

Conception Urbaine pour une Résilience Climatique : Impact des Configurations Urbaines sur le Confort Thermique Extérieur des Rues Canyons, Cas de la Ville de Tunis

Safa Achour Younsi^{##*1}

[#]*Département Architecture, Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis*

Rue El Quods, Site archéologique de Carthage 2026, Tunisie

¹safa.achouryounsi@enau.ucar.tn

^{*}*LaRPA, Laboratoire de Recherche en Patrimoine et Architecturologie LR21ES20, équipe PAE3C*

Résumé— Cette étude vise à étudier l'impact de la morphologie urbaine, plus précisément l'orientation et le ratio hauteur sur largeur des rues (H/W), sur le confort thermique extérieur. Elle porte sur le climat spécifique de la ville de Tunis en Tunisie qui est considéré comme étant subtropical méditerranéen. La recherche a été effectuée en deux temps, d'abord une étude comparative des conditions de confort thermique extérieur de tissus présentant des différences morphologiques, à travers l'indice de confort UTCI (Universal Thermal Climate Index). Ensuite, dans un second temps, une étude paramétrique nous a permis de confirmer les résultats en simulant des tissus fictifs sur le modèle de simulation numérique Envi-Met (v4.0). Les résultats s'intéressent aux deux saisons hivernale et estivale afin de répondre au mieux aux exigences d'utilisation.

Mots-clés— Confort thermique extérieur, morphologie urbaine, développement urbain durable, simulation numérique

I. INTRODUCTION

L'effet de l'îlot de chaleur urbain (ICU), qui est la différence de température entre une ville et ses environs [1], est un facteur qui a intéressé plusieurs recherches durant ces dernières années, tant son impact sur l'environnement urbain est important. La principale cause de son apparition s'avère être une urbanisation grandissante associée au changement climatique [2].

Ainsi, dans une ère où le management durable des villes n'est plus une option, mais une condition sine qua none au bon développement futur des cités, il devient impératif de tout mettre en œuvre afin d'atténuer l'ICU et d'aborder l'environnement urbain sous un angle résilient.

A cet effet, plusieurs recherches ont mis en avant le rôle prépondérant de la morphologie urbaine sur le microclimat urbain d'abord et sur le confort thermique extérieur ensuite. Ainsi, plusieurs indicateurs morphologiques apparaissent comme étant influents, parmi les plus importants l'orientation et le ratio hauteur sur largeur des rues H/W [3].

II. RETOUR SUR LE CONFORT THERMIQUE EXTERIEUR

Le confort thermique extérieur est une notion globale et complexe. Son étude doit être menée en considérant les différents aspects entrant en jeu dans l'équation du confort, à savoir, l'aspect physique, celui physiologique et enfin le psychologique. Ces différentes approches permettent de mettre en avant les interrelations entre les conditions thermiques de l'environnement, les réponses physiologiques et les phénomènes psychologiques. [4]

Il paraît donc important et primordial de prendre en considération l'ensemble des facteurs afin d'avoir une évaluation aussi globale que possible. Nous pouvons classer ces facteurs en trois catégories [5]. D'abord, nous citons les paramètres climatiques qui sont à la base de toute étude concernant le confort. Il s'agit essentiellement de la température de l'air (T_a), de la température moyenne radiante (T_{mrt}), de l'humidité relative (RH) et de la vitesse de l'air (V_a). Il existe aussi d'autres facteurs, tout aussi importants, qui sont le métabolisme, l'habillement ou encore les facteurs d'acclimatation et de régulation comportementale.

III. CONTEXTE ET TYPOLOGIES URBAINES

La ville de Tunis peut être considérée comme un brassage de typologies urbaines juxtaposées et qui cohabitent dans un rayon restreint. En effet, le noyau original est la Médina de Tunis, qui est un tissu typique. Il est composé d'unités architecturales de base : la maison à patios. Elles sont assemblées en grappe et de manière introvertie. Le tissu est ainsi formé sans aucune exigence d'alignement ni de prospect. Le tout donne un réseau de rues étroites et sinueuses. Juste à côté de la Médina, existe le tissu colonial dit « européen » qui vient contraster totalement avec un urbanisme orthogonal tramé et où tous les bâtiments sont alignés et ont des hauteurs plus ou moins égales. Enfin, sur la périphérie du centre-ville, et à partir des années 1970, une loi promulguant l'organisme de planification urbaine et l'élaboration du plan régional

d'aménagement du Grand Tunis a donné naissance à des quartiers résidentiels organisés selon un plan d'aménagement urbain et répondant à des réglementations et des cahiers de charge fixant des règles d'urbanisme d'alignement ; de retraits, de hauteurs etc ...

