

Adaptation aux fortes chaleurs dans l'agglomération de Sfax : mesures météorologiques et comportements de la population pendant l'été (2023-2024)

Marwen Ghribi ^{1*}, Sami Charfi ¹, Salem Dahech ², Emilie Lavie ² et Malika Madelin ²

¹ Université de Sfax – Laboratoire SYFACTE, Sfax, Tunisie

² Université Paris Cité, UMR 8586 PRODIG, Paris, France

* Auteur de correspondance : ghribi310590.marwen@gmail.com

Résumé – Le climat semi-aride de la ville de Sfax (centre-est de la Tunisie) contraint la population à adapter ses comportements lors de la saison chaude et ses modes d'habiter pour atténuer l'inconfort dû aux fortes chaleurs. L'approche méthodologique plurielle (mesures météorologiques *in situ*, enquête par questionnaire et entretiens) a permis de révéler que l'ambiance thermique varie surtout en fonction de l'exposition du logement au vent rafraîchissant et à l'ensoleillement. Le calcul d'indices de confort thermique pendant l'après-midi indique un gain d'environ 6°C dans les logements exposés à l'est (à la brise rafraîchissante et à l'ombre), tandis qu'au niveau des habitations orientées au sud et au sud-ouest, la dégradation du confort thermique est expliquée par l'exposition et la faible ventilation. Pendant la saison chaude, la climatisation électrique est systématiquement utilisée, notamment dans la partie centrale de la ville, peu végétalisée, caractérisée par des logements collectifs construits en brique rouge. Hormis la climatisation, les déplacements de la population de Sfax vers les sites balnéaires au nord et au sud du pays peuvent être une autre adaptation pour échapper de la chaleur urbaine. En effet, environ 58 % des enquêtés passent leurs vacances d'été dans des sites balnéaires au nord et au sud du pays.

Mots-clés : Climat méditerranéen, Sfax, confort thermique, mode d'habiter, adaptation.

Abstract – Adaptation to high heat in the Sfax urban area: meteorological measures and population behaviour during summer (2023-2024). The semi-arid climate of the city of Sfax (east-central Tunisia) compels the population to adapt their behavior during the hot season and their ways of living in order to mitigate the discomfort caused by intense heat. The multi-methodological approach (in situ meteorological measurements, questionnaire survey and interviews) revealed that thermal atmosphere varies mainly according to the exposure of the dwelling to the cooling wind and the sunshine. The calculation of thermal comfort indices during the afternoon indicates that in dwellings exposed to the east (to the refreshing breeze and in the shade), there is a gain of approximately 6°C, while in dwellings facing south and southwest, the degradation of thermal comfort is explained by exposure and poor ventilation. During hot season, electric air conditioning is used systematically, particularly in the central part of the city, which has little vegetation and is characterized by collective housing built in red brick. Besides air conditioning, travel by the population of Sfax to seaside resorts in the north and south of the country may be another way for them to escape urban heat. Indeed, approximately 58% of those surveyed spend their summer holidays at seaside resorts in the north and south of the country.

Keywords: Mediterranean climate, Sfax, thermal comfort, way of living, adaptation.

Introduction

En 2025, plus de la moitié de la population vit en ville. En 2050, ce sera plus des trois quarts (source : World Development Indicators). Le phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU), qui correspond à des températures plus élevées en ville qu'à la campagne,

va devenir plus important (Buechley *et al.*, 1972 ; Oke *et al.*, 2017) et affectera le confort thermique (Su et Antoni, 2023 ; Liu *et al.*, 2025). Le réchauffement climatique et l'ICU feront qu'il y aura plus souvent des vagues de chaleur (IPCC, 2021). Cela nécessitera plus d'énergie pour la climatisation (Li *et al.*, 2019). Dans ce contexte, la question de

l'adaptation à la chaleur estivale se pose notamment dans les pays à été chaud, plus spécifiquement dans les grandes agglomérations. Sur le rafraîchissement du milieu urbain durant la saison chaude, plusieurs études ont montré l'importance de la présence des arbres réduisant localement la température de 2 à 5°C (Charfi *et al.*, 2014 ; Aboelata et Sodoudi, 2019 ; Wang *et al.*, 2022 ; Yuan *et al.*, 2024 ; Yu et Pan, 2026), des couleurs claires pour les bâtiments (fort albédo) ou le choix des matériaux de construction limitant l'absorption (Rosenfeld *et al.*, 1995 ; Ferrari *et al.*, 2020 ; Anand et Sailor, 2022 ; Seifeddine *et al.*, 2023 ; Liu *et al.*, 2024 ; Zhao *et al.*, 2025). Un bâti dense limitera le rayonnement solaire et le réchauffement le jour, mais favorisera des températures de l'air plus élevées la nuit, du fait du piégeage du rayonnement terrestre par la canopée urbaine (Wong *et al.*, 2010 ; Lai *et al.*, 2019 ; Le Mentec, 2022 ; Hassani, 2023 ; Amieur, 2024 ; Li et He, 2025 ; Cavadini *et al.*, 2026). Durant les vagues de chaleur, le comportement de la population demeure déterminant pour s'adapter à la forte chaleur (Chebli, 2022).

Les changements climatiques et l'urbanisation rapide dans le bassin méditerranéen se manifestent par une extension de la saison chaude et une tendance à la hausse des températures (Castellanos *et al.*, 2021), avec l'augmentation du nombre de nuits tropicales (García, 2015) et des pics de chaleur diurne (jusqu'à 56°C d'ici 2100 ; Ntoumos *et al.*, 2022). Cette région autour du bassin méditerranéen est soumise à de grands enjeux socio-économiques qui ont des répercussions sur la population locale (Garau *et al.*, 2026). L'adaptation des villes aux températures élevées en Méditerranée est un sujet majeur et figure parmi les priorités des plans climat, adoptés par plusieurs villes, en particulier sur la rive nord de la mer Méditerranée (Pietrapertosa *et al.*, 2023). Les politiques de développement durable des pays méditerranéens visent l'atténuation des risques et envisagent des options d'adaptation. Toutefois, des inégalités apparaissent entre les pays de la rive nord et ceux de la rive sud, où nous remarquons un manque d'informations pour les sociétés vulnérables et une gouvernance moins efficace pour gérer les épisodes de forte chaleur (Cramer *et al.*, 2018).

À l'échelle de l'agglomération de Sfax, au centre-est de la Tunisie, Ghribi et Dahech (2023a)

ont caractérisé l'ICU et le confort thermique, sans toutefois aborder les comportements de la population face aux fortes chaleurs, que cette étude vise à analyser grâce à (1) une enquête sur la perception et les comportements de la population lors de la saison chaude, (2) des mesures météorologiques (intérieur/extérieur) pour évaluer le confort thermique, et (3) des entretiens auprès d'acteurs de l'aménagement, en architecture et dans la promotion immobilière, sur les mesures d'adaptation.

L'étude revient d'abord sur l'évolution de la morphologie urbaine de l'agglomération de Sfax et détaille ensuite la démarche méthodologique fondée sur une collecte de matériel de terrain variée. Enfin, nous détaillons trois résultats majeurs : la mutation des modes d'habiter, la variation des températures en fonction de la distance au littoral et au centre-ville et les stratégies d'adaptation de la population.

1. Une agglomération qui se désadapte de la chaleur

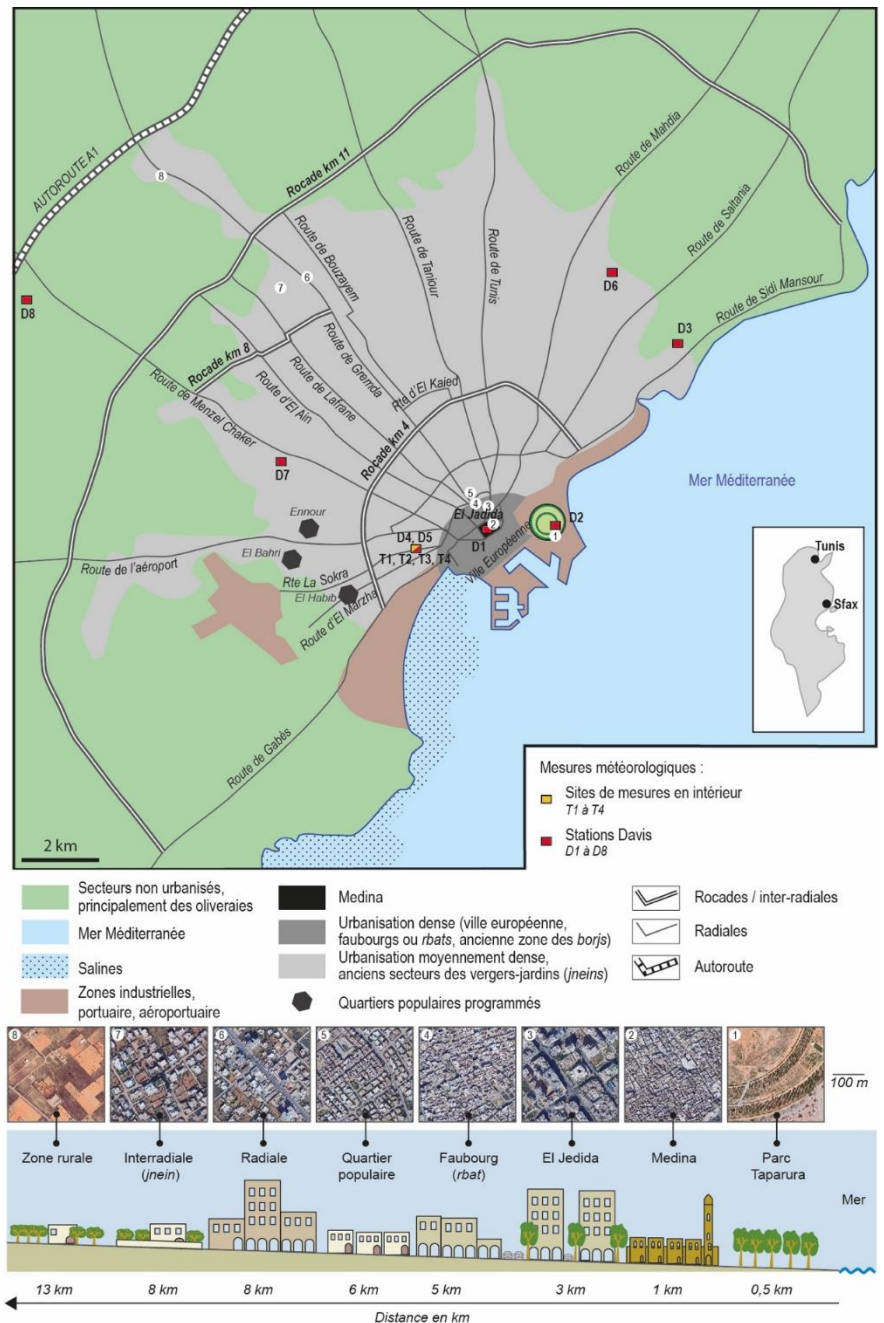
L'agglomération de Sfax offre un cadre topoclimatique propice à l'étude des interactions entre les conditions atmosphériques et le développement urbain (Dahech, 2007). Située au bord de la mer, elle se distingue par une topographie principalement plane et homogène, des situations météorologiques stables avec un ciel dégagé (Dahech, 2014 ; Ghribi et Dahech, 2020). Par ailleurs, puisque l'agglomération s'étend sur une plaine côtière, sa topographie peu accidentée favorise l'étalement et la densification de la ville (densité généralement décroissante du centre vers la périphérie).

