

Topoclimat

Mesures itinérantes

Aspect topoclimatiques de Bizerte (NE de la Tunisie) : Ilot de chaleur urbain et brises thermiques

Salem Dahech et Sami Charfi

Université de Sfax, Faculté des Lettres et Sciences Humaines
Laboratoire SYFACTE, route de l'aéroport km 5, 3023 Sfax,
Tunisie
salem.dahech@gmail.com ; charfisami_geo@yahoo.fr

Cette étude portant sur la brise littorale et l'îlot de chaleur urbain (ICU) à Bizerte (au NE de la Tunisie) montre que la périphérie rurale est plus fraîche la nuit que le centre de Bizerte, par temps radiatifs (clair et calme). Un ICU d'une intensité modérée, ne dépassant pas 5,5°C, est enregistré sous abri à 2 mètres au-dessus du sol. L'aérodologie est très influencée, notamment en été, par les facteurs géographiques locaux : effets de la mer, du lac et de la topographie. Par temps calme, à l'aérodrome, la brise commence à souffler du Lac de Bizerte vers 9 h (heure solaire) en été, sa vitesse avoisine 3 m/s. La brise de mer rejoint la station de l'Institut National de la Météorologie (INM) entre midi et 13 heures et atteint 7 m/s vers 17 h. Dans la zone de la Corniche, au nord de l'agglomération, la brise de mer se déclenche le matin entre 8 et 9 h et se couche le soir vers 21 h. Le soir, une faible brise d'amont s'écoule sur le versant oriental de Jbel Ennadhour.

This study on the coastal breeze and the Urban Heat Island (UHI) in Bizerte (North East Tunisia) shows that the rural surroundings are cooler at night than the center of Bizerte in radiative weather (clear and calm). A UHI of a moderate intensity, not exceeding 5.5°C, is recorded in the shade at 2 meters above the ground. Aerology is highly influenced, especially in summer, by local geographical factors such as the effect of the sea, the lake and topography. In calm weather, at the aerodrome, the breeze starts blowing from the Lake of Bizerte at 9 pm (solar time) in summer; its speed is around 3 m/s. The coastal breeze reaches the National Institute of Meteorology Station (NIM) between noon and 1pm and reaches 7 m/s at 5 pm. In the Corniche area, north of the town, the coastal breeze is triggered in the morning between 8 am and 9 am and sets in the evening around 8 pm and 9 pm. At night, a light mountain breeze flows on the eastern slope of Jebel Ennadhour.

Villes méditerranéennes et changement climatique

Introduction

La ville est souvent plus chaude que la campagne voisine, notamment durant la nuit, à l'exception de certaines villes oasis très végétalisées autour des zones arides ; elle forme un « îlot de chaleur urbain » (ICU) (Oke, 1973 ; Escourrou, 1990). De même, la terre est plus chaude que la mer le jour, et inversement la nuit. Ces contrastes thermiques sont plus élevés lors des situations de calme atmosphérique où la différence de température peut atteindre 8°C, gradient horizontal suffisant pour engendrer des vents locaux, comme la brise littorale (Escourrou, 1982 ; Simpson, 1994). A titre d'exemple, selon Djen (1992), parmi les conséquences de l'expansion urbaine, Shanghai – mégalopole qui a vu sa surface urbanisée doubler entre 1950 et 1980 – a enregistré une hausse de 0,7°C de l'écart entre la température minimale du centre-ville et celle de sa campagne, une diminution de la vitesse du vent de 3,2 à 2,9 m/s, une hausse du pourcentage du rayonnement diffus de 47 à 59% et une faible diminution de l'humidité relative. Les exemples de ce genre ne manquent pas. Par ailleurs, les villes enregistrent des concentrations de polluants atmosphériques 5 à 25 fois plus élevées qu'à la campagne (Liébard et De Herde, 2005). La chaleur excédentaire engendrée par la ville, particulièrement en été, n'est pas sans incidences sur la santé humaine et sur la consommation en énergie électrique dédiée à la climatisation (Fung et al., 2006 ; Tzoulas et al., 2007). En outre, durant les événements caniculaires, il a été montré dans plusieurs villes, notamment aux États Unis, que les quartiers denses, occupés par une population vulnérable, correspondaient à des îlots de chaleur et à la fois à des « îlots de décès » (Johnson et Wilson, 2009).

Cependant, durant la journée, nous pouvons constater que la ville est plus fraîche que la campagne, dans les zones semi-arides (Lazzarini, et al., 2013; Rasul et al., 2015).

En Méditerranée, les situations radiatives (temps clair et calme) dominant en été, laissant apparaître un gradient thermique terre/mer et ville/campagne, d'où l'apparition des brises thermiques et de l'ICU, comme à Bizerte au nord-est tunisien (figure 1A). Ces deux phénomènes sont les principales manifestations climatiques à l'échelle topoclimatique, soit une extension d'une dizaine de kilomètres (Choisnet et Cloppet, 2016). Toutefois, les mesures météorologiques en ville sont difficiles à réaliser en raison de divers facteurs, tels que l'effet de masque, l'effet de parois et le dégagement ponctuel de la chaleur issue des moteurs (véhicules, climatiseurs...), qui peuvent fausser certains résultats notamment au niveau de la température. A ces facteurs s'ajoute la complexité de l'espace urbain dont les caractéristiques (végétation, densité et hauteur du bâti, matériaux de construction, couleurs...) varient d'un quartier à l'autre (Carrega, 2013).

En Tunisie, le réchauffement estival – scénario prévu par la plupart des modèles climatiques (IPCC, 2007 et 2013) – pourrait aggraver les effets néfastes sur la santé humaine et le milieu naturel, ainsi que la consommation d'énergie (Johnson et Wilson, 2009). La compréhension de l'ICU, de la brise et des diverses ambiances bioclimatiques dans la ville est requise pour développer des stratégies d'adaptation et d'atténuation adéquates. Grâce à la recherche en topoclimatologie, des mesures

dans les domaines de l'aménagement et de l'environnement pourraient ainsi être révisées ou instaurées.

Dans le présent travail, nous souhaitons évaluer la variation temporelle des températures enregistrées à la station de l'Institut National de la Météorologie (INM) dans un premier temps. Puis étudier la variabilité spatio-temporelle de la brise et de l'ICU dans l'agglomération de Bizerte dans un second temps.

