la population locale et constituaient un havre de fraîcheur dans l'écosystème du M'zab. Le système d'irrigation était conçu d'une manière ingénieuse afin d'économiser l'eau, ressource rare dans le désert (Côte, 2005).

Figure 3. Topographie générale et simplifiée de la vallée du M'zab Morphologie originale avant les extensions urbaines anarchiques ; la zone d'étude est encadrée en rouge.



Ravereau et al., 2003.

- 22 Le ksar est entouré d'une muraille défensive jalonnée par des tours. Il se caractérise par une forme compacte dictée par la rigueur du climat et les pratiques sociales. La mosquée occupe le point central et culminant du ksar (figure 4). Les habitations forment une composition étagée épousant la pente de la colline. Ce sont des constructions en pierre à forte inertie thermique. Elles sont organisées autour d'un patio central doté d'une ouverture zénithale appelée « Chebek » servant pour l'aération et l'éclairage. Les habitants du ksar pratiquent un nomadisme saisonnier-vertical-quotidien-interne en se déplaçant d'un niveau à un autre (les habitants occupent le rez-de-chaussée durant la journée et la terrasse fraîche durant la nuit pour l'été, et le contraire en hiver : les habitants vivent sur la terrasse ensoleillée durant la journée, et ils passent la nuit au rez-de-chaussée). Le patio joue ainsi le rôle de régulateur thermique. L'autre nomadisme saisonnier concerne la migration vers la résidence d'été dans la palmeraie, pour ceux qui en possèdent, et le retour au ksar en hiver (Adad et Mazouz, 2013 ; Nouibat et Tacherift, 2007).
- 23 Le réseau des rues et ruelles s'organise en une organisation radioconcentrique. En raison de la rudesse du climat, les rues ont un profil profond et les maisons ont peu de surfaces exposées au soleil.

Figure 4. Vue aérienne présentant le ksar de Ghardaïa en premier plan, la vallée en second plan, puis les collines environnantes



Arthus-Bertrand, 2014.

- 24 Les extensions contemporaines ne respectent pas ce modèle urbain et architectural ancestral. Les voies y sont plus larges (en raison de la circulation automobile) et parfois dotées d'arbres d'alignement. Les quartiers récents dans la partie extra-muros ont quelques places et jardins. Si le ksar représente une entité totalement minérale où il n'y a pas de place pour la végétation, les nouvelles extensions comprennent plusieurs espaces verts.

Instrumentation et protocole de mesure

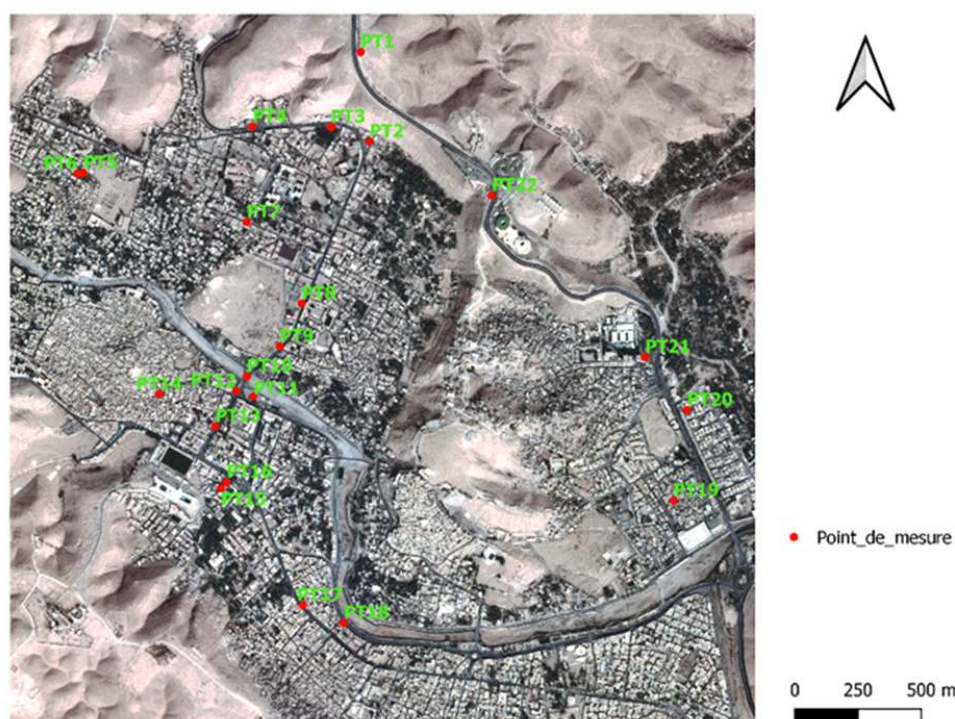
- 25 La région est caractérisée par un climat chaud et aride (Bkw) selon la classification de Koppen, avec des hivers doux et des étés chauds et secs (Chen et Chen, 2013 ; Peel et al., 2007 ; Kottek et al., 2006). Les précipitations sont faibles, avec une moyenne de 60 millimètres par an (O.N.M., 2016 ; D.P.A.T., 2005 ; Bouchair, 2004). Le nombre de jours de pluie se situe entre 11 et 15 jours par an. La température moyenne en juillet est de 35°C, avec des maxima dépassant les 45°C et un minimum de 27°C. En janvier, la température moyenne est de 10°C avec un maximum de 20°C et un minimum de 3°C. Les vents dominants en hiver sont de direction Nord-Ouest avec une vitesse moyenne de 12 km/h et un maximum de 29 km/h (janvier). En été, les vents dominants sont de direction Est avec une moyenne de 13 km/h et un maximum de 29 km/h (juillet). Le ciel est dans l'ensemble clair avec une forte insolation (O.N.M., 2016 ; D.P.A.T., 2005 ; Bouchair, 2004).
- 26 Le périmètre d'étude couvre plus particulièrement les quartiers du centre-ville de Ghardaïa où se déroule l'essentiel de l'activité économique, administrative et récréative (Figure n° 5). Ces quartiers ont été sélectionnés selon plusieurs critères : la présence de

végétation, la morphologie des rues et des îlots urbains, l'ouverture du ciel et la fréquentation des lieux sélectionnés (boulevards, jardins, et *cetera*).

- 27 Les 22 sites de mesure ont été choisis pour leur représentativité le long d'un transect dans les quartiers sélectionnés. L'intérêt du parcours est de pouvoir décèler les variations microclimatiques entre les différents sites (Chebli et al., 2020 ; Ghribi et Dahech, 2020 ; Sharifi et al., 2017 ; Zoulia et al., 2009) selon un parcours urbain de 20 minutes en moyenne.

Figure 5. Localisation des points de mesure dans l'aire d'étude.

L'Oued M'zab traverse la ville d'Ouest en Est. Le ksar de Ghardaïa se démarque à gauche de l'image par son tissu compact et la palmeraie de Bounoura est à droite en haut de l'image.



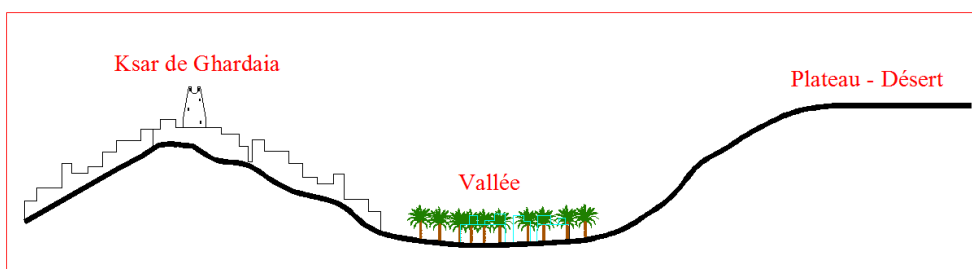
- 28 La campagne de mesure s'est étalée du 27 juillet au 04 août 2015. La durée moyenne du jour en cette période est de 14 heures (le lever du soleil à 05 :55 h et le coucher à 19:45 h). Cette période estivale est caractérisée par des températures extrêmes et une humidité très faible. Des données climatiques ont été relevées à 1.5 m du sol : la température de l'air, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Ces données ont été complétées par des informations morphologiques (rue, bâtiment), environnementales (sol, orientation) et activités économiques.
- 29 La prise de mesure est effectuée trois fois par jour :
- À 05:00h, à l'aube où les températures sont les plus basses et où l'effet de l'ICU est mesurable ;
 - À 14:30h, au milieu de journée quand les températures sont au maximum. (Fin des activités de beaucoup d'employés, notamment dans le secteur du bâtiment, et arrêt des activités à cause des grandes chaleurs) ;
 - À 00:00h, lorsque le confort thermique se fait sentir pour les citoyens. Les commerces sont fermés et la plupart des activités urbaines nocturnes cessent. À cette heure, la plupart des gens passent la nuit à l'extérieur (cours ou jardins) ou sur les terrasses des habitations).

Figure 6. Vue générale sur la ville de Ghardaïa (en regardant vers l'ouest). L'oued M'zab apparait en bas à gauche de l'image.



- 30 La température a été mesurée avec un appareil thermomètre-anémomètre de marque « testo 415 » (de 0 à 50°C, de 0 à 10 mètres par seconde), plus un appareil multifonction mesurant la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent. Dans des sites de végétation, deux mesures ont été faites sous et hors de la canopée pour évaluer l'effet d'ombrage des sites. Le rayonnement solaire est mesuré à l'aide d'un pyranomètre (ST-1307 Standard). Les instruments étaient protégés du rayonnement direct et calibrés à l'avance. La valeur moyenne de chaque mesure ainsi que le minimum et maximum ont été calculés sur toute la période de mesure (Tableau 3, 4 et 5 en annexe 1). Le site du Moussalla Moustadjeb (PT01) est choisi comme site de référence en raison de sa situation, en dehors de l'agglomération urbaine, et sa position sur le plateau : il se trouve en haut de la colline, par opposition aux autres sites urbains situés dans la ville en contrebas dans la vallée (figure n° 7 et tableau 1, en annexe).

Figure 7. Profil schématique sur l'aire d'étude ; direction Nord-Sud.



- 31 L'ICU et l'IFU sont calculés à partir des écarts de température de l'air entre le site de référence, le PT 01 (Moussalla Moustadjeb) et les sites de mesures en ville (Potchter et al., 2010). L'effet de rafraîchissement de la végétation est calculé par la différence de température de l'air entre le site végétalisé et le site de référence, ou par rapport à un autre site urbain dépourvu de végétation (Bowler et al., 2010).