L'agglomération d'environ 650 000 personnes (en 2024), occupant une superficie de 230 km², a connu des transformations constantes de son tissu urbain depuis le début du XX^e siècle (Bennasr, 2003 ; figure 1) : la partie centrale correspondant au noyau de la Médina, fondée au IX^e siècle (photo 1), s'est étendue à l'est avec la ville européenne, et à l'ouest par des faubourgs (*Rbats*). À deux kilomètres du centre, l'habitat est alors lâche, limité à une occupation estivale des vergers-jardins (*jneins*), zones d'arbres fruitiers. Au début des années 1970, ces zones ont connu une densification progressive, avec la formation de noyaux d'habitats plus compacts, de 4 à 6 km du centre-ville (Bennasr, 2003), le long

des radiales convergeant vers le centre de l'agglomération et reliées par deux rocadés à 4 et 11 km (figure 1). L'accélération du rythme de densification des *jneins* s'inscrit dans un contexte de transformations urbaines et sociales notables à partir des années 1970, marquant une transition en lieux de résidence permanents (Karray, 1982 ; Megdiche, 1985). Cette évolution s'accompagne de la construction de villas au sein des vergers dont la superficie est en constante diminution, conséquence directe des opérations de morcellement. Parallèlement,

des quartiers populaires programmés émergent : El Habib, El Bahri, Ennour (figure 1). Au début des années 2000, Sfax El Jadida (nouveau Sfax) devient le nouveau centre à l'ouest de la Médina, sur d'anciens cimetières. Des quartiers populaires denses voient le jour à une dizaine de kilomètres du centre-ville dans toutes les directions. En outre, un processus de verticalisation du tissu urbain s'accélère le long des radiales, jusqu'à 10 km du centre-ville.

Figure 1. Localisation de l'agglomération de Sfax et des sites de mesures, avec une cartographie synthétique de l'occupation du sol.
Location of the conurbation of Sfax and measurement sites, with synthetic land cover map.



Réalisation : Ghrabi, Dahech, Lavie, Madelin, Charfi, 2025
 Sources : divers documents dont OpenStreetMap pour les routes, Vuaillet et al. (2024) pour le bâti, Google Earth pour les captures satellitaires.



Photo 1. Ruelles de la Médina à Sfax (clichés pris par Ghribi en mai 2025). *Alleyways of the Sfax Medina (photos taken by Ghribi in May 2025).*

La densification de Sfax a été accompagnée d'une expansion des surfaces minéralisées et d'une accentuation de l'ICU, démontrée par des travaux antérieurs s'appuyant sur des mesures itinérantes et un réseau expérimental de stations météorologiques fixes (Dahech, 2007 ; Dahech et Ghribi, 2018). L'ICU calculé entre la Médina et la campagne environnante à 12 km du centre est d'environ 4,5°C en été et jusqu'à 7°C par temps très chaud (Ghribi et Dahech, 2020). Une baisse ponctuelle de 1 à 2°C a été observée dans des parcs urbains comme Touta, au sud-ouest de la Médina, et Taparura (figure 1). Dahech (2009) ainsi que Dahech et Ghribi (2018) ont complété l'analyse avec des mesures à l'intérieur des bâtiments : la température, notamment entre 10 h et 18 h, varie considérablement en fonction de l'exposition au soleil, des matériaux de construction et de leur couleur. Dans les bâtiments à parois vitrées, la température atteint ainsi en moyenne 45°C en été, au pic de l'exposition au soleil. Les auteurs précités soulignent aussi l'effet du rayonnement nocturne des parois mal isolées, qui rend le dernier étage plus chaud et conséquemment plus énergivore en été.

Si les dynamiques météorologiques à Sfax sont relativement bien documentées, le comportement des populations lors des vagues de chaleur reste encore peu exploré. Cette recherche vise à compléter les travaux existants par l'utilisation de nouveaux indices de confort thermique à l'intérieur des logements, et par l'analyse des stratégies

d'adaptation des populations. Pour y répondre, notre méthodologie combine des mesures météorologiques *in situ*, des entretiens auprès d'architectes et la passation d'un questionnaire auprès de ménages.

2. Une démarche méthodologique plurielle

2.1. Mesures météorologiques

Un réseau composé de 8 stations météo *Davis*, réparties en extérieur dans l'agglomération (figure 1), a été complété par 12 points de mesure à l'intérieur des bâtiments, via 8 consoles *Davis* et 4 capteurs *Testo H174* (figure 1 et tableau 1), installés selon un protocole permettant de comparer les différents types de logements en fonction de plusieurs critères : exposition au soleil, éloignement au centre-ville, orientation des ouvertures par rapport au vent frais, isolation, hauteur, ou encore le revêtement et sa couleur (tableau 1). Les mesures en intérieur ont été réalisées durant les étés 2023 et 2024 dans différents quartiers (figure 1) : Médina, les nouveaux centres, les quartiers populaires, programmés ou non, des habitations anciennes comme les *Borjs*, bâtiments vernaculaires et emblématiques de la ville de Sfax (photo 2).

Pour évaluer le confort thermique, nous avons calculé l'UTCI (*Universal Thermal Climate Index*), créé par la Société Internationale de Biométéorologie en 2009 (Jendritzky *et al.*, 2012 ; Baaghideh *et al.*,

2016), en estimant la température radiante (T_{mrt}), à partir des mesures de la température du globe noir, de la température de l'air, de l'humidité relative et de la vitesse du vent. Ces mesures ont été faites au centre des pièces de vie non climatisées, à 1,5 m du sol. L'UTCI est ensuite déterminé avec le logiciel

RayMan, performant et simple d'utilisation (Matzarakis *et al.*, 2021). Nous avons ensuite calculé un deuxième indice de confort *Temperature of Equivalent Perception* (TEP), exprimé en °C, plus facilement interprétable, selon une échelle de sensation thermique (annexe 1 ; Ballinas *et al.*, 2022 ; Zhang *et al.*, 2023).

Tableau 1. Critères de choix des dispositifs expérimentaux. *Criteria for choosing experimental setups.*

Instrument	Matériel	Capteur	Critères de choix	Localisation
Testo	Testo H 174	T1	(A) appartement, 3 ^{ème} étage isolé (brique double cloison) SE, plus ou moins dégagé	Intérieur
		T2	(B) appartement, 3 ^{ème} étage isolé (brique double cloison) SE, dégagé	Intérieur
		T3	(C) appartement, 3 ^{ème} étage, brique simple OSO dégagé	Intérieur
		T4	(D) appartement, 3 ^{ème} étage, brique double cloison SO dégagé	Intérieur
Davis	Vantage Vue	D1	Médina, centre, dense à 1 km de la mer	Intérieur / extérieur
		D2	Parc, à 0,5 km de la mer et 0,5 du centre	Intérieur / extérieur
		D3	Quartier résidentiel à 6 km du centre et 1 km de la mer	Intérieur / extérieur
		D4	Quartier résidentiel moyennement dense à 1,5 km du centre et 2 km de la mer (console à l'étage)	Intérieur / extérieur
		D5	Quartier résidentiel moyennement dense à 1,5 km du centre et 2 km de la mer (console au RDC)	Intérieur / extérieur
		D6	Quartier résidentiel à 6 km du centre et 3 km de la mer	Intérieur / extérieur
		D7	Zone interradiale à 6 km du centre et 6 km de la mer	Intérieur / extérieur
		D8	Zone rurale à 13 km du centre et 13 km de la mer	Intérieur/extérieur



Photo 2. Des Borjs dans la zone résidentielle de l'agglomération de Sfax ; A) Borj abandonné et B) bâtiment transformé en espace culturel (sources : Ghribi, mai 2025). *Borjs in the residential area of the agglomeration. (A) Abandoned Borj and (B) building transformed into a cultural space (photos taken by Ghribi in May 2025).*

2.2. Questionnaire auprès de la population

Pour étudier les comportements des habitants face à la chaleur, nous avons mené une enquête sous forme de questionnaire auprès de 301 ménages (dont 1 réponse incomplète, soit 300 résultats pris

en compte par la suite) répartis dans l'agglomération de Sfax (tableau 2), en tenant compte des différences liées au mode d'habitation : appartement, villa, logement mitoyen et studio. L'enquête a été réalisée entre octobre et novembre 2023 par l'auteur principal et ses collaborateurs.

Tableau 2. Répartition des enquêtés dans l'agglomération de Sfax, en fonction des radiales (figure 1) et de la distance au centre (enquête de terrain réalisée entre octobre et novembre 2023, avec un échantillon de 300 ménages). Les radiales sont indiquées du NE au SO. *Distribution of respondents in the Sfax metropolitan area, according to radial lines (figure 1) and distance from the center. Data source: Field survey conducted between October and November 2023, sample of 300 households. Radial lines are indicated from NE to SW.*

	Médina	< 4 km hors Médina *	De 4 à 8 km du centre	De 8 à 12 km du centre
La Médina	7	-	-	-
Route de Sidi Mansour	-	14	9	3
Route de Saltania	-	4	7	1
Route de Mahdia	-	5	27	0
Route de Tunis	-	4	2	5
Route de Taniour	-	3	4	2
Route d'El Kaied Med	-	2	2	0
Route de Bouzayène	-	1	0	0
Route de Gremda	-	1	5	11
Route de Lafrane	-	2	5	8
Route de El Ain	-	4	9	1
Route de Menzel Chaker	-	11	2	1
Route de Aéroport	-	20	15	18
Route de La Sokra	-	18	9	0
Route d'El Mharza	-	14	1	0
Route de Gabès	-	11	8	1
Pas de réponse claire	-	22	1	0
Total par zone	7	136	106	51

* ville européenne et faubourgs (Rbats)

Le questionnaire porte sur les gestes et comportements au quotidien comme l'ouverture des fenêtres, des stores et volets, l'arrosage des terrasses, l'ombrage par des toiles en tissu, le fait de dormir à l'extérieur, les habitudes vestimentaires et l'évolution temporelle de ces comportements à

l'échelle de la journée et durant la saison chaude (tableau 3). Cette enquête permet également d'aborder la sensibilité de la population urbaine au réchauffement, ainsi que leur résilience en matière d'équipement, afin de limiter la surchauffe et de réduire l'exposition à cet aléa.

Tableau 3. Principales parties et questions du questionnaire utilisé. *Main sections and questions of the questionnaire used.*

Données	Parties	Principales questions
Enquête sur le confort thermique	1) le logement	Type d'habitat et exposition du logement
	2) les moyens de rafraîchissement	Ventilation naturelle et climatisation électrique
	3) le comportement lors des fortes chaleurs	Pratiques courantes
	4) les économies d'énergie et d'eau	Énergie solaire et accès à l'eau

2.3. Entretiens auprès des acteurs de l'urbanisme

Une série d'entretiens semi-directifs (de 1 à 2 h) a été menée en septembre 2023 auprès de cinq architectes, un entrepreneur du bâtiment et d'universitaires en architecture, pour comprendre les choix et contraintes architecturales liés à la densification de la ville, et saisir les attentes des habitants qui font construire de nouvelles habitations.