I. Zone d'étude, méthodes et données

L'agglomération de Bizerte se caractérise par son étalement spatial, sa topographie contrastée et un tissu urbain diversifié et complexe. Ces conditions agissent fortement sur l'écoulement des brises thermiques et la répartition spatiale des températures. En effet, la partie densément bâtie occupe la partie centrale de la ville et une frange littorale, étroite par endroit. Elle s'étend sur 15 km environ, allant de Menzel Jmil au sud, à la Corniche au nord. L'agglomération abrite environ 350 000 habitants. La partie la plus dense correspond à la délégation de Bizerte Nord (environ 75 000 habitants), soit une densité de l'ordre de 1 600 habitants/km² (INS, 2015; figure 1B et C). Les zones végétalisées occupent les

collines qui bordent l'agglomération, culminant à environ 200 m : nous distinguons la forêt de Ennadhour au nord-ouest et celle de Jbel Rmel au sud. En outre, des terres agricoles dominent dans la partie occidentale (figure 1C; figure 2A). Au cœur de cette dernière, à proximité du lac de Bizerte, nous trouvons la station météorologique de l'INM sise dans l'aérodrome de la base aérienne Sidi Ahmed, à environ 9 km du centre-ville de Bizerte et de la Méditerranée. Les données de cette station ne permettent pas de caractériser le climat local de l'agglomération de Bizerte, à l'image des stations situées en milieu rural (Carrega, 1994).

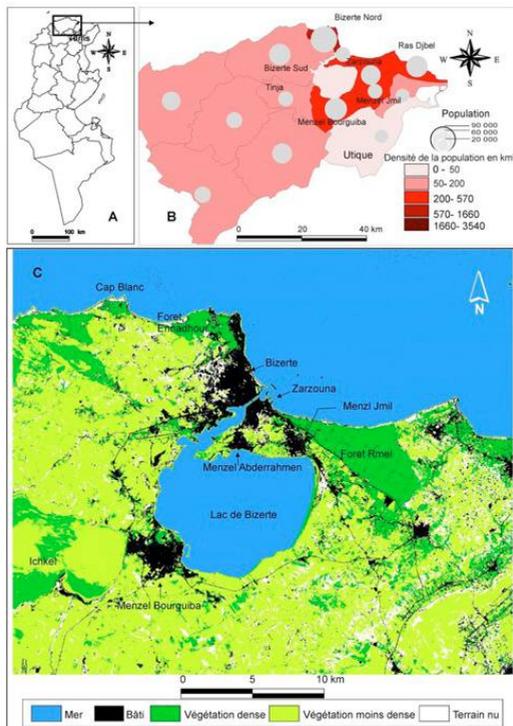


Figure 1. Localisation (A), population (B) et occupation du sol (C) à Bizerte. (données INS 2015 pour B et C déduite à partir d'une image Landsat 8 datée du 4 août 2016).

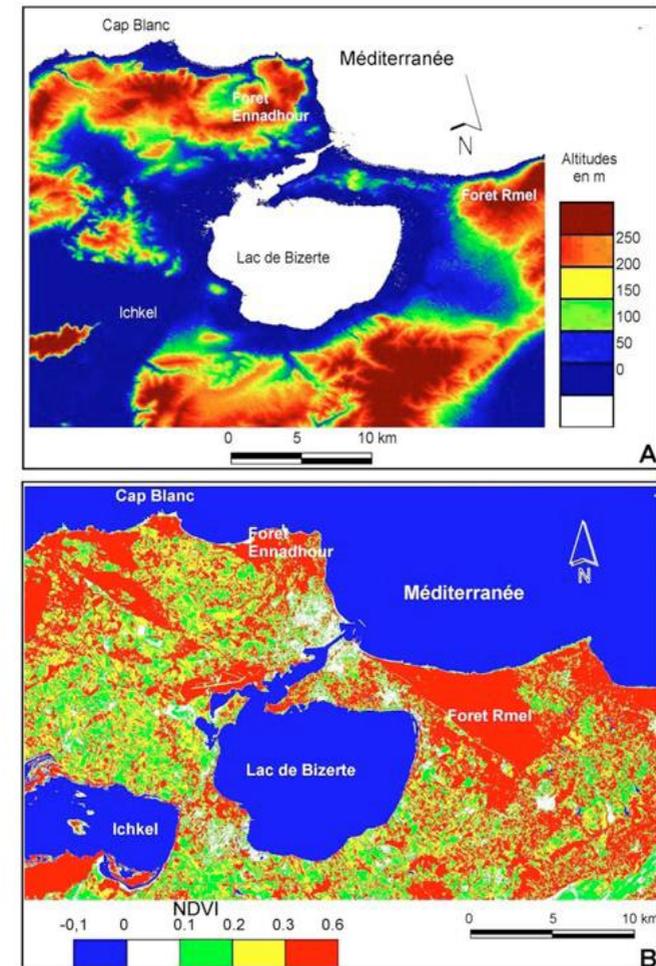


Figure 2. Topographie (A) et Indice de végétation normalisé (NDVI, B) (« A » issue d'un modèle numérique de terrain à 30m de résolution déduit des données ASTER et « B » calculé à partir d'une image Landsat 8 datée du 4 août 2016).

Pour vérifier cette hypothèse, outre les données météorologiques concernant la température et le vent de la station de Bizerte fournies par l'INM, nous avons installé en 2012 une station Davis Instrument (Vantage Pro 2) au nord de l'agglomération, à quelques mètres de la mer. Celle-ci mesure la température, l'humidité, la vitesse et la direction du vent à un pas de temps de 5 mn. Ces données donnent

une idée précise sur le fonctionnement des brises thermiques. Malheureusement, l'écart thermique entre cette station expérimentale et celle de l'INM pouvant renseigner sur l'intensité de l'ICU et sa variabilité temporelle n'a pas pu être calculé en raison d'une panne au niveau du thermomètre. En revanche, l'imagerie issue de l'Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer

(ASTER) et les mesures itinérantes, ont permis de suivre la variabilité spatio-temporelle du champ thermique nocturne, respectivement en surface et à 2 mètres au-dessus du sol.

L'image ASTER a été prise le 15 mai 2016, par temps radiatif (le ciel est totalement clair lors de la prise de vue), à 22h22 (heure locale), soit environ quatre heures après le coucher du soleil, durée suffisante pour faire apparaître un éventuel ICU en surface (Gallo *et al.*, 1993). Les 5 bandes TIR (8,25-11,65 μ m) sont sélectionnées ; leur résolution spatiale est de l'ordre de 90 m (Abram *et al.*, 2008). Après la correction géométrique de l'image (projection UTM, Datum WGS84), les températures de surface ont été déduites en appliquant la formule *Multi-Channel Sea-Surface Temperature (MCSST)* développée par Matsunga (1996) (Charfi et Dahech, 2013). Les résultats obtenus ont été vérifiés en les croisant aux mesures issues des NOAA-AVHRR et au modèle *Global Forecast System (GFS)*. Le 15 mai 2016, la thermographie ASTER-TIR a ainsi mesuré environ 20°C à 22h22 sur la mer ; c'est-à-dire un résultat cohérent en se référant aux données ci-dessus.