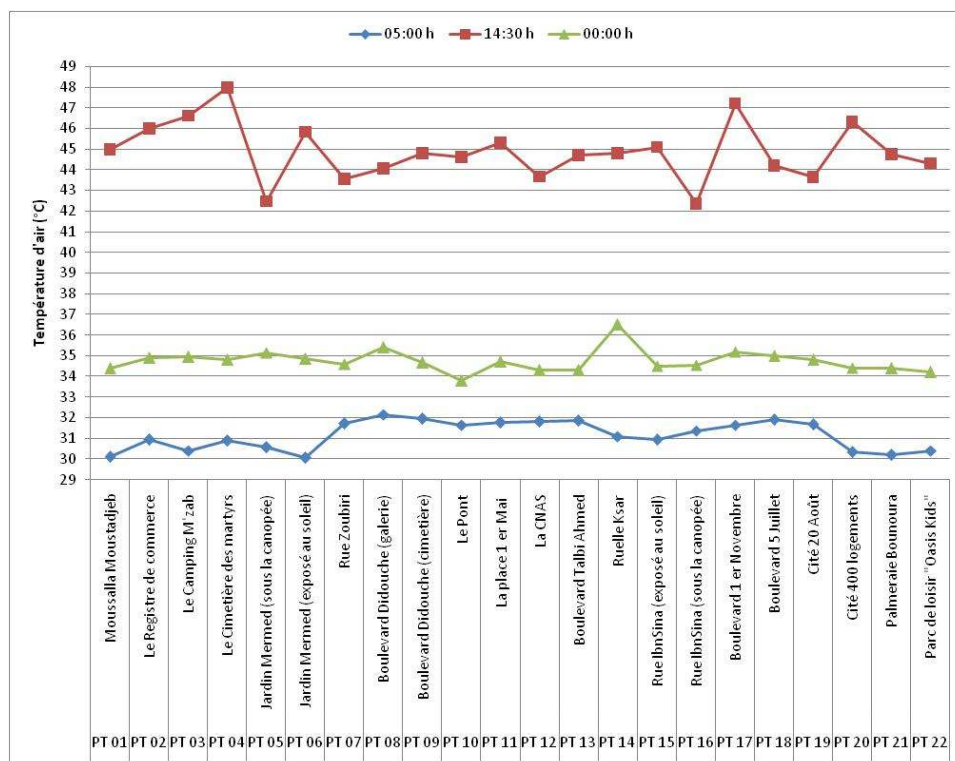
Résultats

- 32 La météo durant la période de mesure était caractérisée par des conditions anticycloniques stables. Les données microclimatiques relevées durant la campagne de mesure sont caractéristiques du climat de Ghardaïa pendant cette période de l'année. Les chaleurs caniculaires sont typiques du climat qui règne au milieu de l'été : l'amplitude thermique quotidienne est de 15°C en moyenne ; le taux d'humidité très faible, reflétant le degré d'aridité de la région ; le vent est faible dans les sites urbains, surtout pendant la nuit. Lors de cette étude l'écart de température entre sites était prononcé durant le jour mais ne dépassait pas les 6°C ; durant la nuit, les écarts sont plus faibles et les températures plus homogènes. Nous allons présenter les variations des différentes mesures réalisées en journée, à minuit et au petit matin.

Variation de la température de l'air

- 33 La figure n° 8 présente les températures moyennes de l'air enregistrées sur l'ensemble des sites durant la période d'investigation. Le thermomètre a affiché des températures extrêmes, de l'ordre de 48°C, et des minimums supérieurs à 30°C. Ces pics et ces minimas sont représentatifs de l'été dans les villes de cette région telle que la ville de Ouargla (Bouchahm et al., 2011).

Figure 8. Température de l'air des sites de mesure.



Variation diurne (14h30)

- 34 D'après la figure 8, on constate que le site du cimetière des martyrs (PT04) est le plus chaud des 22 sites de la ville, avec une moyenne de 47.95°C. Le deuxième îlot de chaleur

est enregistré dans le boulevard 1^{er} Novembre (PT17) avec une différence de 2.23°C par rapport au site de référence PT01. Les autres sites urbains manifestent un comportement thermique homogène, d'une variation faible (moins de 1.4°C). Cependant, certains points de mesure, comme la rue Ibn Sina (PT16) ou le Jardin Mermed (PT05) présentent des températures plus basses parce que prises sous la canopée (plus de 5°C de différence) ; d'autres, comme Cité 20 Août (PT19) ou rue Zoubiri (PT07), sont plus frais par rapport au site du cimetière des martyrs (PT04), avec environ 4°C de différence.

- 35 Si les températures des points dépourvus de végétation présentent des températures similaires, les sites ombragés dans l'allée Ibn-Sina PT16, au jardin de Mermed PT05 et le point sous le groupe d'arbres de la CNAS (PT12) manifestent des îlots de fraîcheur par rapport au site désertique de référence (PT01). L'effet rafraîchissantou PCI, « *Park Cool Island* » (Chow et al. 2010 ; Spronken-Smith et Oke, 1998) est respectivement de 2.62°C, 2.50°C et 1.3°C. La différence maximale est enregistrée entre le site du cimetière des martyrs (PT04) et l'allée Ibn-Sina (PT16) avec une valeur de 5.61°C. Si on considère les différences au sein des espaces verts, entre les points ombragés et exposés au soleil, on constate que l'impact de la végétation est là aussi significatif. Ainsi, dans l'allée Ibn-Sina (PT15 - PT16) l'effet rafraîchissant localisé de la végétation est de 2.72°C alors que dans le jardin de Mermed (PT06 - PT05) l'effet s'élève jusqu'à 3.36°C.
- 36 Afin de bien comprendre le rôle de l'ombre de la végétation sur la température de l'air, nous avons aussi étudié le taux de réduction du rayonnement solaire par le feuillage des arbres. Les mesures du rayonnement solaire montrent que le feuillage et le branchage réduisent considérablement les valeurs du rayonnement qui peuvent dépasser les 970 watts par mètre carré (tableau 2), soit environ 800 Watt par mètre carré de différence. Le taux de réduction du rayonnement par la canopée varie selon les types ou les espèces des arbres. Au jardin de Mermed (PT06) par exemple, le rayonnement solaire sous un grand eucalyptus est diminué de 87.7 % par rapport au point ensoleillé (PT05). Celui mesuré sous un casuarina adulte est réduit de 88.4 % (PT 05) (voir images dans le tableau 1, en annexe). Dans la rue Ibn-Sina le taux de réduction du rayonnement solaire sous la canopée d'un tamaris va jusqu'à 91.2 % (PT16) (voir images dans le tableau 1, en annexe). Au niveau du boulevard 1^{er} Novembre (PT17) sous la haute canopée d'un palmier dattier l'atténuation du rayonnement solaire atteint 83 %. On voit bien que le choix des espèces d'arbres peut être un élément important de confort en ville.

Tableau 2. Le rayonnement solaire dans différents sites à 14 :30 h.

(*) indique que les mesures sont prises à l'ombre de la végétation.

Point de mesure	Description	Rayonnement (W/m ²)
PT 01	Moussalla Moustadjeb	959
PT 02	Le Registre de commerce	951,5
PT 03	Le Camping M'zab	931,66
PT 05	Jardin Mermed sous la canopée d'un eucalyptus*	120

PT 05 bis	Jardin Mermed sous la canopée Casuarina*	113,33
PT 06	Jardin Mermed (Max)	974,66
PT 07	Rue Zoubiri	922
PT 09	Boulevard Didouche Mourad	937
PT 11	La place 1 ^{er} Mai (face à la CNAS)	940
PT 12	La CNAS sous la canopée d'un groupe d'eucalyptus*(Min)	64
PT 15	Rue IbnSina	949
PT 16	Rue IbnSina sous la canopée des tamarix*	103
PT 17	Boulevard 1 ^{er} Novembre	940
PT 17 bis	Boulevard 1 ^{er} Novembre sous le feuillage du palmier*	160

Variation nocturne (00:00h et 05 :00h)

- 37 D'après la figure 8, on constate une homogénéité dans les températures des sites durant la nuit. L'écart est plus faible qu'en journée. À minuit, l'îlot de chaleur le plus intense est enregistré dans la ruelle de ksar (PT14) : 2.1°C. En revanche, au niveau du pont (PT10) sur l'oued, on relève un îlot de fraîcheur de 0.6°C par rapport au site de référence. La prise de mesure dans ce site est effectuée sur 7 mètres au-dessus du niveau du lit de l'oued. Ce point de mesure connaît des vitesses de l'air élevées, de jour comme de nuit (figure 10). Durant la nuit, le vent est de direction ouest, c'est-à-dire dans le sens de l'écoulement de l'eau dans l'oued. D'après les figures 2 et 3, ce vent souffle depuis la palmeraie de Ghardaïa située en amont de l'oued M'zab. La température la plus haute à cette heure est relevée dans le ksar (PT14) : 36.5°C. Pour le boulevard Didouche Mourad, le (PT08) situé dans la galerie présente une température plus élevée de 0.75°C par rapport au point (PT09) situé dans un espace ouvert à côté du cimetière. La configuration des lieux doit être prise en compte dans l'étude des micro-variations.
- 38 Les espaces verts connaissent des îlots de chaleur de faible intensité à 00:00 h. Malgré le passage de quatre heures après le coucher du soleil, les sites végétalisés maintiennent une température semblable voire même supérieure au désert environnant. Il convient de signaler que les arbres ne sont irrigués régulièrement que dans le jardin de Mermed. Ainsi, le point (PT05) sous les arbres manifeste en effet un îlot de chaleur de 0.75°C à ce moment-là, alors que le point (PT06) non couvert par une canopée est plus frais de 0.3°C.
- 39 A l'aube (05h00) on constate que le site désertique de référence a connu un rythme de refroidissement plus rapide que la ville. Le point (PT08) dans la galerie du boulevard Didouche Mourad affiche un îlot de chaleur maximal de 2.05°C. D'une manière générale, les îlots de chaleur enregistrés à 05:00 h sur l'ensemble des sites sont d'une intensité supérieure aux îlots de chaleur relevés à minuit.

- 40 L'effet rafraîchissant maximal de la végétation à l'aube est obtenu dans le jardin de Mermed (PT06), d'une valeur maximale de $PCI_{max} = 2.08^{\circ}\text{C}$. On peut constater cependant qu'au niveau des sites végétalisés du jardin de Mermed et de l'allée Ibn-Sina, les points de mesure situés sous les arbres sont les plus chauds ; le (PT05) est plus chaud de 0.5°C que le point (PT06). Tout comme le point (PT16) est plus chaud de 0.43°C que le point (PT15). On voit que la végétation peut aussi être un frein au refroidissement dans certains cas, ce qui revient à penser que la végétation en l'absence de vent conserve la chaleur sous le huppier à cet endroit.

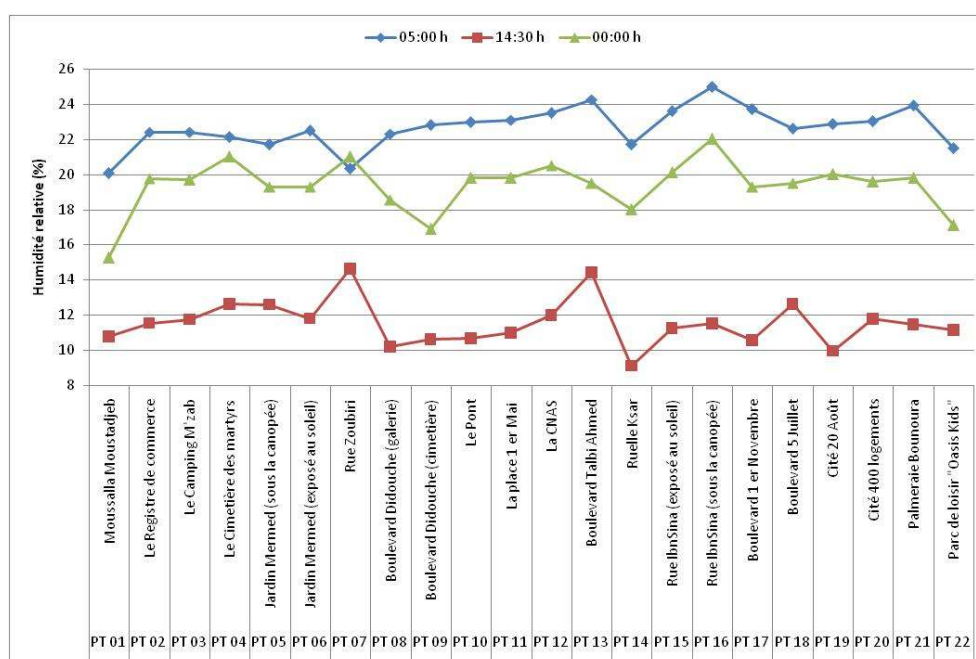
Variation de l'humidité relative de l'air

- 41 La figure 9 présente le taux d'humidité relative moyen relevé dans l'ensemble des sites durant la campagne de mesure à 05:00 h, 14:30 h, et 00:00 h.