Cette démarche méthodologique a permis d'étudier le confort thermique suivant les modes d'habiter, l'implantation géographique dans l'agglomération et les comportements de la population.

3. Modes d'habiter et architecture : une mutation récente et brutale

3.1. Une agglomération composée de trois couronnes

L'agglomération est scindée en trois couronnes

suivant la densité et le type de logement :

- 1) **La couronne centrale** (moins de 4 km de la Médina) se divise en deux sous-secteurs : le premier, à moins de 1 km, correspond à la zone la plus dense et minéralisée, à savoir la Médina, la ville européenne, Sfax El Jadida et les faubourgs, où 87 % des personnes enquêtées habitent des appartements (figure 2) ; au-delà et jusqu'à 4 km, un second sous-secteur, avec un habitat plus hétérogène et une part croissante (32 %) des habitations individuelles (villas).
- 2) **La couronne médiane** (4 à 8 km) est moins dense et majoritairement pavillonnaire : les 2/3 des personnes enquêtées habitent des villas, de plus grande superficie, et souvent entourées par des jardins. Quelques logements collectifs se concentrent le long des axes principaux.
- 3) **La couronne périurbaine** (8 à 12 km) est dominée par l'habitat individuel : plus de 84 % des personnes enquêtées occupent des villas (figure 2).

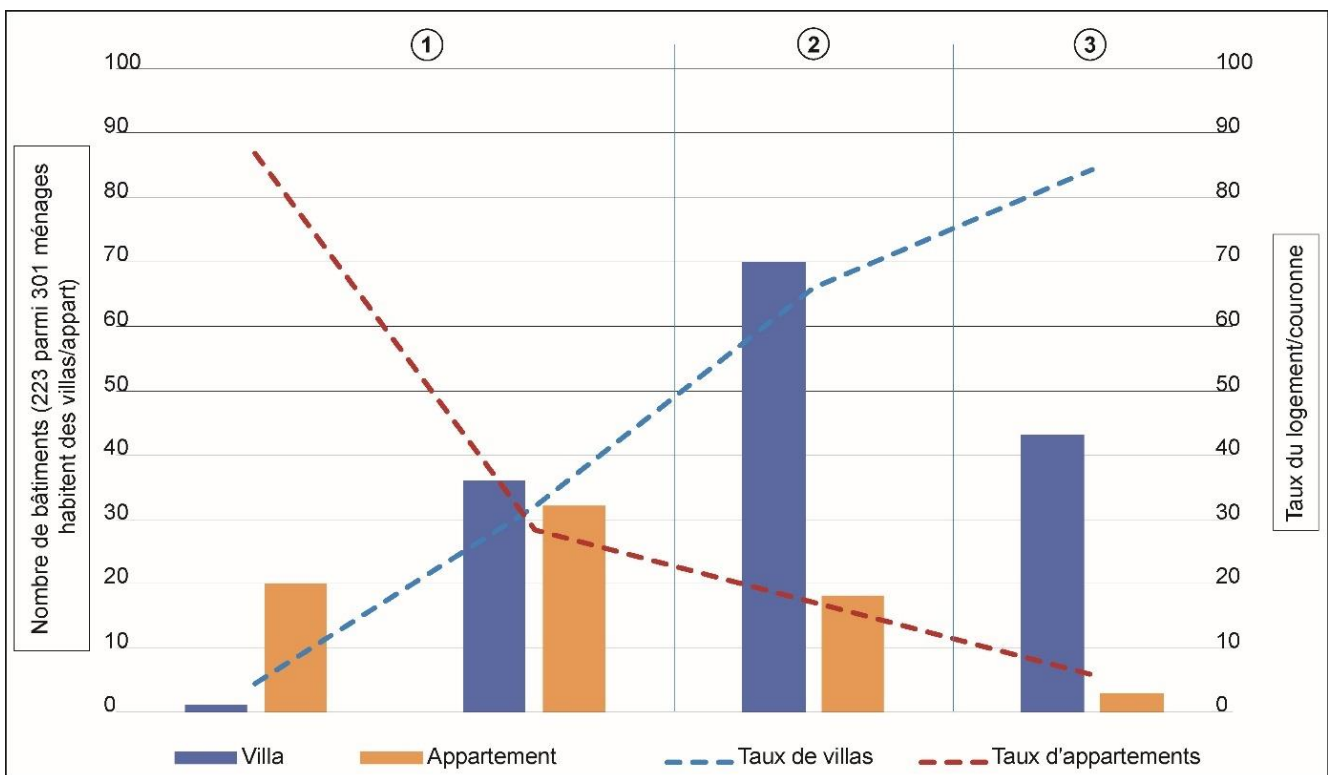


Figure 2. Répartition des appartements et des villas dans la ville de Sfax et taux de ces deux types de logements dans chacune des trois couronnes composant l'agglomération. Source des données : enquête de terrain réalisée entre octobre et novembre 2023, échantillon de 300 ménages (uniquement les parts des appartements et des villas sont calculées). *Distribution of apartments and villas in the city of Sfax and the proportion of these two types of housing in each area. Data source: Field survey conducted between October and November 2023, sample of 300 households (only the proportions of apartments and villas are calculated).*

3.2. Changement des pratiques de construction et perte de savoir-faire architectural

D'après les entretiens menés auprès des professionnels, la densification des quartiers centraux depuis les années 1970 a entraîné l'abandon progressif du type de logement ancestral, pourtant adapté à la chaleur : « *Par rapport à l'énergie, le réchauffement, à Sfax, culturellement, on fait beaucoup attention, depuis longtemps à la chaleur, avant que ce soit un sujet d'actualité* » (entretien R. F., 2023). C'est le cas des villas de type *Borj* (photo 2) : « *C'est une conception architecturale autour d'un patio qui ventile, avec des hauteurs sous plafond importantes pour faire monter l'air chaud, et avec de petites ouvertures en hauteur pour le courant d'air* » (entretien R. F., 2023). Il s'agit d'une architecture « *vernaculaire* » (terme utilisé dans les entretiens par 5 enquêtés), fondée notamment sur des matériaux locaux pour une meilleure isolation.

Les entretiens mettent en avant deux éléments majeurs dans la recherche d'un meilleur confort thermique : *i*) l'exposition et la ventilation naturelle d'une part, et *ii*) les matériaux d'isolation d'autre part.

La « *tradition sfaxienne* » correspond, selon les entretiens, à des murs en moellons de pierre calcaire locale avec un mortier de chaux hydraulique réalisé à partir de pierres chauffées et de sable trempés dans de l'eau à laquelle on ajoute du bicarbonate de calcium. Ce type de mur est efficace en journée, limitant la chaleur à l'intérieur des bâtiments. La pierre met longtemps à chauffer, mais aussi à refroidir. Ce n'est « *pas agréable de rester [dedans] le soir* » (entretien H. A., 2023). L'architecture privilégiée était ainsi celle des patios, au centre des villas : les personnes restaient dehors en soirée pour laisser aux murs le temps de refroidir. Les pièces étaient hautes (4,20 m), permettant à la chaleur de rester en hauteur et de s'échapper par de petites aérations en hauteur (meurtrières). Les édifices étaient dits « *introvertis* » (entretien H. A., 2023), avec des ouvertures vers l'intérieur (le patio), tandis que les meurtrières donnaient sur l'extérieur.

« *La partie la plus impactée par la chaleur, c'est le toit* » (entretien H. A., 2023) ; en effet, les toits-terrasses étaient construits à partir de solives en

bois, des lattes, des algues et du « *mortier bâtard* ». « *Je pense qu'on est très en retard, on ne fait rien, par rapport à l'isolation du plancher* » (entretien R. F., 2023). Ce que cet architecte appelle plancher est un toit-terrasse à pente très légère. Le toit est clairement un élément clé de toute isolation, mais plus encore à Sfax où il a plusieurs fonctions : collecte des eaux pluviales, accueil de chauffe-eau solaire et réceptacle de la sortie du système de climatisation centrale, de l'air chaud (entretiens L. B. et J. K., 2023). Il reste une vraie lacune dans une isolation générale de qualité dans les maisons et bâtiments, pour des raisons techniques : « *Sur le marché, [il n'y a] pas beaucoup d'offres, je vous l'assure (...). Sincèrement, j'essaie de me renseigner auprès des entrepreneurs, combien ça coûte, etc. Mais vraiment pas beaucoup de solutions* » (entretien R. F., 2023).

Le dernier élément architectural vernaculaire est la couleur blanche des murs et des toits, très ancrée dans les habitudes (figure 2), pour augmenter l'albédo, moins absorber la chaleur et limiter l'inconfort thermique domestique. L'enduit est fait de chaux naturelle, non toxique, qui permet la collecte d'eau pluviale (Bennasr et Verdeil, 2009).

La perte de savoir-faire par les artisans (« *les bons maçons n'existent plus* », entretien J. K., 2023) et le besoin de construire en hauteur pour densifier ont progressivement transformé les habitudes architecturales. Cela s'accompagne de l'importation d'un style occidental, perçu comme moderne, mais inadapté au climat local (entretiens H. B. B. et M. M., 2023). Les murs en moellons sont surtout remplacés par la brique, mais aussi le béton armé (entretien A. H., 2023) ou le ciment. Les vérandas remplacent les patios (« *Quand même, quelques inconvénients : tout s'articule autour du patio, non couvert, avec les intempéries* », entretien R. F., 2023), et les maisons deviennent « *extraverties* », ouvertes sur l'extérieur (entretien H. A., 2023). « *J'incite toujours les clients à mettre de l'isolant* » (entretien L. B., 2023) ; pourtant, l'isolation thermique avec double-murs en briques et espacement de 5 cm est réellement prise en compte par seulement 10 % des clients de H. A., parce que c'est cher. Il en va de même pour les fenêtres à double vitrage considérées à tort comme un élément d'isolation acoustique avant tout, et finalement parce que la climatisation

est le palliatif tout trouvé et plus économique : « *on cherche la ventilation naturelle, mais malheureusement on utilise la climatisation* » (entretien J. K., 2023). Ainsi, l'isolation thermique des murs n'est prise en compte que par les propriétaires des villas de « *haut standing* » (entretiens L. B., R. F. et M. M., 2023), très rarement un recours au savoir-faire vernaculaire de murs en moellons, plus souvent un double mur en briques avec vide d'air (pas toujours bien faits, entretien M. A. C., 2023).

Un élément architectural reste primordial : le positionnement des pièces en fonction de la ventilation naturelle. « *La chose dont je suis sûr, on fait attention à l'orientation de la maison, c'est culturel, ça, ça reste (...). On ne trouve pas ça ailleurs, c'est la première décision. Les gens demandent ici d'abord les orientations (...). C'est important pour que la maison soit agréable à vivre. On a un climat chaud, avec un fort rayonnement (...). Ce n'est pas par amour de la chose, mais si on [ne] réussit pas l'orientation, c'est invivable* » (entretien R. F., 2023). Une isolation supérieure peut alors être exigée si l'exposition *guebli* (i.e. E-SE) à la brise de mer n'est pas possible (entretien M. A. C., 2023). En effet, le type de plan qui a dominé jusque dans les années 1990 prend systématiquement en compte la brise de mer de l'après-midi. Les villas sont construites avec les pièces de vie donnant au SE (*guebli*) et les pièces humides au NE (*chergui*, l'exposition la plus humide l'hiver), au NO (*dahraoui*) ou au SO (*gharbi*, l'exposition la plus chaude en été), avec des meurtrières en hauteur pour ventiler, mais sans fenêtre. Cette configuration, historiquement associée au patio, permet « *une ventilation naturelle pour créer un microclimat dans la maison* » (entretiens H. B. B. et M. M., 2023). La disparition des patios a réorienté les structures internes des villas, qui se dotent d'un étage sur des terrains plus petits car le foncier reste onéreux. Mais l'orientation des pièces de vie au SE reste « *la meilleure orientation à Sfax* » (entretien H. A., 2023). Or, si l'exposition peut être choisie pour une maison individuelle, les bâtiments collectifs présentent des disparités d'exposition : « *j'ai un regard global, pour les immeubles c'est très remarquable* » nous dit R. F. (entretien, 2023) : le SE se vend en premier, l'E et le NE en second, l'O en troisième, le N en

dernier « *c'est toujours pareil* ».