Les variations spatiales des températures de surface mesurées par satellite, par temps clair en phase nocturne, ne sont pas très éloignées de celles des températures de l'air (à 2 m au-dessus de la surface) et sont tributaires de l'occupation du sol et de son degré d'humidité (Rao, 1972 ; Voogt et al., 1998 ; Quattrochi and Luvall, 1999 ; Friedl, 2002 ; Chudnovsky *et al.*, 2004). Par type de temps radiatif, la canopée urbaine est susceptible de modifier significativement les caractéristiques thermiques des basses

couches de l'atmosphère avec lesquelles elle est en contact. Cette dernière est influencée par sa base par le type d'occupation et latéralement par les murs des bâtiments (Kastendeuch *et al.*, 2010). C'est pour cette raison que nous avons analysé, à partir d'une image ASTER-TIR, la variabilité spatiale des températures de surfaces à Bizerte et ses environs comme étant un des facteurs déterminants des variations du champ thermique de l'air. Ce dernier a été cerné en recourant aux mesures itinérantes. Cette technique est couramment utilisée pour spatialiser les températures de l'air (Carrega, 1994). Elle a pour apport de pallier l'absence d'information sur le climat urbain de Bizerte puisque la seule station est située en zone rurale. Une campagne de mesure a été effectuée le 5 août 2016 par temps radiatif entre minuit et 01h30. Les mesures ont été réalisées par un thermo-hygromètre portable de type *Testo 400* ayant une réponse rapide de l'ordre de 10 secondes et une précision de l'ordre du dixième de degré Celsius pour la température et du dixième de pourcent pour l'humidité relative. La sonde a été placée en dehors du véhicule à 1,5 m du sol et à 0,5 m de l'habitacle. Les mesures étaient continues, la voiture roulait à une vitesse quasi constante de 30 km/h (trafic fluide), de façon que la sonde soit ventilée.

Durant cet intervalle de temps, le ciel était totalement dégagé, une très faible brise de terre dont la vitesse était inférieure à 1 m/s soufflait à l'aéroport où des températures de l'air de l'ordre de 22°C étaient stables entre 0 et 2 h. Ces conditions sont propices pour l'apparition d'un ICU intense (Cantat, 2004). 43 mesures de la température et de l'humidité relative ont été relevées couvrant la

quasi-totalité de l'agglomération et choisies en fonction de l'hétérogénéité de l'occupation du sol (figure 3).

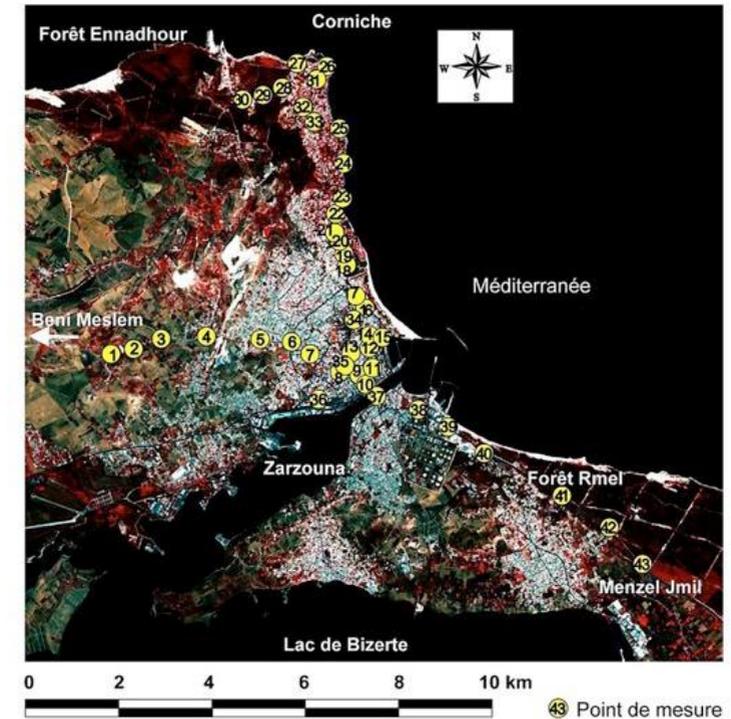


Figure 3. Les points des mesures itinérantes réalisées le 5 août 2016 entre minuit et 1h30 (fond, composition colorée fausses couleurs infrarouge d'une scène Landsat 8 datée du 4 août 2016).

II. Organisation spatiale du champ thermique nocturne par temps radiatif

Nous avons jugé utile, d'abord de transformer les valeurs d'humidité relative en tension de vapeur d'eau à partir du calcul de la température de rosée (td). Ensuite, nous avons neutralisé l'évolution nocturne de la température en calculant de nouvelles séries d'écart par rapport à la référence urbaine. Le site de mesure urbain de référence¹⁸ est situé en plein centre-ville (point 17). Celui rural, distant d'environ 5km à vol d'oiseau, correspond à une zone agricole sur la route de Beni Meslem à l'ouest de l'agglomération (point 2). Enfin, une cartographie ponctuelle, utilisant la variable visuelle taille et valeur, à la fois, a été adoptée pour matérialiser l'écart thermique par rapport au point de référence.

Pour étudier les caractéristiques de la brise nous utilisons les données météorologiques issues de la station météorologique fixe expérimentale installée dans la zone de la Corniche, en plus de celles fournies par l'INM enregistrées à l'aérodrome. Ces dernières, après l'utilisation d'un ensemble de filtres, renseignent sur la fréquence mensuelle de la brise littorale. Les critères de sélection sont ceux avancés par Dahech et al., (2012) inspirés des travaux de Neumann et Mahrer (1997), Simpson (1994), Planchon (1997), Borne et al., (1998) et Dahech et al., (2005). Après avoir écarté les jours pluvieux, dépressionnaires et venteux (ne garder que les jours où les précipitations sont absentes, la pression est supérieure à 1007 hPa et la vitesse du vent maximal instantané est inférieure à 12 m/s), nous avons retenu les jours où le vent souffle des secteurs venant de la mer (les quadrants nord et est) durant la journée et du secteur continental (quadrant ouest et nord-ouest)

pendant la nuit. Nous avons gardé les jours où la brise de mer et celle de terre alternent. Les données météorologiques utilisées dans ce travail couvrent la période 1974-2013. Leur fiabilité a été vérifiée en examinant les données lacunaires et les erreurs aléatoires qui portent sur la cohérence entre les paramètres météorologiques et la cohérence temporelle des données. Les données relatives à l'espace, comme la répartition spatiale du bâti, la masse végétale, le milieu environnant des mesures, sont déduites à partir de l'image satellitaire Landsat 8 datée du 4 août 2016 et de captures d'écran Google Earth prises durant l'été 2016.