Variation diurne (14h30)

- 42 Les mesures de 14:30 h montrent une humidité relative faible pour l'ensemble des sites. Le maximum enregistré se situe au niveau de la rue Zoubiri (PT07) avec un taux de 14.6 %, suivi du boulevard Talbi Ahmed (PT13) avec 14.4 %. La ruelle du ksar présente l'humidité relative la plus faible (9.1 %), inférieure même au site de référence.
- 43 Dans les espaces verts, les taux d'humidité sont eux aussi faibles : dans la rue Ibn-Sina l'humidité relative affiche 11.5 % au PT16) et 11.2 % au (PT15), et au jardin de Mermed 12.5 % PT05 et 11.8 % PT06. Le site de référence affiche quant à lui une humidité relative de 10.75 %.

Figure 9. Humidité relative de l'air des sites de mesure.



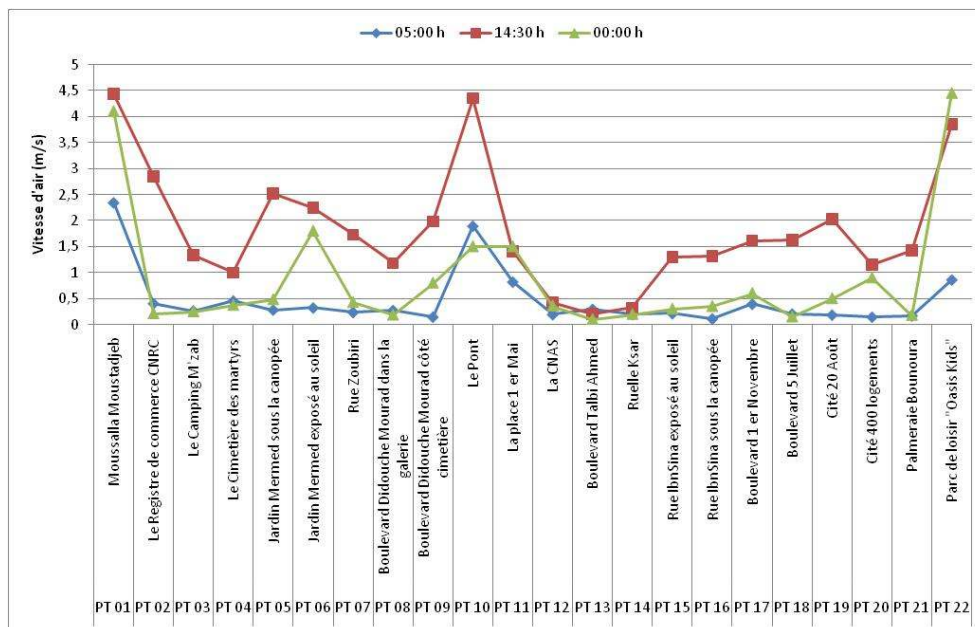
Variation nocturne (00:00h et 05:00h)

- 44 À minuit, les sites urbains affichent des taux d'humidité relativement plus élevés par rapport au désert. Le point de mesure (PT 16) sous la canopée affiche une humidité légèrement élevée par rapport aux sites dépourvus de végétation. À l'aube, on remarque que tous les sites voient leur humidité s'élever. Le désert enregistre toujours la plus faible valeur par rapport aux sites urbains. Tout comme les mesures de minuit, le point (PT 16) sous la canopée d'Ibn-Sina a le taux le plus élevé (25 %).

Variation de la vitesse de l'air

- 45 La figure n°10 présente les vitesses du vent moyennes relevées sur l'ensemble des sites. La valeur maximale est de 4,45 mètres par seconde (et un minimum de 0.1 mètre par seconde). On constate que les sites urbains connaissent des vitesses de vent faibles par rapport au désert. Il est à noter que les vitesses de l'air fluctuent énormément pendant la prise de mesure, en particulier dans les sites du centre-ville. D'après la figure 10, les vitesses de l'air à la fin de la nuit sont plus faibles qu'en journée. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les sites de plateaux ou au niveau du pont sur l'oued M'zab, qui favorise la circulation de l'air dans son lit. Au niveau du site de référence, la vitesse moyenne du vent est de 4.43 mètres par seconde ; dans le parc de loisir (PT 22), elle est de 3.85 mètres par seconde. La vitesse de l'air moyenne au niveau du pont sur l'oued (PT 10) est aussi élevée qu'au niveau du plateau avec une valeur de 4.35 mètres par seconde.
- 46 Pendant la nuit, les vitesses de l'air au niveau des sites urbains sont plus faibles que celles enregistrées durant le jour.

Figure 10. Vitesses de l'air des sites de mesure



Discussion

- 47 L'influence des caractéristiques des sites et l'effet de la végétation sur la variation intra-urbaine de la température d'air

Les écarts de température diurne (14h30)

- 48 Les températures élevées enregistrées montrent le niveau du stress thermique que vivent les habitants de Ghardaïa. Si l'on considère tous les sites de mesure, on constate qu'ils ont des comportements thermiques différents par rapport au site de référence ; or, l'élévation de la chaleur en milieu urbain peut être dommageable pour la santé des habitants et les activités économiques (Harlan et al., 2006).
- 49 Le site du cimetière des martyrs (PT04) est le point le plus chaud de la ville. Il présente une grande aire asphaltée de couleur noire et présente aussi une très grande ouverture au ciel. L'absence d'ombre et l'exposition à la forte insolation durant des heures participent à l'élévation importante de la température à ce moment de la journée. De plus, il connaît une très grande énergie anthropogénique issue d'une circulation automobile intense et donc la présence d'émissions importante. Sa situation à la limite de la vallée et proche de l'immense chaleur dégagée par le flanc de la colline rocheuse est aussi un élément déterminant dans son comportement thermique (figure n°13 en annexe).
- 50 Le deuxième point chaud se trouve sur le boulevard du 1^{er} Novembre (PT17). C'est l'artère commerciale principale de la ville, elle est connue pour ses embouteillages et sa circulation très intense. Ce boulevard est dépourvu de galeries mais il est garni d'arbres d'alignement, des palmiers dattiers espacés de neuf mètres en moyenne. Les palmiers ne reçoivent pas d'irrigation et offrent une ombre clairsemée. Les façades du boulevard présentent des climatiseurs accrochés un peu partout, ce qui génère une forte chaleur (voir image dans le tableau 1, en annexe). Les bâtiments ont en général deux niveaux, ce qui correspond à une rue à faible profondeur et par conséquent avec un grand ensoleillement. Tous ces facteurs contribuent à réchauffer l'air à cet endroit.
- 51 Une autre voie parallèle au boulevard 1^{er} Novembre, le boulevard de l'indépendance (5 Juillet) (PT18), longe l'oued M'zab (voir image dans le tableau 1, en annexe). Cette voie connaît moins de trafic automobile que le boulevard du 1^{er} Novembre et a beaucoup moins d'activités commerciales. Il est moins chaud de 3°C par rapport au boulevard 1^{er} Novembre à cause de la plus faible chaleur anthropique et sa grande ouverture au ciel et la proximité de l'oued. Le pont de l'oued (PT10) quant à lui présente une température relativement haute à cause de la très grande circulation automobile à tous moments de la journée car c'est un nœud de circulation entre les deux rives dans la ville.
- 52 Si les variations de température sont d'une intensité faible (moins de 1.4°C) dans les autres sites urbains, leurs différences intra-urbaines sont significatives. Le site dans la cité 20 août (PT19) est plus frais de 4.31°C par rapport au site du cimetière des martyrs (PT04). Cette cité a été réalisée par l'architecte André Ravéreau selon des principes bioclimatiques. Les rues sont toutes brisées et ne sont pas carrossables. Elles sont dotées de passages couverts et de profils profonds. Cette différence de température souligne l'importance de la géométrie des rues dans la protection contre le rayonnement solaire. Des remarques similaires peuvent être retenues dans les sites de

la place 1^{er} Mai (PT11), le registre de commerce (PT02) et la cité 400 logements (PT20) par exemple. Ces lieux sont caractérisés par une grande ouverture au ciel (voir image dans le tableau 1, en annexe).

- 53 Le site de la rue Zoubiri (PT07) affiche une différence de 4.39°C par rapport au site du cimetière des martyrs (PT04). Ceci est dû au profil relativement profond de la rue et à son orientation est-ouest qui offre plus d'ombre au milieu de la journée comparée à une orientation nord-sud où elle serait exposée directement à l'irradiation solaire. De plus, la rue Zoubiri (PT07) présente une faible circulation automobile comparée au site du cimetière des martyrs (PT04) donc moins d'énergie anthropique.
- 54 Les deux points de mesure dans le boulevard Didouche Mourad (PT 08 et 09) confirment aussi le rôle de l'ombre fournie par la géométrie des rues. Le point (PT09) situé sur le trottoir est plus chaud que le point PT08 qui bénéficie de la protection de la galerie à arcades. Une observation identique peut être constatée dans le tissu traditionnel au niveau de la ruelle du ksar (PT14) où on enregistre une différence de température de 3.15°C par rapport au site ouvert du cimetière des martyrs (PT04). On voit que l'ouverture au ciel, l'organisation des formes urbaines, leurs orientations ainsi que l'intensité de la circulation sont des clés agissant sur la température de l'air.
- 55 L'effet rafraîchissant de la végétation (PCI) est d'une intensité variable d'un site à l'autre, corroborant les résultats de plusieurs auteurs (Ren et al., 2013 ; Oliveira et al., 2011 ; Potchter et al., 2010 ; Bowler et al., 2010). L'effet maximal de la végétation est de 5.61°C (la différence de température PT04 – PT16). Dans le site du camping M'zab et de la palmeraie de Bounoura (PT03 et PT11), l'effet de la végétation n'est pas ressenti malgré la grande densité d'arbres. Les mesures dans ces deux sites ont été prises dans des points à la limite du couvert végétal qui ne sont pas ombragés. Ce constat indique que l'effet modérateur de la végétation durant le jour est dû principalement à l'ombre fournie par la canopée dense des arbres.
- 56 D'après les résultats de mesure du rayonnement solaire, le taux de réduction du rayonnement par la canopée varie d'un site à l'autre et selon les types ou les espèces d'arbres. La réduction du rayonnement dépasse les 88%. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Kotzen (2003) où sont rapportées des réductions de l'ordre de 90% sous plusieurs espèces dans le désert de Negev. On voit bien que le choix des espèces d'arbres peut être un élément important de confort en ville. Les espèces étudiées (l'eucalyptus, le casuarina, le tamaris et le palmier dattier) réduisent considérablement le rayonnement solaire sous leur frondaison. Ces arbres à feuillage persistant sont bien adaptés au climat de la ville de Ghardaïa : ils nécessitent peu d'entretien et d'irrigation par les services municipaux.
- 57 Dans la ville chaude et aride d'Amman en Jordanie, Abdel-Aziz et al. (2015) montrent que les canopées des arbres (*Mimosa* et *Royal Poinciana*) peuvent réduire l'énergie solaire incidente de plus de 200 kilowatts au milieu de la journée en été, bien qu'au cours de celle-ci les taux de réduction varient. Toujours à Amman, Alkhatib et Qrunfleh (2018) affirment que la canopée des arbres (*Cedrus libani* et *Pinus halepensis*) réduit amplement la radiation solaire. Louafi et al. (2017) rapportent une réduction du rayonnement solaire de plus de 85 % sous le feuillage des arbres dans le climat chaud et semi-aride de Constantine en Algérie.
- 58 Plusieurs recherches dans d'autres climats ont trouvé des résultats semblables aux valeurs de la présente recherche. Andrade et Vieira (2007) ont enregistré une réduction moyenne du rayonnement solaire de 88 % sous la canopée dense dans un parc à