Nous avons donc choisi de comparer ces trois tissus afin d'évaluer l'évolution de ces derniers en termes de confort thermique extérieur.

IV. METHODOLOGIE ADOPTEE

Dans un premier temps, il s'agit de comparer l'efficacité du confort thermique extérieur dans les tissus choisis. Pour ce faire, nous avons placé quatre points dans chaque tissu, dans lesquels des mesures des paramètres microclimatiques ont été prises. Ensuite, une simulation numérique des variations du microclimat urbain a été effectuée afin d'obtenir les données nécessaires pour le calcul de l'indice de confort thermique. Ensuite, dans un second temps, nous avons procédé à une simulation paramétrique de tissus fictifs afin de confirmer les résultats obtenus en première phase.

A. Caractérisation morphologique des tissus urbains :

Nous avons commencé par la définition des points de repères dans les tissus : deux points dans l'axe Nord-Sud, et deux dans l'axe Ouest-Est. Ces quatre points ont fait l'objet de mesures durant une journée entière, qui servent à valider la simulation numérique. Par ailleurs, chaque tissu est caractérisé par un ratio hauteur / largeur des rues (H/W) particulier.

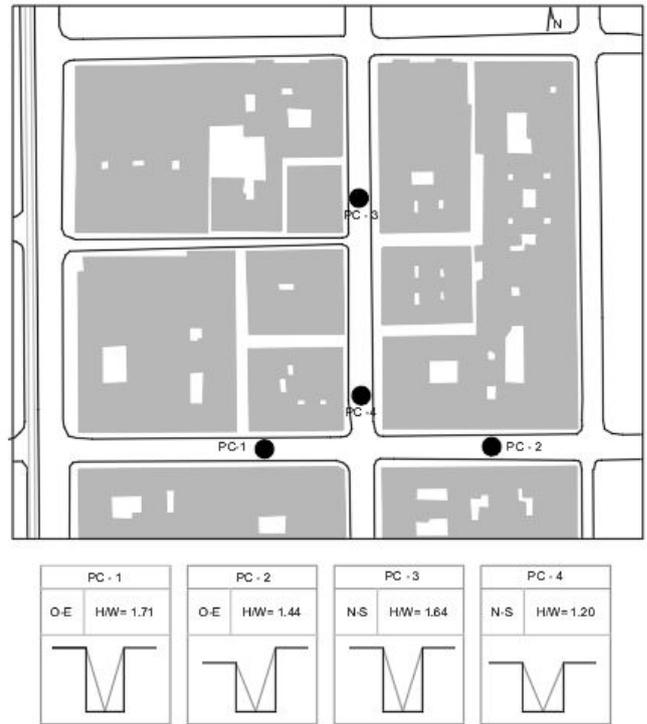


Fig. 2 Parcelle du tissu colonial et ses points de référence



Fig. 1 Parcelle du tissu de la médina et ses points de référence



Fig. 3 Parcelle du tissu réglementé et ses points de référence

B. Etude du confort thermique extérieur :

Afin de mener à bien l'étude du confort thermique extérieur, il est nécessaire d'avoir des mesures des paramètres microclimatiques. Nous avons commencé donc par une campagne de mesures dans les trois tissus durant une journée d'été typique (mois d'Août) à différents moments de la journée afin d'avoir des mesures de référence qui nous serviront pour la validation de la simulation numérique.

1) *Simulation numérique* : Le modèle de simulation numérique choisi est ENVI-met (v4.0) qui simule les interactions microclimatiques de la surface, des plantes et de l'air environnement urbain [6]. A cet effet, nous avons introduit les données climatiques de la journée de simulation que nous avons relevées depuis l'institut national de la météorologie de Tunis. Les données de sortie concernent la température de l'air, la température moyenne radiante, la vitesse de l'air et l'humidité relative. Ces données ont été comparées avec celles mesurées lors de la campagne de mesure afin de valider les paramètres de la simulation. Ensuite, nous avons lancé les simulations sur une journée entière (24 heures à partir de 06h00), et pour deux dates, l'une au mois d'août pour la saison estivale et l'autre pour le mois de janvier pour la saison hivernale.