L'habitat collectif en immeubles a connu une évolution notable durant les deux dernières décennies, le long des radiales généralement. Or, bien qu'il limite l'étalement urbain, il n'offre pas à tous les appartements une exposition idéale au vent dominant en été (ENE, E, SE), ramenant de la fraîcheur. Les appartements exposés au S, SO, OSO bénéficient de la douceur et d'une bonne illumination en hiver, mais sont condamnés en été à des températures très élevées car exposés aux pics diurnes de la radiation solaire, mais aussi au vent chaud et sec en cas de *sirocco* ou *Chhili* (appellation locale d'un vent venant du Sahara).

3.3. Que révèlent les mesures météorologiques en intérieur ?

Les relevés *in situ* à l'intérieur de quatre pièces orientées au SE et à l'OSO, durant les étés 2023 et 2024 (mois de juin, juillet et août), ont donné des mesures objectives, complétant les entretiens. Les pièces des appartements orientées au SE sont plus fraîches que celles orientées au SO (figure 3). Les températures baissent légèrement la nuit et culminent au moment du maximum d'ensoleillement : vers 11-12 h au SE, à partir de 15 h à l'OSO. Dans le même immeuble, à parois doubles, les pièces A et B (SE) varient de 26,5-27°C en juin à 29-30,5°C en août ; la pièce D (OSO) atteint 31°C en juillet et août, avec des valeurs proches des pièces A et B en juin. La pièce C, à simple cloison, est plus chaude la nuit et nécessite une climatisation plus précoce et plus tardive.

Les indices de confort thermiques Humidex, UTCI et PET sont calculés pour la période avec les températures les plus élevées à l'intérieur des pièces. Une comparaison entre la pièce exposée SE, bien ventilée, et celle exposée OSO dans le même immeuble et au même étage montre bien un degré d'inconfort plus élevé à l'intérieur de la deuxième pièce (de 6,5 à 8°C) quel que soit l'indice utilisé (figure 4). Ces valeurs correspondent à peu près à la situation typique du 21 août 2024 donnée comme exemple. À l'aéroport de Sfax, les températures maximales (environ 34°C) et minimales (environ 24°C) de cette journée coïncidèrent avec les normales du mois d'août (+0,6°C). Le ciel fut dégagé et une situation de marais barométrique (1013 hPa) favorisa la mise en place d'une brise de mer le jour (5 m/s) alternant avec une brise de terre la nuit (2 m/s).

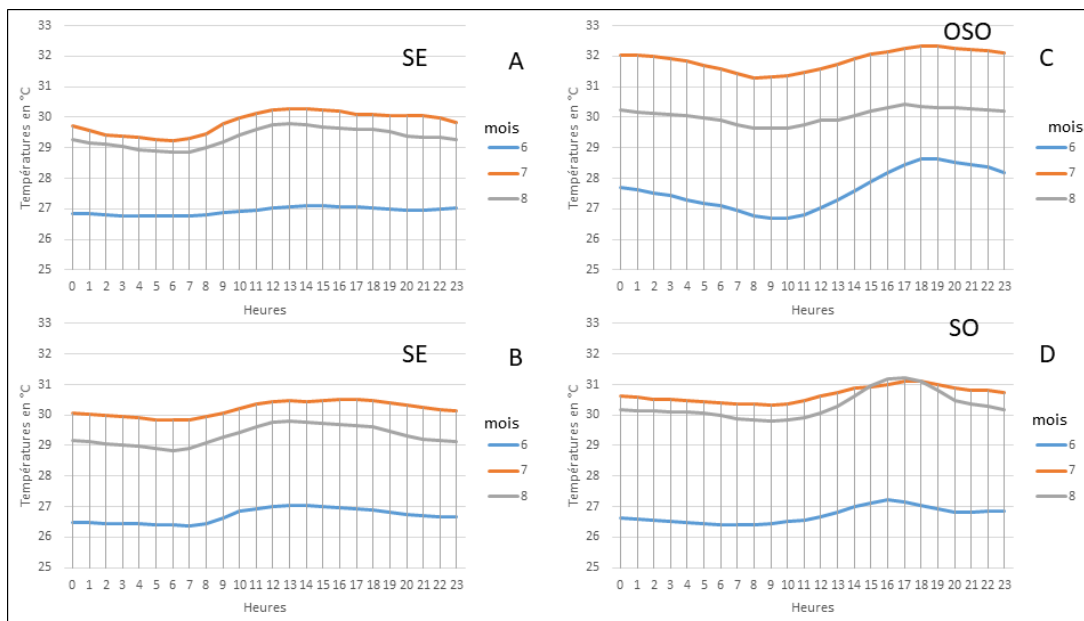
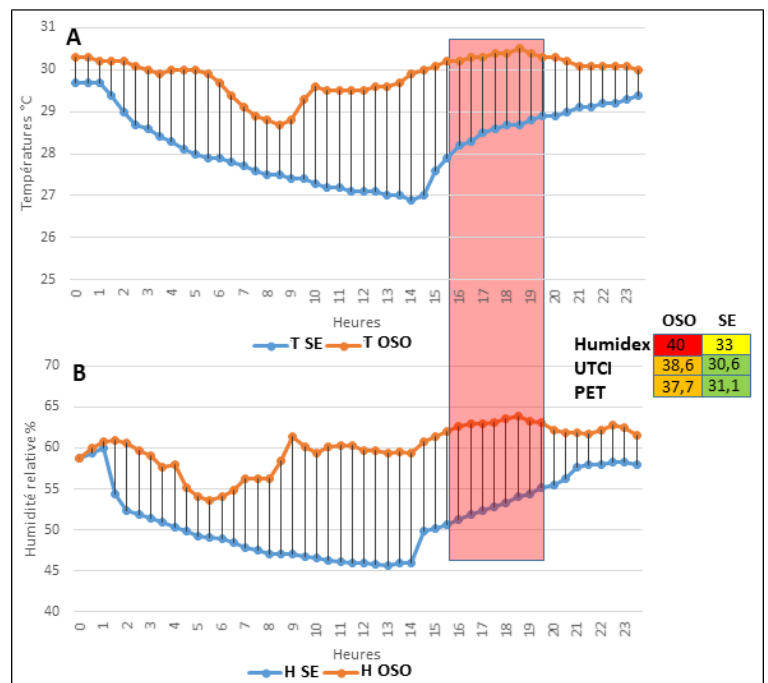


Figure 3. Cycle journalier moyen des températures de l'air à l'intérieur de quatre pièces (de A à D) orientées différemment (T1, T2, T3 et T4 ; figure 1 et tableau 1) pour les moyennes 2023-2024 des mois de juin, juillet et août (données demi-heuraires, thermo-hygromètre H174). *Average daily cycle of air temperatures inside four rooms (A to D) with different orientations (T1, T2, T3 and T4; figure 1 and table 1) for the 2023-2024 averages of the months of June, July and August (half-hourly data, H174 thermo-hygrometer).*

Figure 4. Cycle journalier des températures de l'air (T) à l'intérieur et de l'humidité relative (H) dans deux pièces (T1 et T3 ; figure 1 et tableau 1) le 21 août 2024, et indice de confort en fin d'après-midi (données Testo 400). La zone rectangulaire rose représente la période de la journée durant laquelle un maximum d'inconfort a été observé et les 3 indices associés calculés. Les couleurs utilisées indiquent le degré d'inconfort.

Daily cycle of indoor air temperature (T) and relative humidity (H) in two rooms (T1 and T3; figure 1 and table 1) on August 21, 2024, and late afternoon comfort index (Testo 400 data). The pink rectangular area represents the time of day when maximum discomfort was observed, and the following indices are calculated. The colors used indicate the degree of discomfort.

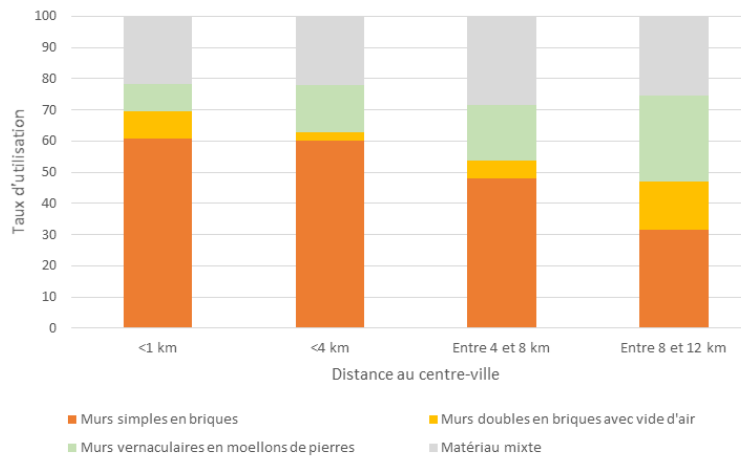


Les réponses au questionnaire indiquent que l'usage de la brique rouge est majoritaire, surtout dans le centre (à moins de 4 km), où elle dépasse 60 % (figure 5). Sa part diminue dans les zones périphériques, essentiellement dans la zone périurbaine où le taux des logements construits en moellons de pierres s'élève à 27,5 %. Le recours massif à la brique rouge à Sfax, dans la construction

de 49,8 % des logements, s'explique par le fait qu'il s'agit du matériau le plus disponible et le moins cher sur le marché. Depuis 20 ans, la tendance marquée à la verticalisation des bâtiments a aussi favorisé son utilisation, du fait de son poids assez léger. En dépit de ces avantages, sa faible inertie thermique accentue la chaleur intérieure en été.

Figure 5. Répartition spatiale des matériaux utilisés dans la construction des habitations des enquêtés à Sfax. Source des données : enquête de terrain réalisée entre octobre et novembre 2023, échantillon de 300 ménages.

Spatial distribution of materials used in the construction of the survey respondents' homes in Sfax. Data source: Field survey conducted between October and November 2023, sample of 300 households.