Lisbonne. Georgi et Ziafradis (2006) ont trouvé que le rayonnement est réduit jusqu'à 98 % sous les arbres à Thessalonique. Il en résulte que plus l'arbre a un feuillage dense, plus il réduit et filtre le rayonnement et offre davantage de confort thermique sous sa canopée.

Les écarts de température nocturne (00 :00h et 05 :00h)

- 59 La nuit est marquée par une homogénéité dans les températures des sites avec un écart plus faible par rapport au jour. A minuit l'IFU le plus fort (0.6°C) est enregistré sur l'oued (PT10) à cause probablement des courants d'air de direction Ouest (figure 10). D'après la figure 2, le vent souffle depuis la palmeraie de Ghardaïa et permet ainsi une formation d'IFU. Le grand facteur d'ouverture au ciel de ce site favorise aussi le refroidissement nocturne, ce qui explique en partie cette réduction de la température.
- 60 La ruelle affiche dans le ksar (PT14) la température la plus haute à cette heure (2.1°C). Le profil très profond de cette ruelle empêche la dissipation rapide de la chaleur emmagasinée durant le jour. De plus la chaleur générée essentiellement par les climatiseurs (voir image dans le tableau 1, en annexe) et les cuisines participe au réchauffement durant la nuit (DeMunck et al., 2013). La même remarque peut être évoquée pour le boulevard Didouche Mourad (PT08) car la galerie couverte maintient la chaleur par rapport au point (PT09) qui lui n'est pas ouvert vers le ciel. D'une manière générale les sites qui ont une grande ouverture au ciel commencent à se refroidir plus rapidement tels que les sites : PT02, PT04, PT11, PT20 et PT 13. Le boulevard 1^{er} Novembre (PT17) est sensiblement chaud aussi à cette heure à cause des climatiseurs et du trafic qui ne commence à baisser qu'à partir de 23 :00 h (voir image dans le tableau 1, en annexe).
- 61 À minuit, les sites végétalisés affichent des températures encore élevées. Le manque d'irrigation réduit l'effet de l'évapotranspiration et ainsi le pouvoir rafraîchissant de la végétation. Si l'ombre de la couronne foliaire des arbres a réduit la température le jour, elle a empêché considérablement le refroidissement de ce point par rayonnement de grande longueur d'onde vers la voûte céleste. Dans les autres sites végétalisés - le groupe d'arbres de la CNAS (PT12), la rue Ibn-Sina (PT15, PT16) et la palmeraie de Bounoura (PT21) - il n'y a pas de différence significative de température avec le site de référence. Le feuillage des arbres piège la chaleur du jour au sein de la couronne foliaire et entre les branches, ce qui contribue au réchauffement des points de mesure sous la végétation (Chudnovsky et al., 2004).
- 62 À la fin de la nuit (05h00), l'intensité de l'îlot de chaleur est plus importante que celle relevée à minuit. Les sites couverts affichent des températures élevées. Le ciel obstrué de certains points rend difficile le refroidissement nocturne. Le désert dégagé à l'extérieur de la ville a profité toute la nuit du rayonnement de grande longueur d'onde vers le ciel pour se refroidir ; le vent a, de plus, favorisé des échanges convectifs importants. En revanche, les sites urbains tardent à perdre l'énergie stockée à cause de la grande capacité thermique des matériaux de construction, de la géométrie complexe du bâti et de la chaleur anthropique. Si on compare la cité 400 logements (PT20) et la cité 20 Août (PT19) (voir image dans le tableau 1, en annexe) par exemple, on remarque que la géométrie de leurs constructions détermine en grande partie leur variation thermique. Si le tissu compact et les ruelles étroites et brisées de la cité 20 Août offre davantage d'ombre durant le jour, la cité 400 logements perd plus rapidement sa

chaleur durant la nuit grâce à sa grande ouverture au ciel. Ainsi, les sites avec un grand facteur de vue au ciel connaissent en général un rythme de refroidissement nocturne rapide. Si le SVF ne provoque pas une différence importante de la température de l'air, il agit surtout sur la température radiante et affecte ainsi le confort thermique (Venhari et al., 2019).

- 63 Le principe de refroidissement par ouverture au ciel est utilisé aussi dans l'organisation de la maison traditionnelle. Dans les habitations du ksar les gens ouvrent le chebek à partir de 18h00 afin de permettre à la chaleur interne de se dissiper (Ravereau, 1981). Le toit plat à faible parapet est un véritable lieu de vie après le coucher de soleil. Du fait de son ouverture au ciel, il perd rapidement sa chaleur par rayonnement nocturne. Le niveau inférieur de la maison étant fermé nécessite plus de temps pour perdre sa chaleur. Les habitants du ksar passent la nuit sur la terrasse pour profiter de la fraîcheur due au refroidissement nocturne vers la voûte céleste. L'architecture savante des maisons à patio reflète l'importance du refroidissement nocturne par l'ouverture au ciel. Les sites urbains à grand SVF dans les extensions en extra-muros agissent de la même manière sur le plan radiatif. Ils présentent plus de confort thermique par rapport aux sites à faible SVF.
- 64 Le désert environnant connaît des vitesses de vent plus importantes durant la nuit (figure 10). Le vent faible dans les sites urbains ne permet pas la dissipation rapide de l'énergie à cause d'une part de la rugosité aérodynamique due à la complexité du bâti et de la végétation et d'autre part de la topographie, la ville se trouvant dans une vallée encaissée alors que le site de référence est au niveau du plateau (figure 11). L'effet modérateur de la végétation est faible à l'aube. Les arbres, en effet, maintiennent la chaleur en la piégeant entre le feuillage et le branchage de la couronne foliaire. Ainsi, les points de mesure situés sous la canopée sont plus chauds. Le rôle de l'ouverture au ciel dans le refroidissement des sites est essentiel, alors que l'évapotranspiration ne joue pas un grand rôle à ce moment-là.

L'effet de la végétation sur les niveaux d'humidité

Variation diurne (14h30)

- 65 Les espaces verts ne manifestent pas de différence significative d'humidité par rapport aux autres sites urbains. La végétation a peu d'influence sur la variation de l'humidité relative à travers les sites étudiés au milieu du jour. À ce moment de la journée, où les températures sont les plus élevées, les plantes ferment leurs stomates et arrêtent la transpiration afin de ne pas perdre leur réserve en eau, ce qui est appelé la résistance stomatique (Saaroni et al., 2004 ; Dubost, 2002). Plus encore, il n'y a pas de différence notable entre les mesures d'humidité effectuées sous la canopée des arbres et celles effectuées à ciel ouvert au sein même de l'espace vert (Si l'analyse était exprimée en pression de vapeur d'eau les valeurs seraient certainement plus nuancées (Ibsen et al., 2021 ; Puliafito et al., 2013 ; Givoni et Saaroni, 2003). Il n'existe pas de plans d'eau ni de fontaine dans la ville de Ghardaïa, et que l'oued est un cours d'eau sec. L'eau est une ressource rare dans le désert.
- 66 Dans la zone étudiée, les arbres ne sont pas irrigués, sauf dans le jardin de Mermed où ils reçoivent un peu d'irrigation le soir. Les arbres adultes et matures peuvent puiser l'eau en profondeur dans le fond de la vallée pour survivre.

- 67 Un autre paramètre est que la plupart des arbres sont de type xérophytique, tel que le tamaris et le palmier dattier, ou bien adaptés à la sécheresse de la région, comme le ficus, le casuarina ou l'eucalyptus. La vallée en forme de cuvette est relativement protégée du vent (qui a un pouvoir desséchant) et les arbres ont plus d'aptitude à surmonter l'été. Dans une étude antérieure réalisée à Ben-Isguen dans la vallée du M'zab, une humidité relative très faible, même au sein de la palmeraie (9 % en moyenne), a été relevée, et ce pendant la période la plus chaude de la journée (Bencheikh et Amieur, 2012). Il en résulte que la végétation, même sous une forme plus dense comme la palmeraie, voit son effet humidifiant baisser considérablement au milieu du jour. Matallah et al. (2020) ont étudié le confort thermique dans la ville de Biskra et sa palmeraie, caractérisée par un climat désertique semblable à celui de Ghardaïa. Ils rapportent des niveaux de stress thermique similaires entre le couvert végétal et les sites bâtis. Les faibles niveaux d'humidité durant le jour ne jouent pas un grand rôle dans l'amélioration du confort thermique. La présence de quelques arbres sous forme d'arbres d'alignement ou d'un petit espace vert a un effet très limité sur l'humidité relative de l'air (Aram et al., 2019 ; Bowler et al., 2010).
- 68 Le sol, sec en permanence, ne contribue pas au phénomène d'évapotranspiration et par conséquent n'a pas d'effet sur l'humidité. Le désert au niveau du site de référence affiche une humidité relative de 10.75 %, ce qui est proche des mesures réalisées dans une autre étude effectuée dans la vallée du M'zab en 2006, sur le plateau dénudé en milieu de journée : 7 % d'humidité relative (Bencheikh et Amieur, 2012). La faible humidité laisse place à une grande énergie sensible donc un grand potentiel de réchauffement de l'air.