II.1. Organisation spatiale du champ thermique nocturne de surface par temps radiatif

L'image ASTER-TIR du 15 mai 2016 montre un champ thermique de surface hétérogène avec l'apparition de plusieurs îlots relativement chauds. Les températures de surface varient de 11 à 21°C (figure 4). Les plus élevées sont enregistrées au niveau de la mer et des principaux noyaux chauds occupent les quartiers populaires au nord-ouest du centre-ville (Bévédère, Elhana...), la Médina, la ville européenne, Jarzouna au sud. Les surfaces les plus fraîches correspondent aux forêts de Rmel et Ennadhour, respectivement au sud et au nord-ouest de l'agglomération et à la zone agricole à l'ouest de l'agglomération. Les îlots de chaleur les plus importants ne

sont pas compacts. En effet, au niveau du centre-ville, apparaît une forte hétérogénéité thermique : certaines surfaces sont fraîches. Elles correspondent aux parcs urbains, aux complexes sportifs (15 octobre et Elbosyri), ainsi que la zone touristique et certains terrains non occupés. Des noyaux chauds plus petits sont décelés au sud-ouest de l'agglomération dans la zone industrielle, à Kharrouba, et près de la côte nord-est le long de la Corniche. En milieu urbain, les différences de la thermographie entre l'habitat pavillonnaire, d'une part, et l'habitat populaire d'autre part sont nettes. En effet, des îlots de chaleurs, relativement moins intenses, couvrent les quartiers résidentiels à habitat pavillonnaire telles que Zkak-Ezzouz et Sammadia. Les quartiers populaires denses enregistrent 2°C de plus que les zones

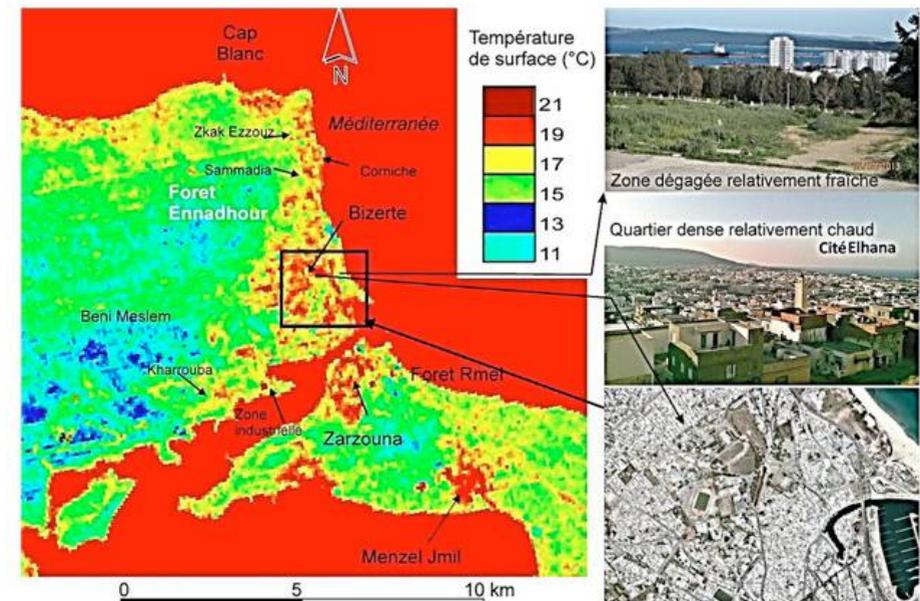


Figure 4. Champ thermique en surface d'après l'image ASTER-TIR prise le 15 mai 2016 à 22h22 (Source des images à droite de la carte, Google Earth).

¹⁸ Selon la formule $T_x - T_0$ avec T_x = mesure à un point x et T_0 = mesure au point de référence urbaine.

à occupation mixte. Cet écart s'explique vraisemblablement par leurs tissus très serrés et très peu végétalisés. A la périphérie de l'agglomération, les zones fraîches sont mieux individualisées et plus homogènes. Elles correspondent à un paysage forestier. L'écart thermique ville-campagne de surface s'explique essentiellement par la hausse des flux de chaleur sensible par rapport aux flux de chaleur latente et par la rareté des surfaces évaporantes dans les quartiers denses. Conséquemment, le substrat urbain restitue une quantité de chaleur sensible plus élevée la nuit (Oke, 1973).

II.2. Organisation spatiale de la température de l'air à Bizerte et dans ses environs

Afin de parvenir à une meilleure connaissance du champ thermique urbain, une campagne de mesure itinérante a été organisée pendant la saison estivale le 5 août 2016 à 00 h par type de temps radiatif. L'examen des mesures itinérantes nocturnes à 2 m au-dessus du sol (43 points de mesure : figure 5) montre des variations des valeurs de température à Bizerte et ses environs la nuit et l'existence d'un îlot de chaleur sur les zones densément urbanisées. La disparité spatiale des températures dans l'espace intra-urbain est modérée ($\approx 1,2^\circ\text{C}$). Un îlot de chaleur relativement fort occupe la zone centrale densément urbanisée : la Médina, la ville européenne, les quartiers nord (Errawebi, Errouki...), Bizerte sud et Jarzouna. L'écart maximal par rapport à la campagne environnante atteint $5,2^\circ\text{C}$.

Une individualisation nette de la masse urbaine est observée par rapport aux

espaces ruraux, mais plus difficilement une opposition de quartiers. A l'échelle de la zone agglomérée, les écarts restent inférieurs à 2°C mais parfois très expressifs. En effet, les espaces végétalisés et régulièrement arrosés constituent des îlots de fraîcheur en baissant la température d'environ $1,8^\circ\text{C}$, comme c'est le cas du point de mesure 19, bordée de part et d'autre par la végétation, où nous avons enregistré $24,5^\circ\text{C}$ contre $25,7^\circ\text{C}$ au niveau du point de mesure 22, situé dans un tissu urbain dense. Vers le nord, la mer paraît aussi comme un facteur de discrimination thermique en agissant par sa forte inertie thermique. C'est pour cette raison que la température augmente à $25,2^\circ\text{C}$ au niveau de la corniche de Bizerte (P23, figure 5).