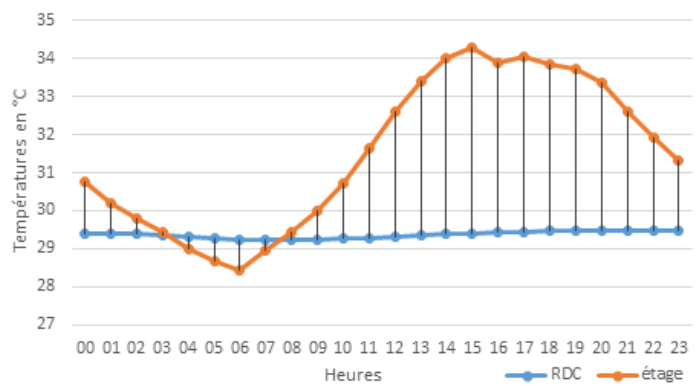


Dans les villas, le rez-de-chaussée (RDC) en moellon est plus tempéré que l'étage en brique à simple cloison : durant l'été 2024, l'après-midi, l'étage est 4 à 5°C plus chaud que le RDC (figure 6), en raison du rayonnement des parois et d'une mauvaise isolation (Batier, 2016). En fin de nuit, l'étage se refroidit plus vite grâce à une meilleure

ventilation et devient plus frais que le RDC, mais il se réchauffe rapidement dès le lever du soleil (figure 6). Ces résultats, cohérents avec ceux de Dahech et Ghribi (2018), confirment que l'isolation de l'enveloppe et de la toiture influence fortement le confort thermique, et que des choix de construction inadéquats aggravent la surchauffe en climat chaud.

Figure 6. Cycle journalier moyen des températures de l'air à l'intérieur de deux pièces pour l'été 2024 au rez-de-chaussée (RDC), avec la même exposition et à l'étage d'une villa à Sfax (données horaires, en été 2024, stations Davis ; RDC en moellon et étage en brique sans isolation, à La Sokra km 1,5 (D4 et D5 ; figure 1 et tableau 1).

Average daily cycle of air temperatures inside two rooms for summer 2024 on the ground floor (GD) and upper floor of a villa in Sfax (hourly data, in summer 2024, Davis stations, same SE exposure; GD in rubble and upper floor in brick without insulation, location La Sokra km 1.5 (site D4 and D5; figure 1 and table 1).

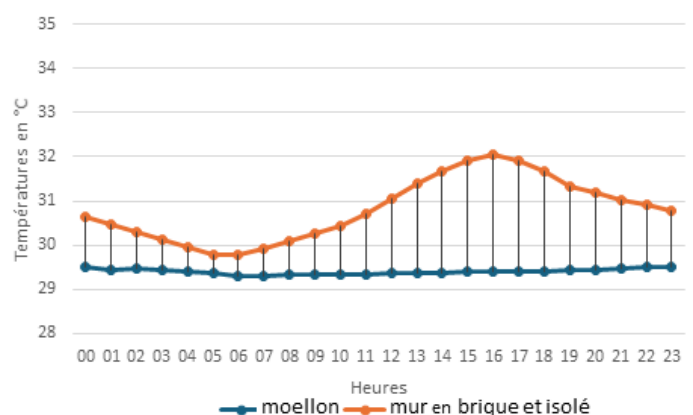


Pour souligner l'effet du matériau, nous avons comparé, sur la même période, deux pièces de taille et d'exposition similaires, distantes d'environ 2,5 km, dans un même type d'urbanisme. L'après-

midi, la maison en moellons de pierre est plus fraîche que celle en brique, avec jusqu'à 2,5°C d'écart entre 14 et 17 h (figure 7). Cette fraîcheur relative se maintient la nuit.

Figure 7. Cycle journalier moyen des températures de l'air mesurées à l'intérieur de deux pièces pour l'été 2024 dans deux villas (possédant un seul niveau) à Sfax (données horaires, en été 2024, stations Davis, même exposition SE ; en moellon et en brique isolée, sur la route de Mahdia et Saltania km 7 (sites D6 et D3 ; figure 1 et tableau 1).

Average daily cycle of air temperatures measured inside two rooms for summer 2024 in two villas (having a single level) in Sfax (hourly data, in summer 2024, Davis stations, same SE exposure; in rubble and insulated brick, on the Mahdia and Saltania road km 7 (sites D6 and D3; figure 1 and table 1).



4. Effet de la distance à la mer et de l'occupation du sol sur les températures de l'air

Parmi les résultats, l'effet de la distance à la mer et de la brise littorale sur le confort d'été était particulièrement attendu, en raison des nombreuses études menées sur Sfax (par exemple, Dahech 2007 et 2014 ; Ghribi et Dahech, 2020). Un gradient mer/terre apparaît pendant l'après-midi, et les quartiers denses et centraux restent plus chauds la nuit, surtout par temps stable avec un ciel clair,

notamment par temps très chaud. La figure 8A1 montre que sur les six sites choisis, tous types de temps confondus durant l'été 2024, l'amplitude jour/nuit à l'extérieur est plus élevée qu'à l'intérieur, et qu'elle augmente avec l'éloignement à la côte : $\sim 5,5^{\circ}\text{C}$ en moyenne près de la mer contre $\sim 10^{\circ}\text{C}$ à 13 km. Cela s'explique par la moindre inertie thermique des terres et l'effet rafraîchissant des brises de mer. En fin de nuit, la Médina est en moyenne $2,2^{\circ}\text{C}$ plus chaude que la campagne environnante. Cet écart, modéré car intégrant toutes les situations météorologiques, serait plus marqué par temps stable et très chaud.

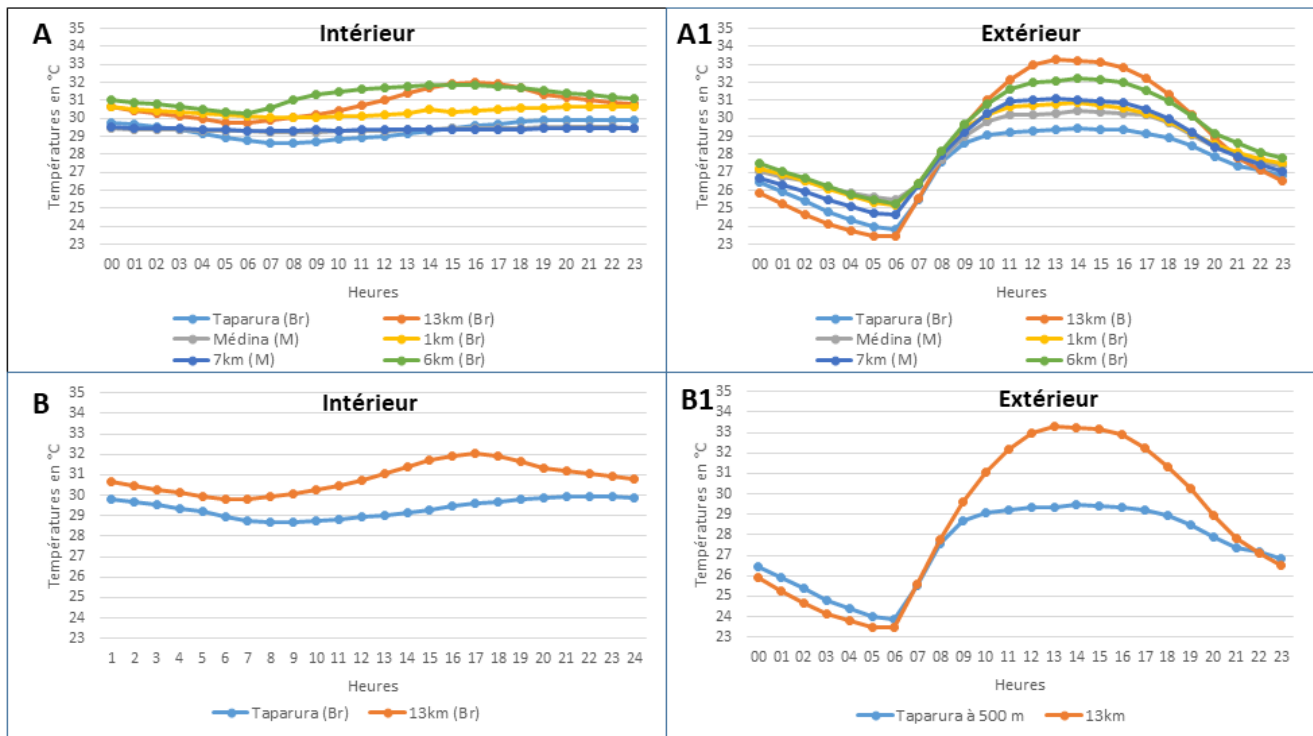


Figure 8. Comparaisons entre les cycles journaliers moyens des températures de l'air à l'intérieur (A) et à l'extérieur (A1) de six pièces, et ceux à l'intérieur (B) et à l'extérieur (B1) de deux pièces dans des villas à Sfax pour l'été 2024 (données horaires, stations Davis, même exposition SE ; en moellon (M) et en brique isolée (Br), localisation sur la figure 1. *Average daily cycle of air temperatures inside (A) and outside (A1) six rooms; Average daily cycle of air temperatures inside (B) and outside (B1) two rooms in villas in Sfax for summer 2024 (hourly data, summer 2024, Davis stations, same SE exposure; in rubble (M) and in insulated brick (Br), location on figure 1.*

L'effet de l'ICU (figure 8A) paraît insignifiant sur les températures à l'intérieur : l'amplitude diurne baisse considérablement, surtout dans les pièces les mieux isolées ; aucun écart ville-campagne n'est observé la nuit et l'impact des matériaux de construction est plus déterminant (écarts notables entre moellon et brique). Toutefois, l'influence de la proximité de la mer reste majeure (figures 8B et B1) : à matériaux identiques (brique),

un logement situé à 200 m du littoral reste plus frais sur 24 h qu'à 13 km, même si, à l'extérieur, les nuits sont légèrement plus douces près de la mer. Les valeurs citées ne représentent que des moyennes, des épisodes comme le sirocco pouvant générer des écarts plus prononcés.

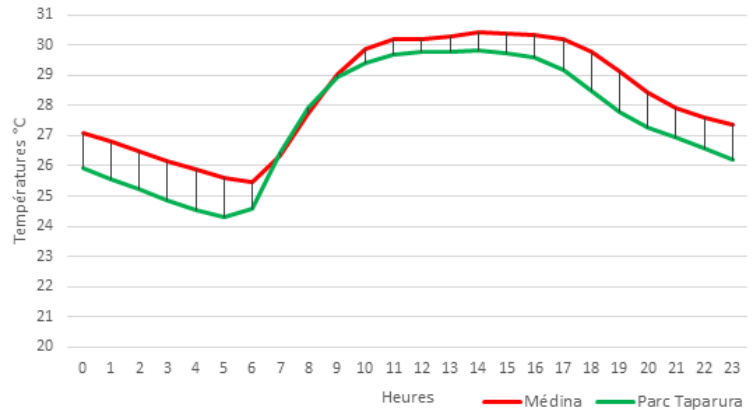
Pour étudier l'effet rafraîchissant de la végétation sur les températures en zone urbaine dense, deux stations météorologiques ont été

installées durant l'été 2024 à proximité du littoral : dans le parc urbain Taparura (exposé à la mer) et dans la Médina, quartier fortement minéralisé, à 500 m du littoral (figure 1). La nuit, le parc est plus frais : entre 18 h et 4 h, l'écart moyen atteint 1,5°C (figure 9), avec un pic entre 2 h et 4 h. En centre-ville, les matériaux perdent lentement la chaleur, tandis que la végétation du parc crée un îlot de fraîcheur, qui s'accroît avec une canopée plus

dense et un arrosage régulier (Pauleit et Duhme, 2000 ; Charfi *et al.*, 2014 ; Ghribi et Dahech, 2023b). L'après-midi, la brise de mer réduit l'écart à moins de 1°C. Le matin, les surfaces naturelles se réchauffent plus vite, du fait de leur faible inertie, et la Médina reste plus longtemps à l'ombre ; les températures de l'air entre les deux sites sont alors comparables.