Variation nocturne (00 :00h et 05 :00h)

- 69 À minuit, l'écart d'humidité, bien que modeste, peut aller jusqu'à 7 % entre les sites urbains et le désert. Les sites des plateaux, le point de référence Moussalla Moustadjeb (PT 01) et le parc de loisirs (PT 22), ont des valeurs proches, ce qui indique que la topographie et l'altitude jouent un rôle dans la variation de l'humidité, en partie à cause des vitesses élevées du vent au sommet des collines (figure 7).
- 70 Même à quatre heures du coucher du soleil, il n'y a pas de grande différence d'humidité entre les espaces verts et les autres sites urbains. Le jardin Mermed (PT16) sous la canopée affiche une humidité légèrement plus élevée par rapport aux sites dépourvus de végétation. L'absence d'irrigation, la nature xérophytique des arbres et l'effet du vent jouent un rôle certain en ville. Dans le cas d'espaces verts denses, comme le camping M'Zab (PT03) et la palmeraie Bounoura (PT21), on note l'effet humidifiant de la végétation essentiellement au centre du couvert végétal dense où l'évaporation à partir du sol et la transpiration des arbres se combinent pour élever l'humidité relative.
- 71 À l'aube, l'humidité relative des sites s'élève. Le désert enregistre toujours la plus faible valeur par rapport aux sites de la ville. Dans les sites végétalisés, il n'y a pas d'effet localisé de la végétation ; l'évapotranspiration y est toujours faible. En effet, une simple brise peut rapidement occulter la différence d'humidité générée par la transpiration des arbres à travers le mixage et le brassage de l'air. Tous ces facteurs expliquent les faibles taux d'humidité et leur légère variabilité entre sites.

Le rôle de la vitesse de l'air dans les écarts de température et d'humidité

- 72 Durant le jour, la forte irradiation du soleil réchauffe considérablement la surface du désert, ce qui crée des gradients thermiques verticaux provoquant de grandes turbulences et mixages entre les différentes couches de l'air (Ao et al., 2017 ; Warner T. T., 2009). Les points de mesure situés au sommet des collines affichent les vitesses de l'air les plus élevées (PT 01 et PT 22). Dans le désert environnant il n'y a pas beaucoup d'obstacles, les vents balayent la surface du sol plus librement. Sebti et al. (2013) enregistrent des vitesses jusqu'à 4 mètres par seconde à l'extérieur de la ville de Ouargla (Algérie) durant la nuit. En revanche, la ville en contrebas est relativement protégée du vent. De plus, la complexité géométrique des bâtiments, les aménagements urbains et la végétation créent une forte rugosité aérodynamique.
- 73 L'oued (PT 10) se présente quant à lui sous forme d'un long canyon délimité par les murs de protection des berges et les façades des bâtiments qui le longent. La vitesse moyenne au niveau du pont sur l'oued (PT10) est aussi élevée qu'au niveau du plateau avec une valeur de 4.35 mètres par seconde. L'effet de canalisation accélère le vent dans le canyon de l'oued. Les sites urbains enregistrent des vitesses de l'air faibles durant la nuit. Il se trouve que l'altitude et la topographie conditionnent largement la variation de la vitesse de l'air entre les sites urbains et le désert. Ceci a un impact sur la distribution et la variation des températures et de l'humidité entre le désert et la ville, et entre les sites de la ville.
- 74 Ces résultats indiquent que la température dans la zone d'étude n'a pas le temps de se refroidir. Le niveau extrême d'inconfort durant le jour ne fait que baisser pendant la nuit sans jamais atteindre un niveau de confort. L'air étant très chaud, la température minimale reste au-dessus des 30°C. Le vent ne participe pas au confort, bien au contraire : le corps humain reçoit plus de chaleur par convection. Les habitants de ces régions boivent plusieurs litres d'eau jour et nuit. Les fortes chaleurs du jour font que l'air et les matériaux de la ville sont chauffés intensément et les heures de la nuit ne suffisent pas pour perdre toute la chaleur accumulée. Les climatiseurs (figure n°12 en annexe) fournissent un surplus de chaleur à l'atmosphère déjà surchauffée.

Conclusion

- 75 La recherche avait pour objectif l'analyse des variations microclimatiques intra-urbaines dans la ville de Ghardaïa en été, et l'étude de l'effet de la végétation. La période de mesure a été caractérisée par des conditions anticycloniques stables. Les températures et les taux d'humidité de l'air sont représentatifs du climat de la ville en été. L'amplitude thermique quotidienne (l'écart entre la température minimale et maximale) est de 15°C. La température minimale nocturne est supérieure à 30°C, bien au-delà de la limite du confort thermique. L'écart maximal de température entre sites avoisine les 6°C. La différence de température entre les sites urbains (dépourvus de végétation) atteint 4.39°C. Cette différence est due principalement à l'ombre fournie par la géométrie des rues et leur orientation.
- 76 Le comportement thermique des sites varie entre îlots de chaleur et îlots de fraîcheur. Plusieurs îlots de chaleur ont été décelés à travers la ville : il s'agit donc plutôt d'un

« archipel » de chaleur que d'un îlot de chaleur urbain unique. L'intensité maximale de l'îlot de chaleur est de 2.98°C. Les îlots de fraîcheur les plus intenses ont été enregistrés au niveau des espaces verts, jusqu'à 2.62°C. Quant aux différences intra-urbaines, elles sont liées à la présence de végétation qui produit un effet rafraîchissant maximal de 5.61°C (enregistré entre le site du cimetière des martyrs et l'allée Ibn-Sina). Les résultats de mesure aux abords immédiats du couvert végétal (le camping M'zab et la palmeraie de Bounoura) montrent que l'effet de végétation diminue brusquement à la limite de l'espace vert. Ceci peut s'expliquer par le taux de réduction du rayonnement solaire dû à la canopée. Celui-ci varie selon les espèces des arbres. Sous un grand eucalyptus, il est atténué de 87.7 %, et sous un casuarina de 88.4 %. Sous les tamarix, la filtration va jusqu'à 91.2 %. Il en résulte que plus le feuillage de l'arbre est dense, plus il réduit le rayonnement. Ces résultats sont en concordance avec d'autres études (Alkhatib et Qrunfleh, 2018 ; Louafi et al., 2017 ; Abdel-Aziz et al., 2015 ; Zhang et al., 2013 ; Andrade et Vieira, 2007 ; Georgi et Ziafradis, 2006 ; Kotzen, 2003 ; Heisler, 1986).

- 77 Durant la nuit, le profil très profond des rues empêche la dissipation rapide de la chaleur emmagasinée durant le jour. De plus la chaleur anthropique, générée notamment par des climatiseurs et la circulation automobile, participe au réchauffement. Le désert environnant connaît un rythme de refroidissement plus rapide que la ville. A l'aube, la ville affiche un îlot de chaleur maximal de 2.05°C. Les sites urbains tardent à perdre leur énergie stockée à cause de la grande capacité thermique des matériaux de construction, de la géométrie complexe du bâti et de la chaleur anthropique. Si les sites compacts et les ruelles étroites et brisées offrent davantage d'ombre durant le jour, les sites ayant une grande ouverture au ciel perdent plus rapidement leur chaleur durant la nuit. Ainsi, les sites avec un grand facteur de vue au ciel connaissent en général un rythme de refroidissement nocturne rapide. Si les principaux résultats sont conformes avec ceux de l'étude de Kitous et al. (2012) sur la ville de Ghardaïa, la complexité des sites de mesure et leur variabilité rendent difficile une comparaison fine des résultats, notamment pour les températures de l'air.
- 78 Si l'ombre de la couronne foliaire des arbres a réduit la température le jour, elle empêche considérablement le refroidissement par rayonnement de grande longueur d'onde vers la voûte céleste. Le feuillage et le branchage de l'arbre piègent la chaleur du jour et contribuent au réchauffement de l'air sous la canopée. L'effet rafraîchissant maximal de la végétation à l'aube est de 2.08°C. L'évapotranspiration, très minime, ne contribue pas efficacement à ce rafraîchissement. Les sites végétalisés ne manifestent pas de différence significative d'humidité par rapport aux autres sites urbains. De ce fait, la végétation a peu d'influence sur la variation de l'humidité relative à travers les sites étudiés au milieu du jour, à cause, d'une part, du phénomène de la résistance stomatique, et d'autre part à cause du caractère xérophytique des arbres (Chow et Brazel, 2012 ; Saaroni et al., 2004 ; Dubost, 2002).
- 79 Le désert environnant connaît des vitesses de vent plus importantes durant la nuit. Le vent faible dans les sites urbains ne permet pas la dissipation rapide de l'énergie à cause de la rugosité aérodynamique due à la complexité du bâti et de la topographie. En termes de planification urbaine, plusieurs recommandations peuvent être avancées. Un couvert végétal urbain plus dense pourrait améliorer les conditions de confort en ville. Il serait donc judicieux de densifier les espaces verts pour en créer une « ville-oasis ». Le choix d'arbres adaptés au climat, hauts avec une canopée large afin d'ombrager les voies (chaussée et trottoirs) serait bénéfique. En matière d'espèces végétales, il est ainsi

recommandé de choisir des plantes de types « xérophytiques » pour faire face à la pénurie d'eau. Les espèces étudiées (l'eucalyptus, le casuarina, le tamaris et le palmier dattier) présentent une bonne efficacité de consommation d'eau d'irrigation. Elles sont aussi d'une grande efficacité dans la réduction du rayonnement solaire sous leur frondaison. Il est recommandé de multiplier la plantation de ces espèces dans les rues et les jardins afin d'offrir le maximum d'ombre.

- 80 Les zones de développement futur devraient prévoir des tissus compacts reprenant les caractéristiques locales de construction. Il faudrait aussi éviter les vastes aires asphaltées ou pavées de couleur sombre, et les remplacer par des matériaux de couleurs claires diminuant l'accumulation de la chaleur. Un autre volet de recommandations couvre la mobilité, en limitant la circulation en centre-ville et en favorisant une mobilité douce (transports en commun et circulation verte en vélo).

Nous adressons nos remerciements aux services de la ville de Ghardaïa pour l'autorisation donnée pour la campagne de mesure.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdel-Aziz, D. M., A. Al-Shboul et N. Y. Al-Ku, 2015, Effects of Tree Shading on Building's Energy Consumption – The Case of Residential Buildings in a Mediterranean Climate, *American Journal of Environmental Engineering* 2015, 5, 5, pp. 131-140.
- Adad, M. C., M. T. Mazouz, 2013, Les anciens et nouveaux ksour : étude comparative, cas du m'zab, *Courrier du Savoir*, 16, pp. 77-87.
- Akbari, H., D. M. Kurn, S. E. Bretz et J. W. Hanford, 1997, Peak power and cooling energy savings of shade trees, *Energy and Buildings*, 25, 2, pp. 139-148.
- Akbari, H., M. Pomerantz et H. Taha, 2001, Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas, *Solar Energy*, 70, 3, pp. 295-310.
- Alcoforado, M.J., A. Matzarakis, 2010, Planning with urban climate in different climatic zones, *Geographicalia*, 57, pp. 5-39.
- Alkhatib, L. M. S., M. M. Qrunfleh, 2018, Plants as an Element in Microclimate Modification in Jordan Landscape Courtyard Gardens, *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 14, 1, 2018.
- Andrade, H., R. Vieira, 2007, A climatic study of an urban green space: the Gulbenkian park in Lisbon (Portugal), *Finisterra*, xlii, 84, pp. 27-46.
- Ao, Y., J. Li, Z. Li, S. Lyu, C. Jiang et M. Wang, 2017, Relation between the Atmospheric Boundary Layer and Impact Factors under Severe Surface Thermal Conditions, *Advances in Meteorology*, 2017, ID 8352461, 12 p.
- Aram, F., E. H. García, E. Solgi et S. Mansournia, 2019, Urban green space cooling effect in cities, *Heliyon* 5, 2019 e01339, [En ligne] URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019300702>