Vers l'ouest et le sud, la baisse de la température s'effectue d'une manière progressive. À l'extrême ouest (route de Beni Meslem: P1 et P2), la topographie, caractérisée par un réseau hydrographique important, est très favorable à l'installation des inversions thermiques par refroidissement radiatif et l'écoulement d'air froid (brise de vallée) en provenance des monts de Jbel Ennadour. Au sud, la forêt de Rmel (P41, P42, P43) correspond à un vrai îlot de fraîcheur en baissant la température de plus de 4°C par rapport au centre-ville.

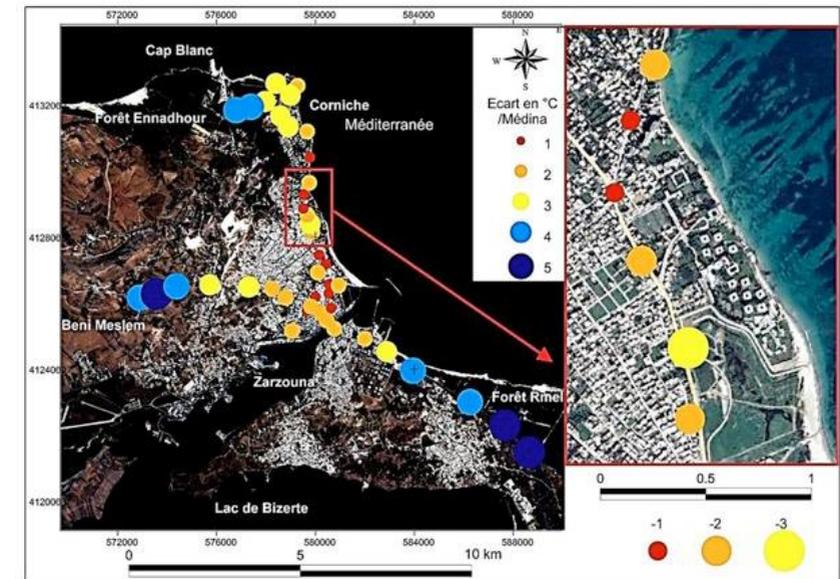


Figure 5 : Variation spatiale des températures de l'air nocturnes dans l'agglomération de Bizerte (mesures itinérantes par temps radiatif le 5 août 2016; fond, composition colorée fausses couleurs infrarouge d'une scène Landsat 8 datée du 4 août 2016 et image Google Earth à droite).

L'analyse du champ hygrométrique permet de confirmer nos déductions concernant les éléments d'explications des disparités spatiales de températures (figure 6). En fait, le secteur ouest, le plus froid, (route de Beni Meslem) est plus sec que le reste de l'agglomération, confirmant outre le refroidissement radiatif, les apports d'air allogène continental par le biais de la brise d'amont qui s'écoule sur le versant de Jbel Ennadour vers la ville de Bizerte.

L'écart maximal d'humidité absolue – exprimé par la température de rosée (td en $^\circ\text{C}$) par rapport à la référence urbaine – atteint $3,9^\circ\text{C}$. Le sud, est également sec avec un écart de td, par rapport au centre-ville plus faible, de l'ordre de $2,9^\circ\text{C}$. Il s'agit d'un isthme

séparant le lac de Bizerte et la mer, occupant le versant ouest de Jbel Hakima (250m). Il est constitué d'une plaine parsemée de dunes occupées par la forêt de Rmel, propice à une forte consommation de chaleur latente et des terrains labourés favorables au refroidissement radiatif et à l'installation des inversions thermiques (P41, P42, P43). Le même écart d'humidité a été enregistré à l'extrême nord au niveau du point de mesure (P2), situé sur le versant est de Jbel Ennadhour, occupé lui aussi par une forêt dense. L'air froid et sec à caractère continental provient vraisemblablement de la brise d'amont. Près de la côte, l'humidité augmente sensiblement sous l'effet de la mer, comme c'est le cas des points (P22, P23, P24). Au niveau de la zone urbaine (point de mesure P7, P8, P12,

P13, P14), la température de rosée reste relativement élevée à cause de la proximité de la mer, d'une part, et du faible brassage de l'air, d'autre part. Il est édifiant de souligner enfin que le passage à travers les parcs urbains à Bizerte n'a pas été accompagné d'un changement sensible au niveau de l'hygrométrie à cause de la faible densité de la biomasse végétale et l'absence d'une pelouse régulièrement arrosée, comme c'est le cas de la *Place du 14 janvier* (P9, P10).

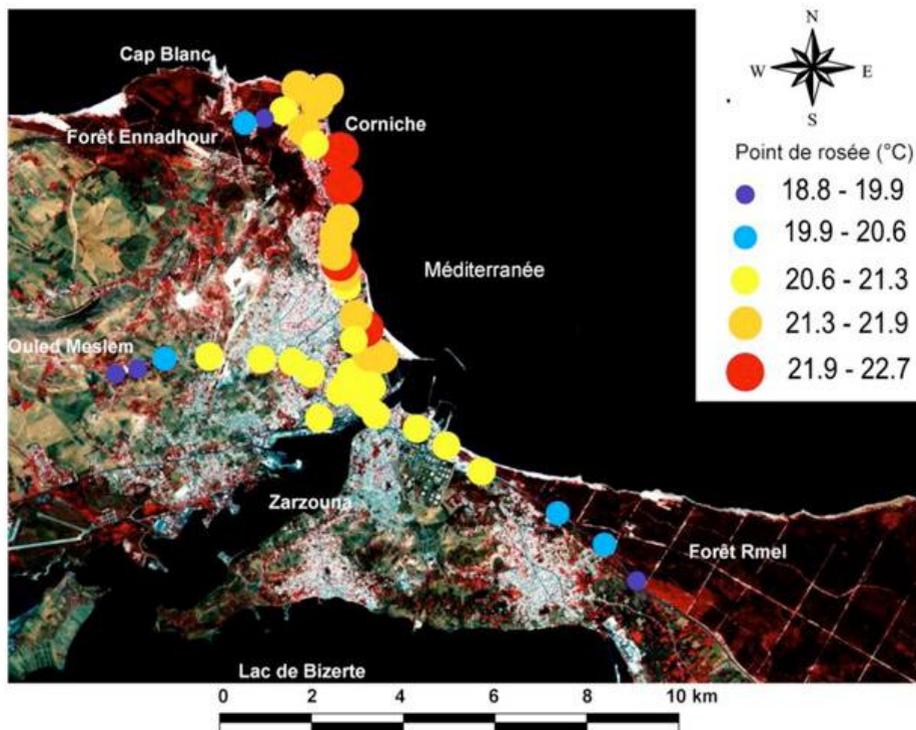


Figure 6 : Variation spatiale de la température de rosée nocturne dans l'agglomération de Bizerte (mesures itinérantes par temps radiatif le 5 août 2016 ; fond, composition colorée fausses couleurs infrarouge d'une scène Landsat 8 datée du 4 août 2016).