Figure 9. Cycle journalier moyen des températures de l'air à l'extérieur à la Médina et au parc Taparura (données horaires, en été 2024, stations Davis, localisation D1 et D2 sur la figure 1).

Average daily cycle of outdoor air temperatures in the Medina and Taparura Park (hourly data, summer 2024, Davis stations, location D1 and D2 on figure 1).



5. Comportements actuels des citoyens et enjeux énergétiques futurs

Les architectes consultés lors des entretiens indiquent que la climatisation est désormais un critère majeur de conception, estimé à 70 % (entretien J. K., 2023) : « *avant tout, je sais, par rapport au climat, j'essaie d'utiliser le maximum de techniques pour l'aération naturelle, mais certains clients répondent : "Y a pas de soucis, on a la climatisation"* » (entretien M. A. C., 2023). L'enquête menée confirme cela : en moyenne, les ménages interrogés disposent de 1,7 climatiseur par appartement et de 1,9 climatiseur par villa, ce qui traduit un recours jugé indispensable, surtout pendant les épisodes de sirocco (*Chhili*).

L'enquête montre que l'utilisation des climatiseurs est quasi-systématique dans les logements non exposés à la brise marine, en particulier ceux orientés SO (*Gharbi*) et ONO (*Dahraoui*) (figure 10). Lors des journées de fortes chaleurs (*Chhili*), plus de 85 % des ménages dans des logements orientés *Gharbi* utilisent la climatisation en continu, de jour comme de nuit : en journée, ces locaux, peu ventilés, sont exposés à un fort ensoleillement l'après-midi ; la faible isolation des briques rouges renforce les gains thermiques et

dégrade le confort intérieur. La nuit, la chaleur stockée dans les parois est restituée et l'ICU maintient des températures élevées, tandis que la ventilation naturelle est limitée par la rugosité et le volume des bâtiments (Ghribi et Dahech 2020, 2023a et 2023b). En dehors des épisodes de *Chhili*, l'utilisation de la climatisation diminue nettement.

La question du confort thermique est moins problématique au niveau des villas, car ces habitations individuelles, situées dans des quartiers moins denses et assez ventilés, sont le plus souvent entourées par des jardins, susceptibles d'apporter de la fraîcheur (Ghribi et Dahech, 2020), notamment la nuit, lorsque les climatiseurs sont parfois éteints, en dehors des périodes de *Chhili* (figure 10). Cependant, le fort équipement en climatiseurs des villas (de 78,8 % pour celles orientées ESE *Guebli* à 100 % pour les *Guebli* et *Chergui*) peut s'expliquer par un plus fort pouvoir d'achat, permettant parfois d'équiper chaque pièce de vie, mais aggravant potentiellement la vulnérabilité de la population de plus en plus dépendante à la climatisation, notamment les jeunes : « *les chambres équipées en climatiseurs sont pour les enfants et moi je préfère la ventilation naturelle* » d'après un résident de la Médina dans une maison traditionnelle (entretien, 2024).

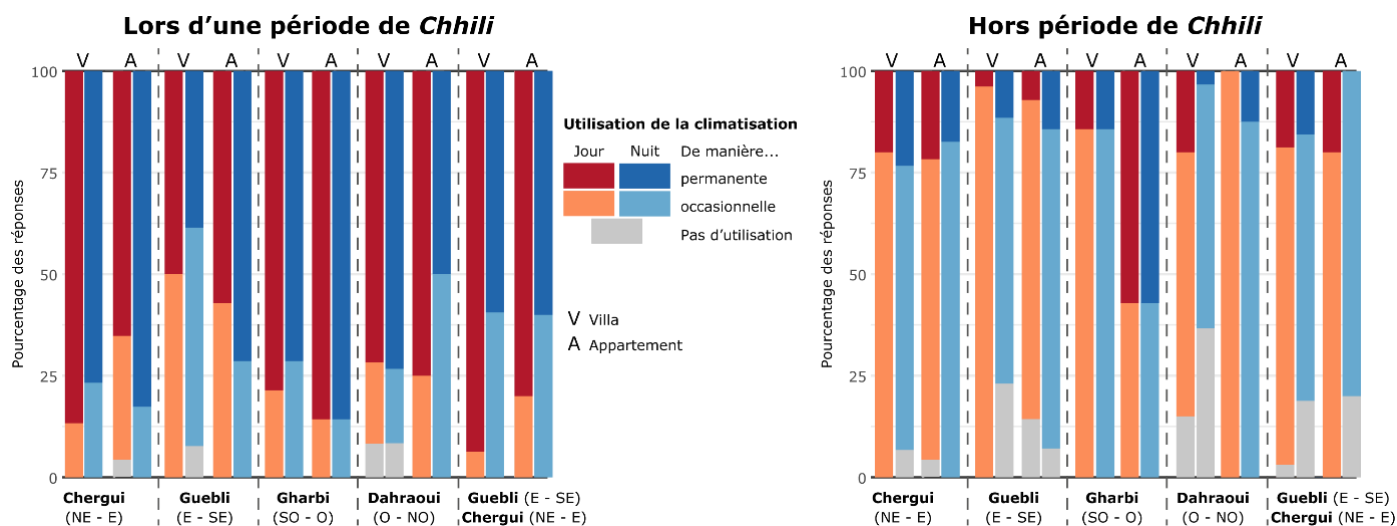


Figure 10. Utilisation de la climatisation électrique dans les villas et les appartements ; lors et hors des périodes de Chhili. Source des données : enquête de terrain réalisée entre octobre et novembre 2023, échantillon de 300 ménages. *Use of electric air conditioning in villas and apartments; during and outside of the Chhili period. Data source: field survey conducted between October and November 2023, sample of 300 households.*

Si la climatisation électrique est perçue comme indispensable en raison de la récurrence des épisodes de canicule, les réponses au questionnaire montrent aussi que d'autres solutions sont privilégiées. Trois ménages interrogés sur quatre (72 %) citent la proximité de la mer comme source de rafraîchissement, et 63 % des logements sont orientés vers la mer pour profiter de la brise de mer rafraîchissante, lors des situations de marais barométrique en surface et de haut géopotentiel en altitude, typiques en été (Ghribi et Dahech, 2020).

Les logements orientés ESE, exposés à cette brise, bénéficient d'une ventilation naturelle qui réduit l'usage des climatiseurs (sauf pendant les périodes de *Chhili*). Pour limiter l'exposition à la radiation solaire, les personnes interrogées sont 80 % dans les logements orientés SO à fermer les stores des fenêtres, contre 62 % pour celles dans des logements ESE, profitant de la brise de mer.

De plus, il ressort des réponses au questionnaire que plus de la moitié des ménages quittent Sfax durant une partie de l'été pour les zones balnéaires à Djerba, au Sahel (Mahdia, Sousse et Monastir) et au nord du pays (Nabeul, Bizerte), tandis qu'un tiers environ fréquente le village de Chaffar à 30 km au sud de Sfax. Par ailleurs, pour ceux qui restent à domicile, pendant les nuits estivales, environ 52 % profitent de la fraîcheur dans leurs jardins ou fréquentent un site végétalisé (espace public ou privé).

6. Discussion

L'originalité de cette étude est le fait qu'elle repose sur une enquête de terrain auprès de 300 ménages et une enquête qualitative auprès de ceux qui construisent la ville, mettant en évidence des stratégies locales d'adaptation aux fortes chaleurs estivales et des mesures de la chaleur à l'intérieur et l'extérieur des habitations. Notre approche repose à la fois sur les perceptions des ménages interrogés et sur des mesures objectives. De plus, elle fait le lien entre des travaux de climatologie urbaine ou d'autres fondés sur les perceptions comme ceux de Guérit *et al.* (2023) sur l'agglomération d'Orléans en France. Cette dernière étude part du principe de la réalité vécue par les habitants pendant une période de fortes chaleurs est aussi celle de leur ressenti. Dans notre recherche, certains résultats issus de l'enquête peuvent être différents ou inattendus par rapport à certaines hypothèses de départ, eu égard à l'hétérogénéité de l'échantillon choisi sur le plan culturel et socio-économique. À titre d'exemple, certains ménages habitant la zone résidentielle, végétalisée et bien ventilée avec des températures plus supportables que dans le centre et les quartiers denses, recourent pourtant très régulièrement à la climatisation, leurs moyens financiers leur permettant de payer les factures conséquentes. Une partie des ménages équipés par des panneaux photovoltaïques ne fait pas attention au surcroît de la consommation de l'énergie

électrique causé par la climatisation. En effet, 19 % des enquêtés utilisent des panneaux solaires et 80 % des chauffe-eau solaires, réduisant la dépendance aux énergies fossiles, mais risquant d'accroître la consommation de l'énergie électrique et de l'eau.

Sur le plan méthodologique, dans la partie enquête nous avons intégré dans le plan d'échantillonnage en plus des critères socio-économiques des critères géographiques complétant les travaux de Semenza *et al.* (2008) et de Ban *et al.* (2019) qui s'intéressent uniquement aux activités humaines durant les vagues de chaleur, et de Guérit *et al.* (2023) fondés sur les catégories socio-professionnelles, le genre et le niveau d'études des enquêtés. Ce choix nous a permis d'évaluer les modes d'adaptation des habitants en fonction de la variation spatiale des températures, très corrélée à la distance à la mer et à l'éloignement du centre de l'agglomération.

Parmi les traits d'originalité de cette étude, nous pouvons citer l'utilisation de données issues des consoles des stations météorologiques Davis pour qualifier les températures et l'humidité de l'air à l'intérieur. Nous pensons que cette méthode a permis d'obtenir des résultats cohérents. Néanmoins, les mesures météorologiques évoquées dans cette étude demeurent ponctuelles. Elles seront renforcées par l'implantation de quatre stations Davis supplémentaires et le recours à la méthode des mesures mobiles faites simultanément par six équipes balayant toute l'agglomération à l'échelle trihoraires. Les données recueillies seront précieuses pour alimenter des modèles statistiques et numériques. La variabilité spatio-temporelle des mesures sera expliquée par les facteurs relatifs aux paramètres morphologiques urbains. On peut citer, par exemple, la hauteur du bâti, le *Sky View Factor* ou encore la part d'espaces verts autour (Duché *et al.*, 2025). Il est possible également d'équiper davantage de ménages par des mini-capteurs. Toutefois, l'agglomération de Sfax ne dispose pas actuellement de stations de réseau citoyen et participatif, comme celles venant du réseau Netatmo (Madelin et Dupuis, 2020 ; Benjamin *et al.*, 2021 ; Brousse *et al.*, 2022).