- Arnfield, A., 2003, Two decades of urban climate research : a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island, *International Journal of Climatology*, 23, pp. 1-26.
- Bacci, L., M. Morabito, A. Raschi et F. Ugolini, 2003, Thermohygrometric conditions of some urban parks of Florence (Italy) and their effect on human wellbeing. *Proceedings of "Fifth International Conference on Urban Climate"*, 1-5 September Lodz, Poland.
- Barradas, V. L., 1991, Air temperature and humidity and human comfort index of some city parks of Mexico City, *International Journal of Biometeorology*, 35, pp. 24-28.
- Baker, L. A., A. J. Brazel, A. J., N. Selover, C. Martin, N. McIntyre, F. Steiner, F., A. Nelson et L. Musacchio, 2002, Urbanization and warming of Phoenix (Arizona, USA): Impacts, feedbacks and mitigation, *Urban Ecosystems*, 6, pp. 183-203.
- Ben Shalom, H., O. Potchter et H. Tsoar, 2009, The effect of the urban heat island and global warming on thermal discomfort in a desert city- the case of beer sheva, Israel, *The seventh International Conference on Urban Climate*, 29 June – 3 July 2009, Yokohama, Japan.
- Benyoucef, B., 2010, *Le M'Zab parcours millénaire*, Éditions ALPHA, Alger, 253 p.
- Besancenot, J.P., 2013, La ville à l'épreuve du milieu aride et semi-aride. Article introductif, *Secheresse*, 24, pp. 159-163.
- Bouchair, A., 2004, Decline of urban ecosystem of Mzab valley, *Building and Environment*, 39, pp. 719-732.
- Bouchahm, Y., F. Bourbia et A. Belhamri, 2011, Performance analysis and improvement of the use of wind tower in hot dry climate, *Renewable Energy* 36, pp. 898-906.
- Boukhabla, M., D. Alkama et A. Bouchair, 2013, The effect of urban morphology on urban heat island in the city of Biskra in Algeria, *International Journal of Ambient Energy*, 34, 2, pp. 100-110.
- Bowler, D.E., L.-M. Buyung-Ali, T.M. Knight et A. S. Pullin, 2010, A systematic review of evidence for the added benefits to health of exposure to natural environments, *BMC Public Health*, 10, 456, [En ligne], URL : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20684754/>.
- Brazel, A. J., N. Selover, R. Vose et G. Heisler, 2000, The tale of two cities: Baltimore and Phoenix urban LTERs, *Climate Research*, 15, 2, pp. 123-135.
- Brown, M.J., C.S.B. Grimmond, 2001, Sky view factor measurements in downtown Salt Lake City – Data report for the DOE CBNP URBAN Experiment, Oct. 2000, *Internal Report, March, 2001*, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, LA-UR-01- 1424, 44 p.
- Cadot, E., A. Spira, 2006, Canicule et surmortalité à Paris en août 2003, Le poids des facteurs socio-économiques, *Espace urbain et santé*, 2-3, pp. 239-249.
- Chebli, M., S. Charfi et S. Dahech, 2020, Répartition spatio-temporelle des températures dans l'agglomération de Kairouan (Tunisie) pendant la saison chaude 2019, *Climatologie*, 17, 4, [En ligne], URL : <https://doi.org/10.1051/climat/202017004>.
- Chen, D., H.W. Chen, 2013, Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010, *Environmental Development*, 6, pp. 69–79.
- Chow, W. T. L., R. L. Pope, C. A. Martin et A. J. Brazel, 2010, Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: horizontal and vertical impacts, *Theoretical and Applied Climatology*, 103, 1–2, pp. 197-211.
- Chow, W. T. L., A. J. Brazel, 2012, Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city, *Building and Environment*, 47, 1, pp. 170-181.

- Chudnovsky, A., E. Ben-Dor et H. Saaroni, 2004, Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements, *Energy Building*, 36, pp. 1063-1074.
- Correa, E.N., C. Rosa et G. Lesino, 2006a, Impact of urban design strategies on the urban climate in arid regions. The case of Mendoza's Metropolitan Area, in Argentina, *Proceedings 'Living in Deserts: Is a sustainable urban design still possible in arid and hot regions?'* Ghardaïa, Algeria, 9-12 December.
- Correa, E., C. Martínez, G. Lesino, C. de Rosa et A. Cantón, 2006b, Impact of urban parks on the climatic pattern of Mendoza's metropolitan area, in Argentina, *The 23rd conference on passive and low energy architecture*, PLEA Geneva, Switzerland.
- Côte, M., 2005, La ville et le désert, le bas Sahara algérien, Karthala, Paris. 306 p.
- DeMunck, C., G. Pigeon, V. Masson, F. Meunier, P. Bousquet, B. Tréméac, M. Merchat, P. Poeuf et C. Marchadier, 2013, How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *International Journal of Climatology*, 33, pp. 210-227.
- Dialesandro, J. M., S. M. Wheeler et Y. Abunnasr, 2019, Urban heat island behaviors in dryland regions, *Environmental Research Communication*, 1, 8, [En ligne] URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/ab37d0/meta>
- Dimoudi, A., M. Nikolopoulou, 2003, Vegetation in the urban environment: microclimate analysis and benefits, *Energy and Buildings*, 35, pp. 69-76.
- D.P.A.T., 2005, *Atlas : Annuaire statistique de la Wilaya Ghardaïa*, Direction de la planification et de l'aménagement du territoire de la Wilaya de Ghardaïa.
- Dubost, D., 2002, *Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes*, Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides, 423 p.
- García-Cueto, O. R., E. Jauregui-Ostos, D. Toudert et A. Tejeda-Martínez, 2007, Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., Mexico and its relationship with land use, *Atmosfera*, 20, pp. 111-131.
- García-Cueto, O. R., A. Tejeda-Martínez et G. Bojórquez- Morales, 2009, Urbanization effects upon the air temperature in Mexicali, B. C., Mexico, *Atmósfera*, 22, pp. 349-365.
- Georgi, N.J., K. Zafiriadis, 2006, The impact of park trees on microclimate in urban areas, *Urban Ecosystems*, 9, pp. 195-209.
- Ghribi, M., S. Dahech, 2020, Caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain à Sfax durant la saison chaude (centre-est de la Tunisie), *Climatologie*, 17, 7, [En ligne], <https://doi.org/10.1051/climat/202017007>.
- Giridharan, R., S. Ganesan et S. S. Y. Lau, 2004, Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong, *Energy and Buildings*, 36, 6, pp. 525-534.
- Givoni, B., 1991, Impact of planted areas on urban environmental quality: A review, *Atmospheric Environment*, 25, pp. 289-299.
- Givoni, B., H. Saaroni, 2003, Predicted sun exposed irrigated lawn temperature, *Fifth International Conference on Urban Climate*, 15 September 2003, Lodz, Poland.
- Guhathakurta, S., P. Gober, 2007, The Impact of the Phoenix Urban Heat Island on Residential Water Use, *Journal of the American Planning Association*, 73, 3, pp. 317-329.
- Hamada, S., T. Tanaka et T., Ohta, 2013, Impacts of land use and topography on the cooling effect of green areas on surrounding urban areas, *Urban forestry & urban greening*, 12, 4, pp. 426-434.

- Harlan, S. L., A. J. Brazel, L. Prashad, W. L. Stefanov et L. Larsen, 2006, Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress, *Social Science & Medicine*, 63, 11, pp. 2847-2863.
- Hao, X., W. Li, 2016, Oasis cold island effect and its influence on air temperature: a case study of Tarim Basin, Northwest China, *J Arid Land*, 8, 2, pp. 172-183.
- Heisler, G.M., 1986, Energy Savings with Trees, *Journal of Arboriculture*, 12, 5, pp. 113-125.
- Hémon, D., E. Jougl, J. Clavel, F. Laurent, S. Bellec et G. Pavillon, 2003, Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 en France. République Française. Ministère de la santé de la famille et des personnes handicapées, *Institut de veille sanitaire*, Numéro spécial : BEH, 45-46, 76 p.
- Hidalgo, J., V. Masson et L. Gimeno, 2010, Scaling the Daytime Urban Heat Island and Urban-Breeze Circulation, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 5, pp. 889-901.
- Hodul, M., A. Knudby et H.C. Ho, 2016, Estimation of Continuous Urban Sky View Factor from Landsat Data Using Shadow Detection, *Remote Sensing*, 8, 568, [En ligne], <https://doi.org/10.3390/rs8070568>.
- Howard, L., 1833, *The Climate of London*, Reprinted 2007, IAUC edition, 284 p.
- Huang, Y.J., H. Akbari, H. Taha et A. H., Rosenfeld, 1987, The potential of vegetation in reducing summer cooling loads in residential buildings, *Journal of Applied Meteorology*, 26, 9, pp. 1103- 1116.
- Fan, C., S.W. Myint, S. Kaplan, A. Middel, B. Zheng, A. Rahman, H.-P. Huang, A. Brazel, et D.G. Blumberg, 2017, Understanding the Impact of Urbanization on Surface Urban Heat Islands—A Longitudinal Analysis of the Oasis Effect in Subtropical Desert Cities, *Remote Sens*, 9, 7, 672, [En ligne], URL : <https://doi.org/10.3390/rs9070672>.
- Frey, C.M., G. Rigo, E. Parlow et A. Marçal, 2006, The cooling effect of cities in a hot and dry environment. Global developments in environmental earth observation from space, *Proceedings of the 25th EARSeL Symposium*, Porto, Portugal, 2005-2006, pp. 169-174.
- Ibsen, P. C., D. Borowy, T. Dell, H. Greydanus, N. Gupta, D. M. Hondula, T. Meixner, M. V. Santelmann, S. A. Shiflett, M. C. Sukop, C. M. Swan, M. L. Talal, M. Valencia, M. K. Wright et G. D. Jenerette, 2021, Greater aridity increases the magnitude of urban nighttime vegetation-derived air cooling, *Environmental Research Letters*, 16, 3, [En ligne] URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abdf8a>
- Jauregui, E., 1991, Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city, *Energy and buildings*, 15, 3, pp. 457-463.
- Kitous, S., 2012, *Forme urbaine et environnement thermos-aéraulique en climat chaud et sec : Cas du ksar de Ghardaïa dans le Sahara algérien*, Thèse de doctorat, Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme, Alger, Algérie.
- Kotteck, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf et F. Rubel, 2006, World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 3, pp. 259-263.
- Kotzen, B., 2003, An investigation of shade under six different tree species of the Negev desert towards their potential use for enhancing micro-climatic conditions in landscape architectural development, *Journal of Arid Environments*, 55, pp. 231-274.
- Krüger, E., P. Drach et R. Emmanuel, 2018, Atmospheric Impacts on Daytime Urban Heat Island, *Air, Soil and Water Research*, 11, 1-3, [En ligne] URL : <https://doi.org/10.1177/1178622118810201>
- Kurn, D., S. Bretz, B. Huang et H. Akbari, 1994, The potential for reducing urban air temperatures and energy consumption through vegetative cooling, *Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 9, 155, Pacific Grove, CA, August 1994.