III. Caractéristique de la brise de mer à Bizerte

III.1. Fréquence mensuelle, direction et vitesse à l'aéroport

La brise littorale est plus fréquente en été, saison durant laquelle elle est observée durant plus de deux tiers des journées. C'est un phénomène de « beau temps » car un vent synoptique fort aurait pour effet de brasser l'air et d'estomper les contrastes thermiques entre la mer et la terre. En effet, d'après Fonstère (1934), la brise de mer est plus fréquente dans les régions ensoleillées où le vent synoptique est faible comme sur les marges de la Méditerranée. Sa fréquence augmente durant la saison offrant les conditions précitées propices à son déclenchement. A Bizerte, la situation de marais barométrique est plus fréquente en été. En hiver, une brise de mer le jour, alternant avec une brise de terre la nuit, devient moins fréquente : sa fréquence est alors de l'ordre de 20%. Durant cette saison froide, les vents forts, dépassant 8 m/s, sont relativement fréquents. Il s'agit d'une région parmi les plus ventées en Tunisie où le vent synoptique s'impose (Dahech et al., 2012).

La figure 7 représente la fréquence mensuelle moyenne de la brise de mer à Bizerte entre 1974 et 2013, en utilisant les filtres détaillés dans la partie méthode.

Les roses de vent relevées à 15 h et à 3 h (vitesse et direction), élaborées à partir de données enregistrées entre 1974 et 2013 durant les mois de juin, juillet et août, donnent une idée sur la fréquence élevée du phénomène en été (figure 8 à gauche). Le pourcentage des vents soufflant de la mer à 15 h à une vitesse modérée avoisine 70% à Bizerte. Il souffle soit du quadrant septentrional, soit du quadrant oriental. Cette direction est proche de la perpendiculaire à la côte.

La brise nocturne est de faible vitesse ; elle ne dépasse pas 3 m/s. Elle souffle globalement vers la mer comme le montre la rose de vent de 3 h (figure 8 à droite). Sa trajectoire est influencée par la topographie : elle longe les basses plaines et les vallées sises à l'ouest de la station météorologique de la base aérienne

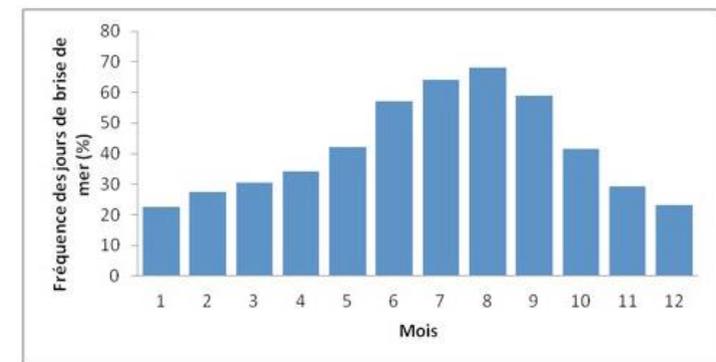


Figure 7 : Fréquence mensuelle (%) des jours de brise de mer (données INM, période 1974-2013).

Sidi Ahmed. Cette station est implantée à 1 km au nord du lac de Bizerte. Comme conséquence, d'une part, la brise de terre peut souffler vers le lac (vent de N à NO) ou vers la mer (O à OSO). D'autre part, puisque la station est située à 9 km du trait de côte, la brise de mer est précédée par une légère brise

venant du lac situé au sud-est ; sa vitesse est souvent inférieure à 4 m/s, comme le montre la rose de vent à 9 h (figure 9). Cette brise de lac n'est observée que par temps calme, soit environ 25% des situations de brise en été

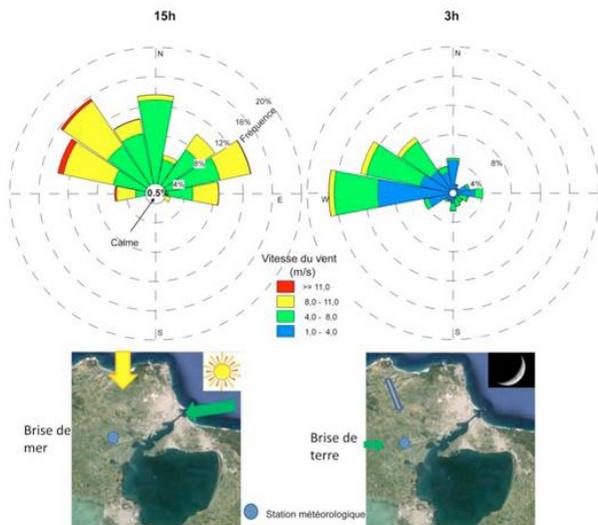
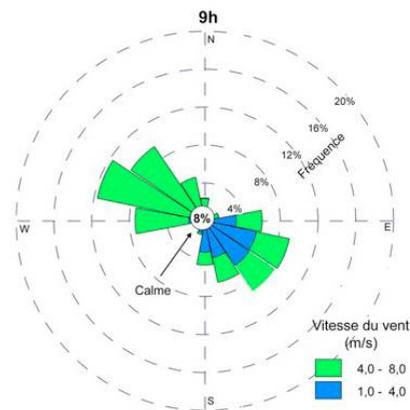


Figure 8. Roses de vent par tranches de vitesse enregistré à 3h et 15h dans la station de Bizerte, durant les mois de juin, juillet et août entre 1974 et 2013 (données INM).

Figure 9 : Roses de vent par tranches de vitesse enregistré à 9h dans la station de Bizerte, durant les mois de juin juillet et août entre 1974 et 2013 (données INM ; les vents forts et très forts ont été éliminés, ils représentent 13%).