Notre étude a montré que la répartition de la forte chaleur et de la brise de mer influence les pratiques et participe à l'aménagement des habitations et à la construction de la ville. En effet, les résultats

obtenus à travers les mesures du confort thermique à l'intérieur des logements, bien qu'elles soient ponctuelles, ont soulevé l'influence de l'exposition au soleil et au vent dominant (E, SE) ainsi que l'isolation des parois, ces résultats corroborent d'autres travaux comme Batier (2016). Une partie de la population s'adapte à la forte chaleur en adoptant un comportement permettant de réduire la surchauffe. Les enseignements à tirer de cette étude ne concernent pas uniquement le volet construction et aménagement mais aussi les bonnes pratiques et gestes à adopter pour améliorer l'adaptation à la forte chaleur estivale. Ces enseignements sont transférables à d'autres villes méditerranéennes. Les résultats obtenus rejoignent d'ailleurs en partie ceux de Chebli *et al.* (2023) concernant la ville de Kairouan, où le contexte géographique est légèrement différent, la ville étant continentale et la brise de mer moins déterminante pour le confort thermique estival. Il est important de prendre en compte le contexte topoclimatique lorsqu'on aborde la question du transfert du savoir-faire en matière d'aménagement et de bonnes pratiques. Dans ce contexte, les solutions de rafraîchissement par la végétalisation et l'arrosage se heurtent, en particulier dans les villes du sud de la Méditerranée, à la pénurie d'eau, comme le montre l'étude de Salvati (2020).

Notre étude montre bien une meilleure adaptation à la chaleur au niveau des habitations vernaculaires. Par ailleurs, la densification et l'étalement urbain, durant les trois dernières décennies, ont été accompagnés par l'émergence de la construction verticale où les logements (appartements) orientés au quadrant SO sont exposés aux pics de chaleur et abrités de la brise de mer. Contrairement à nos résultats, certaines études démontrent la désadaptation des pratiques de construction traditionnelles aux changements climatiques actuels et visent à concevoir une nouvelle conception architecturale, fondée sur des projections climatiques, pour réduire le risque de surchauffe en été (Gul et Menzies, 2012).

Cette étude n'aborde pas certaines répercussions négatives de l'isolation des bâtiments et du recours à la climatisation excessive, comme les gênes respiratoires (Janssen *et al.*, 2002 ; Graudenz *et al.*, 2005) ou encore les problèmes de sommeil

(Teramoto *et al.*, 1998 ; Lan *et al.*, 2016). Les personnes les plus vulnérables sont les plus impactées comme les ménages à faibles revenus et les personnes âgées (de plus de 75 ans) (Palinkas *et al.*, 2022 ; Cleland *et al.*, 2023). Dans des travaux futurs, nous souhaitons aborder la question des répercussions sanitaires de la forte chaleur et de la climatisation.

Il est important dans de futurs travaux d'intégrer plusieurs aléas pour mener une étude de risques combinés (Lapietra *et al.*, 2024). En effet, dans l'agglomération de Sfax, outre la chaleur, l'exposition à la pollution de l'air (Euchi *et al.*, 2025), non détaillée dans ce travail, aggrave la sensation d'inconfort, l'été, particulièrement dans les quartiers populaires. Une prochaine étude sur la variation spatiale de la vulnérabilité de la population face aux risques naturels se basera sur la quantification et la cartographie de la vulnérabilité sociale. Elle pourrait constituer une approche utile pour élaborer des stratégies de gestion des risques (Li et Wang, 2022).

Parmi les solutions pour réduire la vulnérabilité des sociétés à la forte chaleur, l'information est un levier majeur. Dans notre étude, nous n'évoquons pas le rôle des réseaux sociaux, officiels, et des médias comme un moyen d'avertissement et d'anticipation susceptible d'optimiser la résilience en périodes de canicule (Palinkas *et al.*, 2022). Outre les actions individuelles et communautaires (Kiarsi *et al.*, 2023), les agences de santé publique doivent être plus impliquées dans les campagnes de sensibilisation en raison des graves risques sanitaires liés aux fortes chaleurs, notamment pour la population souffrant des maladies chroniques (Palinkas *et al.*, 2022).

Conclusion

La densification urbaine de l'agglomération de Sfax, et l'intensification et l'extension des épisodes de chaleur dans le bassin méditerranéen ont accentué les îlots de chaleur urbains. Notre hypothèse principale était que les changements des pratiques architecturales avaient entraîné une perte

Références

Abelata A., Sodoudi S., 2020. Evaluating the effect of trees

des savoir-faire en termes de ventilation naturelle, augmentant le recours quasi généralisé à la climatisation.

Par une démarche méthodologique plurielle, nous avons ici confirmé cette hypothèse. Le type de logement, son exposition et le matériau utilisé dans la construction du bâtiment sont les trois facteurs déterminants dans l'étude de l'adaptation des sfaxiens aux chaleurs estivales marquées. En effet, l'orientation des habitations au vent frais et au soleil influence voire détermine les comportements et le recours à la climatisation.

À Sfax, le choix des matériaux de construction, des couleurs des bâtiments et de la ventilation naturelle s'avère parmi les solutions les plus pertinentes pour optimiser le confort thermique. La végétalisation pourrait également être considérée comme une alternative quand l'eau est suffisamment disponible : privilégier une plantation d'arbres adaptés au climat local, créant de l'ombre, plutôt que des pelouses à arroser plus abondamment. Enfin, cette recherche souligne aussi la nécessité d'une bonne compréhension de l'aérologie locale afin de profiter des brises littorales rafraîchissantes. En perspective, des travaux en cours à Sfax visent à vérifier les résultats de l'enquête utilisée dans ce travail en augmentant l'échantillon et en multipliant les entretiens avec les différents acteurs interrogés. D'autres mesures météorologiques complémentaires, signalées dans la partie 'Discussion', permettront d'affiner nos connaissances sur la variation spatio-temporelle de la température en été. Les informations obtenues pourraient être partagées avec les municipalités concernées afin de concevoir un guide de bonnes pratiques pour faire face aux épisodes de forte chaleur et améliorer l'information auprès de la population.

Remerciements : Nous tenons à remercier le programme PHC Utique 21 G0401 pour le financement des missions de terrain. Nous adressons nos remerciements à Marwen Hamdi, Sahar Chamtouri et Boutheina Derbeli qui ont participé à la réalisation de l'enquête de terrain.

on UHI mitigation and reduction of energy usage in different built up areas in Cairo. *Building and Environment*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106490>

- Amieur R., 2024. *Impact du couvert végétal sur les ambiances thermiques extérieures dans les zones chaudes et arides. Site d'étude : la ville de Ghardaïa-Algérie*. Université de Constantine 3, 315 p.
- Anand J., Sailor D. J., 2022. Role of pavement radiative and thermal properties in reducing excess heat in cities. *Solar Energy*, 242, 413-423. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.056>
- Baaghideh M., Mayvaneh F., Shojaee T., 2016. Evaluation of human thermal comfort using UTCI index: Case study Khorasan Razavi Iran. *Natural Environment Change*, 2, 2, 165-175.
- Ballinas M., Morales-Santiago S. I., Barradas V. L., Lira A., Oliva-Salinas G., 2022. Is PET an adequate index to determine Human Thermal Comfort in Mexico City? *Sustainability*, 14, 19, 12539. <https://doi.org/10.3390/su141912539>
- Ban J., Shi W., Cui L., Liu X., Jiang C., Han L., et al., 2019. Health-risk perception and its mediating effect on protective behavioral adaptation to heat waves. *Environmental Research*, 172, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.01.006>
- Batier S., 2016. *Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen*. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier, 291 p.
- Benjamin K., Luo Z., Wang X., 2021. Crowdsourcing urban air temperature data for estimating urban heat island and building heating/cooling load in London. *Energies*, 14, 16, 5208. <https://doi.org/10.3390/en14165208>
- Bennasr A., 2003. L'étalement urbain de Sfax. *Revue tunisienne de géographie*, 36, 49-87.
- Bennasr A., Verdeil É., 2009. Gestion publique de l'eau potable, développement urbain durable et Majel-s (citernes d'eau pour l'eau de pluie) à Sfax en Tunisie. *Flux*, 76-77(2), 38-50. <https://doi.org/10.3917/flux.076.0038>.
- Brousse O., Simpson C., Walker N., Fenner D., Meier F., Taylor J., et al. 2022. Evidence of horizontal urban heat advection in London using six years of data from a citizen weather station network. *Environmental Research Letters*, 17, 4. DOI 10.1088/1748-9326/ac5c0f
- Buechley R. W., Van Bruggen J., Truppi L. E., 1972. Heat island equals death island? *Environmental Research*, 5, 1, 85-92. [10.1016/0013-9351\(72\)90022-9](https://doi.org/10.1016/0013-9351(72)90022-9)
- Castellanos M., García M. Á., Pérez I. A., Sánchez M. L., Pardo N., Fernández-Duque B., 2021. Measuring temperature trends in the Mediterranean basin. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 222, 105713. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105713>
- Cavadini G. B., Manoli G., Cook L. M., 2026. Cooling potential of stormwater blue-green infrastructure depends on soil type and water availability. *Sustainable Cities and Society*, 136, 107083. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.107083>
- Charfi S., Krout H., Dahech S., 2014. Vegetation in the urban area of Tunis: Study of impacts on temperature and light. *Climatologie*, 11, 72-78.
- Chebli M. 2022. *Les particularités thermiques de l'agglomération de Kairouan - Tunisie*. Thèse de doctorat de l'Université Paris Cité, 228 p.
- Chebli M., Dahech S., Charfi S., 2023. Vulnérabilité de la population face aux fortes chaleurs dans l'agglomération de Kairouan (Tunisie centrale). *EchoGéo*, 66. <https://doi.org/10.4000/echogeo.26014>
- Cleland S. E., Steinhardt W., Neas L. M., West J. J., Rappold A. G., 2023. Urban heat island impacts on heat-related cardiovascular morbidity: A time series analysis of older adults in US metropolitan areas, *Environment International*, 178, 108005. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108005>.
- Cramer W., Guiot J., Fader M., Garrabou J., Gattuso J.-P., Iglesias A., et al. 2018. Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8, 972-980. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>
- Dahech S., 2007. *Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique*. Thèse de doctorat de l'université Paris VII, 309 p.
- Dahech S., 2009. Aggravation du réchauffement en milieu urbain à Sfax (Tunisie). *Fifth Urban Research Symposium 2009*, Marseille, 20 p. www.urs2009.net/docs/papers/Dahech.pdf
- Dahech S., 2014. Impact de la brise de mer sur le confort thermique au Maghreb oriental durant la saison chaude, *Cybergeo: European Journal of Geography* [En ligne], 695, 29 p. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.26555>
- Dahech S., Ghribi M., 2018. Réchauffement climatique en ville et ses répercussions énergétiques. Cas de l'agglomération de Sfax (centre-est de la Tunisie). *Méditerranée*, 128, 29-38. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.8548>
- Duché S., Dubreuil V., Madelin M., Dupuis V., Foissard X., Gripay Y., et al., 2025. Mesures et spatialisation de données climatiques et de qualité de l'air en milieu urbain en France. *Risques urbains*, 8, 1, 1-21. doi: 10.21494/ISTE.OP.2025.1271
- Euchi H., Dahech S., Abdmouleh M. A., 2025. Crise des déchets et incinération sauvage à Sfax (Tunisie) : une campagne de mesures dédiée à l'évaluation de la pollution de l'air par les particules ? *Cybergeo: European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 1087. <https://doi.org/10.4000/13gxq>
- Ferrari A., Kubilay A., Derome D., Carmeliet J., 2020. The use of permeable and reflective pavements as a potential strategy for urban heat island mitigation. *Urban Climate*, 31, 100534. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100534>
- Garau E., De Abreu G., Perez-Ramirez I., Schütze N., Farhat Y. A., Loureiro J., et al., 2026. Diverse values of nature can drive transformative change in the WEFEnexus governance in Mediterranean countries. *Sustainability Science*, 21, 283-303. <https://doi.org/10.1007/s11625-025-01757-w>
- García M. J. L., 2015. Recent warming in the Balearic Sea and Spanish Mediterranean coast. Towards an earlier and longer summer. *Atmósfera*, 28, 3, 149-160. <https://doi.org/10.20937/ATM.2015.28.03.01>
- Ghribi M., Dahech S., 2020. Caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain à Sfax durant la saison chaude (centre-est de la Tunisie). *Climatologie*, 17, 7. <https://doi.org/10.1051/climat/202017007>