- Laïlle, P., D. Provendier et F. Colson, 2015, Effets du végétal sur le cadre de vie et la santé humaine, *Innovations Agronomiques*, 45, pp. 47-60.
- Lazzarini, M., Marpu, P.R. et H. Ghedira, 2013, Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas, *Remote Sensing of Environment*, 130, pp. 136-152.
- Li, C., N. Zhang, 2021, Analysis of the Daytime Urban Heat Island Mechanism in East China, *JGR: Atmospheres*, 126, 12, [En ligne], URL : <https://doi.org/10.1029/2020JD034066>
- Louafi, S., S. Abdou et S. Reiter, 2017, Effect of vegetation cover on thermal and visual comfort of pedestrians in urban spaces in hot and dry climate, *Nature & Technology Journal*, 17, 30, pp. 30-41.
- Makhelouf, A., 2013, The contribution of urban green spaces in the regulation of the microclimate and the improvement of the air quality in cities, *Asian Journal of Current Engineering and Maths* 2, 3, pp.190 - 195.
- Matallah M. E., D. Alkama, A. Ahriz et S. Attia, 2020, Assessment of the Outdoor Thermal Comfort in Oases Settlements, *Atmosphere*, 11, 2, 185, [En ligne], URL : <https://doi.org/10.3390/atmos11020185>
- Mestayer, P.G., Y. Brunet, 2015, Impact de la végétation urbaine sur la qualité de l'air, *Innovations Agronomiques*, 45, pp. 35-45.
- Middel, A., A. J. Brazel, S. Kaplan et S. W. Myint, 2012, Daytime cooling efficiency and diurnal energy balance in Phoenix, Arizona, USA, *Climate Research*, 54, pp 21-34.
- Motazedian, A., P. Leardini, 2012, Impact of green infrastructures on urban microclimates. A critical review, *46th Annual Conference of the Architectural Science Association (ANZAScA)*, Griffith University, Gold Coast.
- Nassar, A.K., G. A. Blackburn et J.D. Whyatt, 2016, Dynamics and controls of urban heat sink and island phenomena in a desert city: Development of a local climate zone scheme using remotely-sensed inputs, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf*, 51, pp. 76-90.
- Nouibat, B., A. Tacherift, 2007, L'occupation optimale du sol urbain à l'habitation individuelle dans les régions arides, villes maghrébines et orientales, cas d'étude : Bou-Saada, *Sciences & Technologies*, D, 25, pp. 50-64.
- Oke, T. R., 1987, *Boundary Layer Climates*, Routledge, 435 p.
- Oliveira, S., H. Andrade et T. Vaz, 2011, The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon, *Build. Environ.*, 46, pp. 2186-2194.
- O.N.M., 2016, Office national de météorologie, station de Ghardaïa.
- O.P.V.M., 2012, (Office de Protection et de Promotion de la Vallée du M'Zab), Guide des sites et monuments historiques de la wilaya de Ghardaïa, Ministère de la Culture, Algérie.
- Pandit, R., D. N. Laband, 2010, Energy savings from tree shade, *Ecological Economics* 69, pp. 1324-1329.
- Pearlmutter, D., P. Berliner et E. Shaviv, 2007, Urban climatology in arid regions: current research in the Negev desert, *International Journal of Climatology*, 27, pp. 1875-1885.
- Peel, M., B. Finlayson et T. McMahon, 2007, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, pp 1633-1644.
- Potchter, O., Y. Yaakov, L. Shashua-Bar, S. Cohen, J. Tanny, J. et P. Bar-Kutiel, 2010, City Weather: *Meteorology and Urban Design*, pp. 1-13.

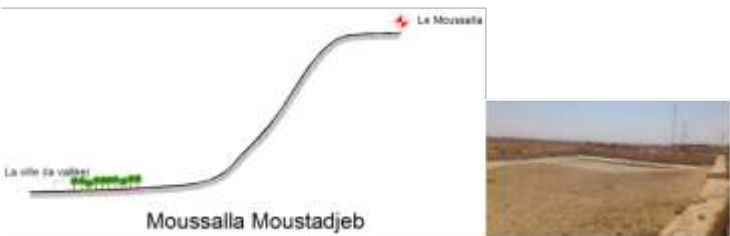
- Potchter, O., I. H. Ben-Shalom, 2013, Urban warming and global warming: combined effect on thermal discomfort in the desert city of Beer Sheva, Israel, *Journal of Arid Environment*, 98, pp. 113-122.
- Puliafito, S., F. Bochaca, D. Allende et R. Fernandez, 2013, Green Areas and Microscale Thermal Comfort in Arid Environments: A Case Study in Mendoza, Argentina, *Atmospheric and Climate Sciences*, 3,3, pp. 372-384.
- Rasul, A., H. Balzter et C. Smith, 2015, Spatial variation of the daytime surface urban cool island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from landsat 8, *Urban Climate*, 14 (Part 2), pp. 176-186.
- Ravereau, A., 1981, *Le Mzab, une leçon d'architecture*, Paris, Sindbad. 282 p.
- Ravereau, A., R. Baudouï, R., P. Potié, Y. Cussey et R. L. Perraudin, 2003, *L'atelier du désert*, Parenthèses éditions, Marseille, France, 192 p.
- Ren, Z., X. He, H. Zheng, D. Zhang, X. Yu, G. Shen et R. Guo, 2013, Estimation of the Relationship between Urban Park Characteristics and Park Cool Island Intensity by Remote Sensing Data and Field Measurement, *Forests*, 4, pp. 868-886.
- Ringenbach, N., 2004, *Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg*, Thèse : climatologie et temps, Université Strasbourg I, 167 p.
- Rosenzweig, C., W. Solecki, L. Parshall, S. Gaffin, B. Lynn, R. Goldberg, J. Cox et S. Hodges, 2006, Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces, Dans : *Proceedings of Sixth Symposium on the Urban Environment, January 30-February 2, Atlanta, GA*.
- Rosheidat, A., H. Bryan et D. Hoffman, 2008, Visualizing Pedestrian Comfort in a Hot Arid Urban Environment Using ENVI-met, SIMBUILD2008, *International Building Performance Simulation Association (IBPSA)*, University of California, Berkeley.
- Roth, M., 2007, Review of urban climate research in (sub) tropical regions, *International Journal of Climatology*, 27, pp. 1859-1873.
- Saaroni, H., A. Bitan, E. B. Dor et N. Feller, 2004, The mixed results concerning the 'oasis effect' in a rural settlement in the Negev Desert, Israel, *Journal of Arid Environments*, 58, pp. 235-248.
- Saito, I., T. Ishihara et T. Katayama, 1990/91, Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area, *Energy and Buildings*, 15-16, pp. 493-498.
- Saudreau, M., P. Kastendeuch, J. Ngao, G. Najjar et T. Améglio, 2015, Régulation du climat thermique urbain par les arbres : ombrage et température du couvert, *Innovations Agronomiques*, 45, pp. 23-34.
- Sebti, M., D. J. Alkama et A. Bouchair, A., 2013, Assessment of the effect of modern transformation on the traditional settlement 'Ksar' of Ouargla in southern Algeria, *Frontiers of Architectural Research*, 2, pp. 322-337.
- Sharifi, E., A. Ali Soltani, 2017, Patterns of Urban Heat Island Effect in Adelaide: A Mobile Traverse Experiment, *Modern Applied Science*, 11, 4, pp. 1-80.
- Shashua-Bar, L., M. E. Hoffman, 2000, Vegetation as a climatic component in the design of an urban street, *Energy and Buildings*, 31, pp. 221-235.
- Shashua-Bar, L., D. Pearlmutter et E. Erell, 2009, The Cooling Efficiency of Urban Landscape Strategies in a Hot Dry Climate, *Landscape and Urban Planning*, 92, 3-4, pp. 179-186.

- Shiflett, S. A., L. L. Liang, S. M. G. Crum, L. Feyisa, J. G. Wang et D. Jenerette, 2017, Variation in the urban vegetation, surface temperature, air temperature nexus, *Science of the Total Environment*, 579, pp. 495–505.
- Sobstyl, J.M., T. Emig, M. J. A. Qomi, R. J. M. Pellenq et F. J. Ulm, 2017, Role of Structural Morphology in Urban Heat Islands at Night Time, *Physical Review Letter*, 120, 108701, May 2017, [En ligne], URL : <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.120.108701>
- Sofer, M., O. Potchter, 2006, The urban heat island of a city in an arid zone: the case of Eilat, Israel, *Theoretical and Applied Climatology*, 85, pp. 81-88.
- Souch, CA., C. Souch, 1993, The effect of trees on summertime below canopy urban climates: a case study Bloomington, Indiana, *Journal of Arboriculture*, 19, 5, pp. 303-312.
- Spronken-Smith, R. A., T. R. Oke, 1998, The Thermal Regime of Urban Parks in Two Cities With Different Summer Climates, *International Journal of Remote Sensing*, 19, 11, pp. 2085-2104.
- Streiling, S., A. Matzarakis, 2003, Influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of a city: a case study, *J. Arboriculture*, 29, pp. 309-316.
- Taleb, H., D. Taleb, 2014, Enhancing the thermal comfort on urban level in a desert area: Case study of Dubai, United Arab Emirates, *Urban forestry & urban greening*, 13, 2, pp. 253-260.
- Venhari, A.A., M. Tenpierik et M. Taleghani, 2019, The role of sky view factor and urban street greenery in human thermal comfort and heat stress in a desert climate, *Journal of Arid Environment*, 166, pp. 68–76.
- Warner, T. T., 2009, *Desert Meteorology*, Cambridge University Press, 620 p.
- Yamamoto, Y., 2006, Measures to mitigate urban heat islands, *Quarterly Review*, Vol. 18, pp. 65-83.
- Yu, C., W. N. Hien, 2006, Thermal benefits of city parks, *Energy and Buildings*, 38, pp. 105–120.
- Zhang, A., Y. Lu et H. Pan, 2013, Cooling and humidifying effect of plant communities in subtropical urban parks, *Urban Forestry & Urban Greening*, 12, pp. 323–329.
- Zoulia, I., M. Santamouris et A. Dimoudi, 2009, Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens, *Environmental Monitoring and Assessment* 156, pp. 275–292.

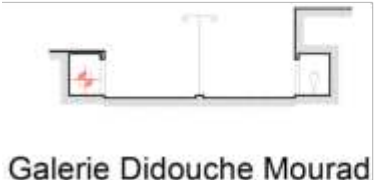
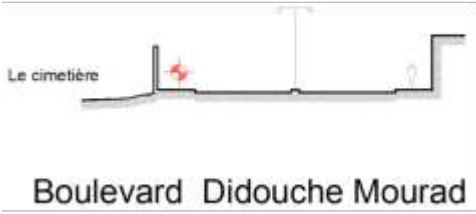
ANNEXES

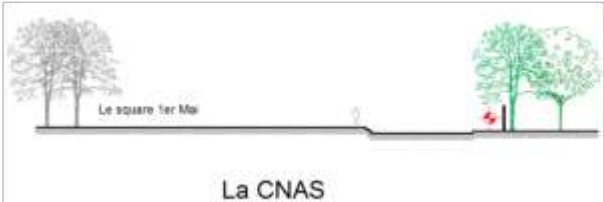
Tableau n° 1. Profil des sites de mesure et description.