III.2. Caractéristique de la brise près de la mer d'après les données de la station fixe

La station météorologique expérimentale fixe Davis Instrument, installée à quelques dizaines de mètres de la mer, donne une idée sur la circulation de la brise de mer dans la délégation de Bizerte Nord, celle la plus dense de l'agglomération. Les anémogrammes issus de cette station montrent que plusieurs jours de brise de mer peuvent se succéder, formant des séquences dont la longueur peut atteindre 12 jours de suite. Ces graphiques montrent également les horaires précis de lever et de coucher de la brise, puisque un pas de temps fin de 5 minutes a été choisi lors de l'installation de la station.

D'après l'exemple de l'épisode ci-dessous, allant du 20 au 22 août 2012, la brise se lève vers 8h30, soit environ trois heures après le lever du soleil, et se couche vers 21h, soit environ deux heures après le coucher du soleil. De ce fait, sa durée au mois d'août avoisine 13 heures par jour. Elle atteint sa vitesse maximale, qui frôle 7 m/s, vers 15 h. A cette heure-ci, elle souffle perpendiculairement au trait de côte, donc du secteur oriental (figure 10).

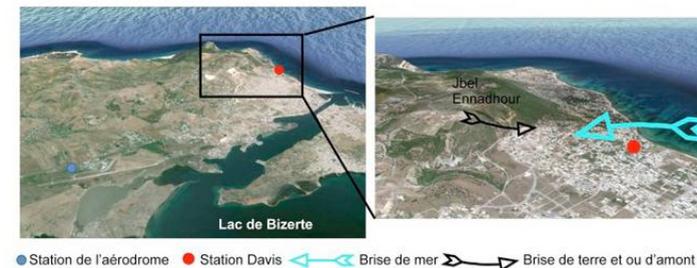
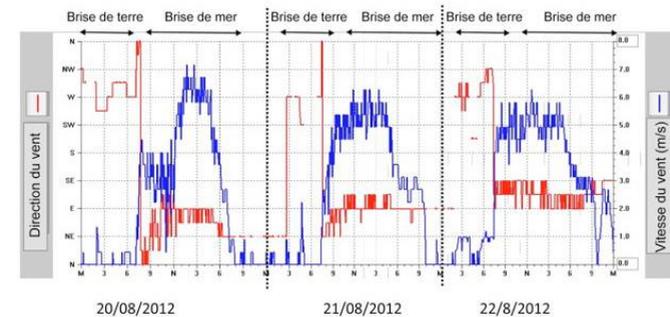


Figure 10. Anémogrammes montrant l'alternance entre brise de mer et brise de terre l'été à Bizerte (données issues de la station Davis installée à quelques mètres de la mer au nord de l'agglomération du 20 au 22 août 2012).

Conclusion

Après le coucher de la brise et une période de calme qui peut durer jusqu'à 3 heures, la brise de terre et/ou d'amont se déclenche. Sa vitesse est faible et vient de l'ouest au nord-ouest. Elle correspondait probablement à un air frais qui s'écoule sur le versant oriental de Jbel Ennadhour culminant à environ 200 m d'altitude.

Cependant, le 22 août 2012, à l'aérodrome Sidi Ahmed, la situation est différente. Comme mentionné plus haut, cette station se situe à 9 km de la mer, d'où la brise de mer ne parvient que vers midi. Cette brise de mer est précédée et succédée par une légère brise soufflant du lac de Bizerte soit du secteur sud-est (figure 11).

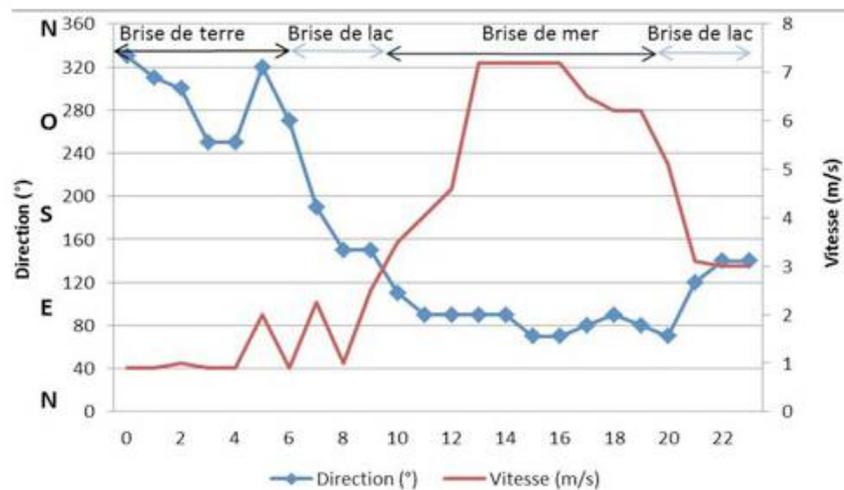


Figure 11. Anémogramme montrant l'alternance entre brise de mer, brise de lac et brise de terre l'été à Bizerte à partir de l'exemple du 22 août 2012 (données issues de la station de l'aérodrome Sidi Ahmed, INM).

A l'échelle de Bizerte, agglomération abritant 350 000 habitants, les températures de surface des quartiers denses sont plus élevées que celles des zones végétalisées environnantes. A l'intérieur de la zone urbanisée, des variations spatiales du champ thermique de surface s'observent quand les modes d'occupation du sol changent. Les mesures itinérantes de la température de l'air, à deux mètres au-dessus de la surface, ont révélé un ICU d'une intensité maximale modérée, d'environ 5,2°C. Cet ICU est moins important que celui mesuré à Tunis ou à Sfax, deux agglomérations de taille plus grande (Charfi, 2012; Dahech, 2013).

Les mesures du vent à l'aérodrome Sidi Ahmed, ainsi que celles réalisées dans la zone de Corniche par la station expérimentale Davis, montrent que la circulation de la brise de mer est influencée par le lac, le relief et la ville. A l'aérodrome, elle se lève du lac vers 9 h (en été), avec une vitesse de 3 m/s. La brise de mer y est relevée entre midi et 13 h (7 m/s vers 15 h), alors qu'elle est plus précoce au bord de la mer (vers 8-9 h) où alternent brise de mer, brise de terre et brise d'amont.