- Ghribi M., Dahech S., 2023a. The impact of the Urban Heat Island on the sensation of thermal comfort and electricity consumption in Sfax in Central-Eastern Tunisia during the hot season. *Energies*, 16, 2, 911. <https://doi.org/10.3390/en16020911>
- Ghribi M., Dahech S., 2023b. Impacts des espaces verts sur la répartition des températures de l'air pendant la saison chaude dans l'agglomération de Sfax (centre-est de la Tunisie). *Climatologie*, 20, 5, 16 p. <https://doi.org/10.1051/climat/202320005>
- Graudenz G. S., Oliveira C. H., Tribess A., Mendes C. Jr., Latorre M. R. D. O., Kalil J., 2005. Association of air-conditioning with respiratory symptoms in office workers in tropical climate. *Indoor Air*, 15, 1, 62-66. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00324.x>
- Guérit F., Marega O., Sirlain A., 2023. *Fortes chaleurs, morphologie urbaine et inégalités. Enquête "Adaptation au changement climatique des habitants de l'agglomération d'Orléans"*. Note de synthèse. <https://hal.science/hal-04555256v1>
- Gul M. S., Menzies G. F., 2012. Designing domestic buildings for future summers: Attitudes and opinions of building professionals. *Energy Policy*, 45, 752-761. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.046>
- Hassani N., 2023. *Caractérisation des îlots de chaleur de saison chaude dans les territoires de l'Eurométropole de Metz (France) et du Grand Casablanca (Maroc) : observation, perception, vulnérabilité*. Géographie. Thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, <https://hal.univ-lorraine.fr/te-04469142v1>
- IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, [doi:10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896)
- Janssen N. A. H., Schwartz J., Zanobetti A. et Suh H. H., 2002. Air conditioning and source-specific particles as modifiers of the effect of PM(10) on hospital admissions for heart and lung disease. *Environmental Health Perspectives*, 110, 1, 43-49. <https://doi.org/10.1289/ehp.0211043>
- Jendritzky G., de Dear R., Havenith, G., 2012. UTCI – Why another thermal index? *Int. J. Biometeorol.*, 56, 421-428. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>
- Karray N., 1982. *Le Grand Sfax : évolution récente et développement futur*. Thèse d'État en urbanisme à l'université Paris I, 2 volumes, 277 et 228 p. + annexes.
- Kiarsi M., Amiresmaili M., Mahmoodi M., Farahmandnia H., Nakhaee N., Zareiyan A., Aghababaeian H., 2023. Heat waves and adaptation: A global systematic review. *Journal of Thermal Biology*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2023.103588>
- Lai D., Wenyu L., Tingting G., Kuixing L., Qingyan C., 2019. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of the Total Environment*, 661, 337-353. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.062>
- Jan L., Lian Z.W., Lin Y.B., 2016. Comfortably cool bedroom environment during the initial phase of the sleeping period delays the onset of sleep in summer. *Building and Environment*, 103, 36-43, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.030>
- Lapietra I., Colacicco R., Capolongo D., La Salandra M., Rinaldi A., Dellino P., 2024. Unveiling social vulnerability to natural hazards in the EEA and UK: A systematic review with insights for enhanced emergency planning and risk reduction, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 108, 104507. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104507>
- Le Mentec S., 2022. Impact de la végétalisation sur l'îlot de chaleur urbain et la pollution d'ozone: quantification par une approche de modélisation à l'échelle d'un quartier. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, <https://pastel.hal.science/te-03937342v1>
- Li H., Wang W., 2022. Knowledge domain and emerging trends of social vulnerability research: A bibliometric analysis (1991–2021). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 14, 8342. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148342>
- Li X., Zhou Y., Yu S., Jia G., Li H., Li X., 2019. Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. *Energy*, 174, 407-419. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.183>
- Li Y., He B.-J., 2025. Biophilic street design for urban heat resilience. *Progress in Planning*, 199, 100988. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2025.100988>
- Liu F., Ren Y., Zhang L., Li X., 2025, Impact of super high-rise buildings on wind comfort and safety of pedestrian wind environment: A case study in Shanghai, China. *Case Studies in Thermal Engineering*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106197>
- Liu Y., Chu Ch., Zhang R., Chen S., Xu Ch., Zhao D., et al. 2024. Impacts of high-albedo urban surfaces on outdoor thermal environment across morphological contexts: A case of Tianjin, China. *Sustainable Cities and Society*, 100, 105038. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105038>
- Madelin M., Dupuis V., 2020. Intensité et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain parisien à partir de données participatives. *Climatologie*, 17, 9. <https://doi.org/10.1051/climat/202017009>
- Matzarakis A., Gangwisch M., Fröhlich D., 2021. RayMan and SkyHelios Model. In: *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*, Palme M., Salvati A., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 339-361.
- Megdiche T., 1985. *Les processus de la croissance urbaine dans la périphérie de Sfax*. Thèse de troisième cycle en géographie et aménagement à l'université de Toulouse Le Mirail, 272 p.
- Ntoumos A., Hadjinicolaou P., Zittis G., Proestos, Y., Lelieved J., 2022. Projected air temperature extremes and maximum heat conditions over the Middle-East-North Africa (MENA) region. *Earth Systems and Environment*, 6, 343-359.

<https://doi.org/10.1007/s41748-022-00297-y>

Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. A., 2017. *Urban Climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>

Palinkas L. A., Hurlburt M. S., Fernandez C., De Leon J., Yu K., Salinas E., Garcia E., Johnston J., Rahman M. M., Silva S. J., McConnell R. S., 2022. Vulnerable, resilient, or both? A qualitative study of adaptation resources and behaviors to heat waves and health outcomes of low-income residents of urban heat islands. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19, 17, 11090. <https://doi.org/10.3390/ijerph191711090>

Pauleit S., Duhme F., 2000. GIS assessment of Munich's urban forest structure for urban planning. *Journal of Arboriculture*, 26, 3, 133-141. [10.48044/jauf.2000.016](https://doi.org/10.48044/jauf.2000.016)

Pietrapertosa F., Olazabal M., Simoes S. G., Salvia M., Fokaides P. A., Ioannou B. I., *et al.*, 2023. Adaptation to climate change in cities of Mediterranean Europe. *Cities*, 140, 104452. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104452>

Rosenfeld A. H., Akbari H., Bretz S., Fishman B. L., Kurn D. M., Sailor D., Taha H., 1995. Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, 22, 3, 255-265. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00927-P](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00927-P)

Salvati L. 2020. L'adaptation au réchauffement climatique en Méditerranée, le nouvel objectif de rafraîchissement urbain. Sciences de l'Homme et Société. Mémoire de M2, Université Aix-Marseille, <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03276787v>

Seifeddine K., Amziane S., Toussaint E., Ouldboukhite S. E., 2023. Review on thermal behavior of cool pavements. *Urban Climate*, 51, 101667. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101667>

Semenza J. C., Wilson D. J., Parra J., Bontempo B. D., Hart M., Sailor D. J., *et al.*, 2008. Public perception and behavior change in relationship to hot weather and air pollution. *Environmental Research*, 107, 3, 401-411. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.03.005>

Su Y. M., Antoni J., 2023. Outdoor thermal comfort study on urban areas with various densities in Taipei. *Eng. Proc.*, 38, 1, 77. <https://doi.org/10.3390/engproc2023038077>

Teramoto Y., Tokura H., Ioki I., Suho S., Inoshiri R., Masuda M., 1998. The effect of room temperature on rectal temperature during night sleep. *Journal of Thermal Biology*, 23, 1, 15-21. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(97\)00041-7](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(97)00041-7).

Wang C., Ren Z., Dong Y., Zhang P., Guo Y., Wang W., *et al.*, 2022. Efficient cooling of cities at global scale using urban green space to mitigate urban heat island effects in different climatic regions. *Urban For. Urban Green*, 74, 127635. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127635>

Wong N. H., Jusuf S. K., 2010. Air Temperature Distribution and the Influence of Sky View Factor in a Green Singapore Estate. *Journal of Urban Planning and Development*, 136, 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000014](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000014)

Yu B., Pan J., 2026. How do 2D and 3D urban morphology impact spatial patterns of thermal environment? A nested multi-scale local climate zone perspective. *Building and Environment*, 288, 114014. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.114014>

Yuan B., Zhou L., Hu F., Wei C., 2024. Effects of 2D/3D urban morphology on land surface temperature. *Urban Climate*, 53, 101791. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101791>

Zhang S., Zhang X., Niu D., Fang Z., Chang H., Lin Z., 2023. Physiological equivalent temperature-based and universal thermal climate index-based adaptive-rational outdoor thermal comfort models. *Building and Environment*, 228, 109900. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109900>

Zhao J., Lu J., Ge J., Fan Y., Wang H., Gu M., *et al.*, 2025. Influences of permeable pavements with different hydraulic properties on evaporative cooling and outdoor thermal environment: Field experiments. *Building and Environment*, 270, 112525. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112525>

Annexe 1

Équation 1 : Formule générale de la température radiante (T_{mrt}) en convection forcée selon la norme ISO 7726 (1998) :

$$T_{mrt} = [(T_g + 273,15)^4 + 1,1 \times 108 \times V_a^{0,6} \varepsilon \times D^{0,4} \times (T_g - T_a)]^{1/4} - 273,15$$

où T_g est la température de globe noir (°C), V_a la vitesse du vent en (m/s), T_a la température d'air (°C), D le diamètre du globe (en m, ici égal à 0,150 m) et ε l'émissivité du globe (égale à 0,95).

Équation 2 : Indice *Temperature of Equivalent Perception* (TEP) développée pour la ville de Sao Paulo (Monteiro, 2013). L'environnement de référence est défini par une température d'air égale à la température radiante moyenne, une humidité relative de 50% et une vitesse d'air nulle. L'expression de TEP est la suivante :

$$TEP = -3,777 + 0,4828 T_a + 0,5172 T_{mrt} + 0,0802 HR + 2,322 V_a$$

où T_a est la température d'air (°C), T_{mrt} la température radiante, HR l'humidité relative et V_a la vitesse du vent en (m/s).

Échelle de sensation thermique associée à l'indice TEP (Monteiro, 2013) :

TEP (°C) Sensation thermique > 42,5 : Très chaud	12,0 – 19,5 : Assez froid
34,9 – 42,4 : Chaud	4,4 – 11,9 : Froid
27,3 – 34,8 : Assez chaud	< 4,3 : Très froid
19,6 – 27,2 : Neutre	

Citation de l'article : Ghribi M., Charfi S., Dahech S., Lavie E. et Madelin M., 2025. Adaptation aux fortes chaleurs dans l'agglomération de Sfax : mesures météorologiques et comportements de la population pendant l'été (2023-2024). *Climatologie*, 23, 3.