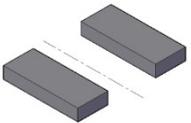
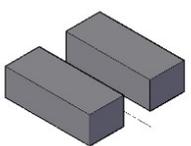
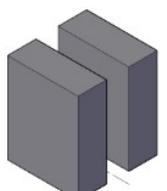
2) *Calcul de l'indice de confort* : A travers les données des paramètres microclimatiques obtenues de la simulation, nous avons pu, à travers un module de calcul via la fonction de régression approximative [7], obtenir les différentes valeurs de l'Universal Thermal Climate Index (UTCI) dans les trois tissus dans les journées d'étude choisies. Nous avons effectué les calculs pour chaque heure de la journée, ce qui nous a permis d'obtenir la variation journalière pour les deux saisons.

C. *Analyse paramétrique*

Afin de confirmer les résultats préliminaires et de trouver des corrélations, nous avons procédé à la simulation de tissus fictifs selon différents scénarii en modifiant à chaque fois un paramètre. Cela nous permet de comprendre quel indicateur a les plus d'influence sur le confort thermique extérieur et de définir idéalement quelle configuration urbaine offre les meilleures conditions de confort thermique extérieur en saison estivale et hivernale.

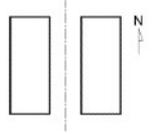
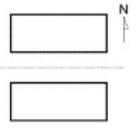
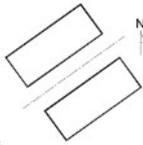
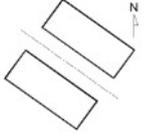
Ainsi, nous avons opté pour les configurations suivantes pour cette analyse paramétrique. D'abord, nous avons modifié les ratios H/W des rues.

TABLE I VARIATION DES ASPECTS DES RUES

Aspect des profils des rues	Ratio H/W
	0.25
	1
	4

Ensuite, nous avons changé les orientations des axes des rues, tels que présentés dans le tableau suivant.

TABLE II VARIATION DES ORIENTATIONS DES RUES

Axe N-S	Axe O-E	Axe NE-SO	Axe NO-SE
			

V. PRINCIPAUX RESULTATS

A. *Impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique* :

Tout d'abord, en ce qui concerne l'analyse morphologique, nous pouvons dire que le tissu de la Médina est constitué essentiellement de rues du type canyon, avec des valeurs du ratio H/W assez élevés d'une moyenne de 4. Pour ce qui est du tissu colonial, la valeur moyenne des ratios H/W est de 1.5. Ce sont des espaces dièdres. Pour finir, le tissu réglementé avec une moyenne de la valeur des ratios H/W de 0.44 est donc un tissu d'espaces dièdres assez dégagés. Nous avons donc une variation assez considérable entre les tissus étudiés.

Cette variation entraine naturellement une diversité dans les conditions de confort thermique extérieur des trois tissus étudiés. Ainsi, après avoir calculé les indices de confort thermique dans chaque point des tissus, nous pouvons observer dans le tableau suivant les variations des valeurs minimales, maximales et des moyennes dans les deux saisons estivale et hivernale.

TABLE III VARIATION DES VALEURS DE L'UTCI DANS LES TISSUS

Tissu	Points	UTCI (°C) en saison estivale			UTCI (°C) en saison hivernale		
		UTCI min	UTCI max	UTCI moyen	UTCI min	UTCI max	UTCI moyen
Médina	PM - 1	14,2	35,4	22,7	2,2	22,3	7,7
	PM - 2	14,9	35,8	23,5	2,0	21,6	6,4
	PM - 3	14,8	35,3	24,2	2,0	22,0	9,0
	PM - 4	15,1	35,5	23,5	0,8	20,8	5,5
Colonial	PC - 1	19,3	45,4	30,6	2,6	41,2	16,1
	PC - 2	19,5	49,8	32,7	6,2	40,5	18,1
	PC - 3	15,5	54,7	32,4	5,1	38	16,9
	PC - 4	15,6	48,1	29,9	4,2	38,7	16,7
Réglementé	PR - 1	18,5	37,7	26,9	-2,0	16,5	3,9
	PR - 2	17,9	37,1	26,1	-7,5	11,2	-1,4
	PR - 3	17,9	37,1	26,3	-7,7	11,3	-1,3
	PR - 4	17,7	37,6	26,5	-9,6	9,8	-3,0

Afin d'évaluer les conditions de confort, nous nous référons à l'échelle de l'UTCI, telle que définie par Bröde et al. [7].