N° du point de mesure	Profil du site de mesure	Descr
-----------------------	--------------------------	-------

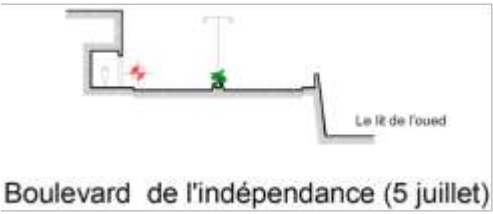
PT 01	Image 100685FC00003B8900000F82B2ACFD98AD237954.emf 	Trafic Pas végét désert Très L
PT 02	 Registre de commerce	Trafic Pas végét Sol en Admi Tissu conte Large
PT 03	Image 1008F4EC00003B890000019E5295FDF427B5E283D.emf  Camping M'zab	Trafic Dense végét le cam Sol en Orien SO Admi loisir Tissu conte Large Le ja pas régul

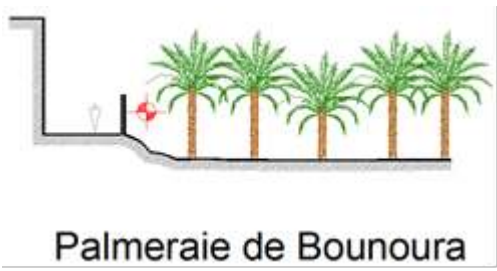
PT 04	 Cimetière des martyrs	Trafic Très végét Sol en Activi comm Tissu conte Large
PT 05 PT 06	Image 1008974400003B8900001BCDAFF182399E452A4E.emf  Jardin de Mermed 	Trafic Dense végét Résid loisir Tissu conte Large PT 05 canop PT 06 soleil
PT 07	Image 10054C8000003B89000019385FD76D4B970CE081.emf  Rue Zoubiri Zoubir 	Trafic Très végét Résid Orien Sol en Tissu conte

PT 08	Image 1005BFD800003B890000134E5B36EE47E6C1C5FF.emf  Galerie Didouche Mourad	Trafic Pas végét Sol en Orien SO Activi comm Tissu conte
PT 09	Image 100765A800003B89000011D85F6ABB4EFEB60B.emf  Boulevard Didouche Mourad	Trafic Pas végét Sol en Orien SO Activi comm Tissu conte Large
PT 10	Image 1005C78C00003B8900000D024BB758FC7BCE0049.emf  Pont de l'oued 	Trafic inten Pas végét Sol en Activi comm Tissu conte Très l

PT 11	Image  Place 1er mai	1008E3C400003B8900001A99E8AC28562B4534EF.emf Trafic Faible végét Sol e béton Activi comm Tissu conte Très l
PT 12	Image  La CNAS	1008C62C00003C820000102BD67D182463BA678B.emf Trafic Touff Sol en Activi comm Tissu conte Très l
PT 13	 Boulevard Talbi Ahmed	Trafic 03 d'arb Sol en Activi comm Tissu

PT 14	Image 1003A98400003C820000172CB7E9C7BF7C9FD933.emf  Ruelle du ksar 	Trafic moto piéto Pas végét Sol en Habit tradit Tissu verna
PT 15	Image 1004179000003B8900000F4032840E9AA68E0EB5.emf  Rue Ibn Sina (ensoleillé) 	Trafic Sol en Admi habita Tissu
PT 16	Image 1004392400003C820000193D7D7B7C6A0A8BFD4F.emf  Rue Ibn Sina (sous la canopée) 	Trafic Tunn Sol en Admi habita Tissu

PT 17	Image 1009D43800003D7A000025890FF23BEA4923702D.emf   	Trafic 02 r palmi Sol en Activi comm Tissu
PT 18	Image 1008BFA400003B8900000F6E71D5DF1779B46E19.emf  	Trafic Faible végét Sol en Activi comm Tissu
PT 19	Image 100460FC00003C82000013052AAA3280E63CC005.emf 	Trafic piéto Pas végét Sol en Habit Tissu conte

PT 20	Image 1005FB8000003B8900000EBB023C055CF9819420.emf  Cité 400 logements	Trafic Pas végét Sol en Habit Tissu conte
PT 21	 Palmeraie de Bounoura	Trafic piéton Lisière palme Sol en Habit Equip Tissu conte Cette dans palme pas régul
PT 22	 Parc de loisir "Oasis Kids"	Trafic Pas végét Parc (enfan Très l

Le point de mesure



Tableau n° 3. Température de l'air des sites de mesure (moyennes sur la période de la campagne de mesure).

	05:00 h	14:30 h	00:00 h
PT 01	30,1	44,96	34,4
PT 02	30,93	46	34,9

PT 03	30,4	46,6	34,95
PT 04	30,9	47,95	34,8
PT 05	30,56	42,46	35,15
PT 06	30,06	45,82	34,85
PT 07	31,72	43,56	34,6
PT 08	32,15	44,04	35,4
PT 09	31,95	44,8	34,65
PT 10	31,65	44,6	33,8
PT 11	31,75	45,3	34,7
PT 12	31,8	43,66	34,3
PT 13	31,85	44,7	34,3
PT 14	31,1	44,8	36,5
PT 15	30,93	45,08	34,5
PT 16	31,36	42,34	34,55
PT 17	31,65	47,2	35,2
PT 18	31,9	44,2	35
PT 19	31,66	43,63	34,8
PT 20	30,33	46,3	34,41
PT 21	30,2	44,75	34,4
PT 22	30,4	44,3	34,2
moy	31,1522727	44,8659091	34,7436364
min	30,06	42,34	33,8
max	32,15	47,95	36,5

Tableau n° 4. Humidité relative de l'air des sites de mesure (moyennes sur la période de la campagne de mesure).

	05:00 h	14:30 h	00:00 h
PT 01	20,06	10,75	15,25

PT 02	22,4	11,52	19,76
PT 03	22,4	11,74	19,7
PT 04	22,1	12,6	21
PT 05	21,7	12,58	19,3
PT 06	22,5	11,8	19,3
PT 07	20,32	14,63	21
PT 08	22,3	10,2	18,55
PT 09	22,8	10,6	16,9
PT 10	22,95	10,65	19,8
PT 11	23,1	10,96	19,8
PT 12	23,5	11,96	20,5
PT 13	24,25	14,4	19,5
PT 14	21,7	9,1	18
PT 15	23,6	11,24	20,1
PT 16	24,96	11,52	22
PT 17	23,7	10,55	19,3
PT 18	22,6	12,6	19,5
PT 19	22,86	9,95	20
PT 20	23	11,75	19,6
PT 21	23,9	11,45	19,8
PT 22	21,5	11,15	17,1
moy	22,64	11,53	19,35
min	20,06	9,1	15,25
max	24,96	14,63	22

Tableau n° 5. Vitesses de l'air des sites de mesure (moyennes sur la période de la campagne de mesure).

	05:00 h	14:30 h	00:00 h
--	---------	---------	---------

PT 01	2,35	4,43	4,1
PT 02	0,41	2,84	0,21
PT 03	0,27	1,33	0,25
PT 04	0,46	0,99	0,37
PT 05	0,28	2,52	0,48
PT 06	0,32	2,24	1,8
PT 07	0,24	1,72	0,42
PT 08	0,27	1,18	0,18
PT 09	0,15	1,98	0,8
PT 10	1,9	4,35	1,5
PT 11	0,82	1,4	1,5
PT 12	0,2	0,41	0,36
PT 13	0,3	0,2	0,1
PT 14	0,2	0,32	0,2
PT 15	0,21	1,3	0,3
PT 16	0,11	1,31	0,35
PT 17	0,4	1,61	0,6
PT 18	0,21	1,62	0,15
PT 19	0,19	2,02	0,5
PT 20	0,15	1,15	0,9
PT 21	0,17	1,42	0,18
PT 22	0,86	3,85	4,45
moy	0,47	1,82	0,89
min	0,11	0,2	0,1
max	2,35	4,43	4,45

Figure 11. Vue sur la ville depuis la colline (à partir du PT 01, site de référence)



Figure 12. Vue sur les bâtiments situés en bas de la colline qui font face au Camping M'zab, PT 03.



Figure 13. Vue sur le flanc de la colline rocheuse au nord de la zone d'étude (le site de référence est au-dessus de cette colline).



RÉSUMÉS

La caractérisation du climat urbain dans les villes chaudes et arides est essentielle pour comprendre les interactions des variables climatiques avec le bâti et la végétation. Les chaleurs estivales caniculaires constituent une contrainte extrême pour les citoyens, en particulier la population à risque comme les jeunes enfants et les personnes âgées ou malades. La végétation contribue à améliorer le microclimat urbain de ces régions et est considérée comme un moyen de lutte contre les ICU (Ilots de Chaleur Urbains). Cette étude a pour objectif l'analyse des variations microclimatiques intra-urbaines et l'impact de la végétation dans la ville de Ghardaïa à travers une campagne de mesure *in situ*. Le comportement thermique des sites de mesures oscille entre ICU et IFU (Ilot de Fraicheur Urbain). L'étude a montré l'existence d'un « archipel » de chaleur à travers la ville. L'intensité maximale de l'ICU de chaleur est de 2.98°C. La température minimale nocturne est supérieure à 30°C, bien au-delà de la limite du confort thermique. Quant aux différences intra-urbaines, on note que la végétation produit un IFU maximal de 5.61°C. L'effet modérateur de la végétation durant le jour est dû principalement à l'ombre fournie par la canopée des arbres. Les sites végétalisés ne manifestent pas de différence significative d'humidité par rapport aux autres sites urbains. Il s'avère qu'un couvert végétal urbain plus dense et irrigué améliorerait davantage les conditions de confort en ville.

Characterizing urban climate in hot arid cities is a key step to understand the interactions of climatic variables with the built-up and the vegetation. Extreme heat waves in summer are a strong stress especially for heat-vulnerable populations such as young children, the elderly and the sick. Urban Heat Island (UHI) in hot arid regions shows some specific features compared to other regions. Vegetation is known to play a role in alleviating urban heat island especially in hot arid climates. This study aims to analyse intra-urban microclimatic variations and the impact of vegetation in the arid city of Ghardaïa via *in-situ* measurements. The thermal behavior of measurement sites varies between urban heat island and cool island. It was detected an "archipelago" of heat throughout the city. The maximum intensity of UHI is 2.98 ° C. As for the intra-urban differences, the vegetation produces a maximum PCI of 5.61 ° C. The minimum night-time temperature is above 30 ° C, well above the thermal comfort limit. The moderating effect of vegetation is mainly due to the shade provided by tree canopy. Vegetated sites do not show a

significant difference in humidity compared to other built-up sites. It seems that a denser urban vegetation cover would further improve comfort conditions in the city.

INDEX

Mots-clés : îlot de chaleur urbain (ICU), îlot de fraîcheur urbain (IFU), climat aride, végétation, confort thermique, Ghardaïa

Keywords : urban heat island (UHI), parc cool island (PCI), arid climate, vegetation, thermal comfort, Ghardaïa

AUTEURS

RACHID AMIEUR

Université Amar Telidji Laghouat, Laboratoire Énergie et Environnement, Université Constantine 3, Algérie, adresse courriel : r.amieur@lagh-univ.dz

DJAMILA ROUAG SAFFIDINE

Laboratoire Énergie et Environnement, Université Constantine 3, Algérie, adresse courriel : djamila.rouag@univ-constantine3.dz

CHRISTIANE WEBER

Laboratoire TETIS, Maison de la Télédétection, Université de Montpellier – Centre national de la recherche scientifique, France, adresse courriel : christiane.weber@cnrs.fr