Les mesures réalisées jusque-là demeurent ponctuelles dans le temps et dans l'espace. Des travaux de terrain supplémentaires sont donc requis pour mieux caractériser la répartition spatiale de la brise à Bizerte car les disparités du cadre physique et de l'occupation du sol influencent fortement ce phénomène très attendu par la population en été, à cause de son effet rafraichissant. De même, pour mieux caractériser l'ICU et étudier la variabilité de son intensité, nous souhaitons multiplier les campagnes de mesures itinérantes et surtout installer un réseau de

5 stations expérimentales fixes durant l'été 2017. Les acquis des travaux réalisés à ce jour permettraient de mieux choisir les sites de ces stations. En perspective de l'éventuelle campagne de 2017, la modélisation statistique de l'ICU et de la brise, dans un premier temps, et du confort thermique dans un second temps, semblent réalisables.

Remerciements : les auteurs tiennent à remercier vivement l'université Paris Diderot, et en particulier Malika Madelin, qui a prêté le capteur Testo 400 ; Adnen Besbes qui a participé à la campagne des mesures itinérantes et Mohamed Jebalia qui a hébergé et a pris soin de la station Davis.

Borne K., Chen D, and Nunez M., 1998 : A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast. *Int. J. Climatology*, 18, 901-914.

Cantat O., 2004 : L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, 191, 2, 75-105.

Carrega P., 1994 : *Topoclimatologie et habitat. Revue d'analyse spatiale quantitative et appliquée*, 35 et 36, 408p.

Carrega P., 2013 : Le climat urbain de Nice en milieu géographique contrasté : synthèse par approche inductive. *Climatologie*, vol 10, 9-36.

Charfi S. et Dahech S., 2013 : Dynamique spatio-temporelle de la Température dans l'agglomération de Tunis. GdR 3359 MoDyS - *Rencontre jeunes chercheurs*. 21-22 novembre 2013, Université de Franche-Comté. 239-260.

Charfi S., 2012 : *Le comportement spatio-temporel de la température dans l'agglomération de Tunis*. Thèse, Université de Tunis et Université de Nice (en cotutelle), 311p.

Chudnovsky A., Ben-Dor E. and Saaroni, H., 2004 : Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements. *Energy and Buildings*, 36 (11), 1063-1074.

Dahech S., 2007 : *Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique*. Thèse de doctorat de l'Université Paris VII, 309p. + annexes.

Dahech S., 2012 : Évolution de la répartition spatiale des températures de l'air et de surface dans l'agglomération de Sfax (1975-2010) et impact sur la consommation d'énergie durant la saison chaude. *Climatologie, numéro spécial Climats et changement climatique dans les villes*, 11-33.

Dahech S., 2013 : Le réchauffement contemporain en Tunisie (1960-2012) : rôle de la circulation atmosphérique et de l'urbanisation. Actes des Journées de la *Commission Climat et Société du Comité National Français de Géographie*, 14-16 mars, Epernay, 68-88.

Dahech S., Beltrando S. et Bigot S., 2005 : Utilisation des données NOAA-AVHRR dans l'étude de la brise thermique et de l'îlot de chaleur. Exemple de Sfax (SE tunisien). *Cybergeo : European Journal of Geography* article 317, <http://cybergeo.revues.org/3132> ; DOI : 10.4000/cybergeo.3132.

Dahech S., Berges J C., Beltrando G., 2012 : Localisation et dynamique du front de la brise de mer au Maghreb oriental, *Climatologie*, 9, 57-81.

Djen CS., 1992 : The urban climate of Shanghai. *Atmospheric Environment*, 26, 9-15.

Easterling, D. R., et al., 1997: Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277, 364-367.

Choisnel E. et Cloppet E., 2016 : « AGROMÉTÉOROLOGIE », *Encyclopedia Universalis* [en ligne], consulté le 9 octobre 2016. URL : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/agrometeorologie/>

Escourrou G., 1982 : Quelques particularités des brises maritimes. *NOROIS*, 116, 577-584.

Escourrou G., 1990 : La spécificité du climat de l'agglomération parisienne. *Revue de Géographie de Lyon*, 65, 2, 85-89.

Fontserè E., 1934 : Les "seixes" de la costa Catalana. Barcelona. *Servei met. de Catalunya. Notes d'estudi*, 5, 12 p.

Friedl MA., 2002 : Forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements. *Remote Sensing of Environment* 79 (2-3), 344-354.

Fung WY, Lam KS, Hung WT, Pang SW et Lee YL., 2006 : Impact of Urban Temperature on Energy Consumption of Hong Kong. *Energy*, 31, 2623-2637.

Gallo KP., McNab AL., Karl TR., Brown JF., Hood JJ. and Tarpley JD., 1993 : The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect. *Journal of Applied meteorology*, 32 (5), 899-908.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007 : *the physical science basis. Working Group 1 contribution to the fourth assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, summary for policymakers, technical summary and frequently asked questions*. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013 : Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, 1552p.

Johnson D P and Wilson J S., 2009 : The socio-spatial dynamics of extreme urban heat events: the case of heat-related deaths in Philadelphia. *Applied geography*, 29, 419-434.

Kastendeuch P., Najjar G., Lacarrere P. et Colin J., 2010 : Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg, *Climatologie*, 7, 21-36.

Lazzarini M., Marpu PR., Ghedira H., 2013 : Temperature-land cover interactions: the inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. *Remote Sens. Environ.* 130, 136-152.

Liébard A et De Herde A., 2005 : Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques :
Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable. Le Moniteur, 776p.

Matsunaga T., 1996 : Water temperature estimation based on linear regression analysis for ASTER/TIR. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 16, 2-13.

Neumann J. et Mahrer Y., 1997 : A theoretical study of the land and sea breeze circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28, 532-542.

Oke TR., 1973: City size and heat urban island. *Atmospheric environment*, 7, 769-779.

Planchon O., 1997 : *Les climats maritimes dans le monde.* Presses Universitaires du Septentrion, 233p.

Quattrochi DA. et Luvall J.C., 1999 : Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes: Methods and applications. *Landscape Ecology*, 14 (6), 577-598.

Rao PK., 1972 : Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society* 53, 647-648.

Rasul A., Balzter H. et Smith C., 2015 : Spatial variation of the daytime Surface Urban Cool Island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8. *Urban Climate*, 14 (2015) 176–186.

Simpson JE., 1994 : *Sea breeze, and local winds.* Cambridge Univ. Press: Cambridge, 234p.

Tzoulas K, Korpela K, Venn S, Yli-Pelkonen V, Kazmierczak A, Niemela J and James P., 2007 : Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 81, 167-178.

Voogt, JA. et Oke., TR., 1998 : Effects of urban surface geometry on remotely sensed surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (5), 895-920.

Site Web

INS., 2015 : Recensement de la population 2014 : www.ins.tn