TABLE IV ECHELLE D'EVALUATION DE L'UTCI

UTCI (°C)	Catégorie de stress
> 46	Stress thermique extrême
38 à 46	Stress thermique très élevé
32 à 38	Stress thermique élevé
26 à 32	Stress thermique modéré
9 à 26	Pas de stress thermique
0 à 9	Léger stress de froid
0 à -13	Stress de froid modéré
-13 à -27	Stress de froid élevé
-27 à -40	Stress de froid très élevé
> -40	Stress de froid extrême

Ainsi, en saison estivale, pour le tissu de la Médina les valeurs varient entre 14.20°C et 35.80°C avec une valeur moyenne de 23.51°C, ce qui la place dans la zone de « pas de stress thermique ». Le tissu colonial quant à lui, présente des valeurs allant de 15.5°C à 49.8°C avec une valeur moyenne de 31.44°C, ce qui la positionne en zone «stress thermique modéré ». Enfin, le tissu réglementé offre des valeurs variant de 17.7°C à 37.7°C et une moyenne de 26.49 °C, juste au début de la zone de « stress thermique modéré ». Nous pouvons donc conclure que pour la saison estivale, la Médina offre les meilleures conditions de confort thermique, suivie par le tissu réglementé et en dernière position le tissu colonial.

Pour la saison hivernale, la médina présente des valeurs allant de 0.8°C à 22.3°C et une moyenne de 7.20°C, juste au début de la zone de « léger stress de froid ». Le tissu colonial offre des valeurs qui varient entre 2.6°C à 41.2°C avec une moyenne de 16.98°C, ce qui la place en zone de « pas de stress thermique ». Pour finir, le tissu réglementé, quant à lui, présente des valeurs de -9.6°C à 16.5°C et une moyenne de -0.49°C, en zone de « stress de froid modéré ». Ainsi, le tissu colonial paraît plus confortable en saison hivernale, suivi de la médina et pour finir le tissu réglementé.

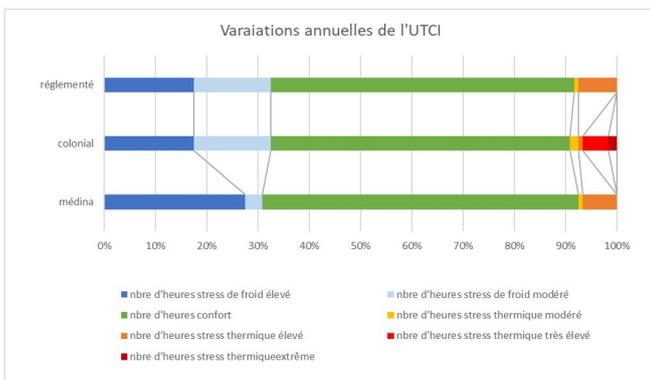


Fig. 4 Variations moyennes de l'UTCI

Sur l'année, il apparaît que le tissu médinal soit le plus confortable suivi de celui réglementé et pour finir le tissu colonial. Nous présentons donc comme résultat préliminaire que plus le ratio H/W est grand, plus les conditions de confort sont meilleures.

L'analyse paramétrique qui suit va nous permettre de conforter ces premiers résultats. Nous avons donc procédé de la même manière pour calculer l'UTCI dans les tissus fictifs, dont nous varions uniquement les ratios H/W.

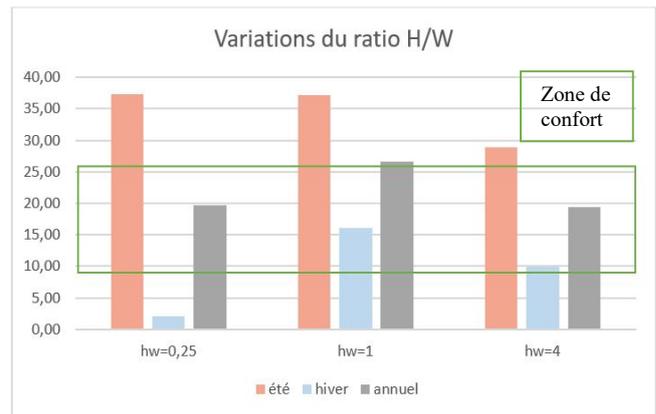


Fig. 5 Variations de l'UTCI selon la variation du ratio H/W

L'analyse des variations de l'UTCI nous montre, a priori, que la valeur annuelle des tissus dont les ratios H/W =0.25 et H/W= 4 sont dans la zone de confort. Cependant, en analysant les valeurs saisonnières nous déduisons que les tissus dont le ratio est le plus haut sont réellement les plus confortables puisqu'ils offrent des valeurs dans la zone de confort pour les deux saisons estivale et hivernale.

En revanche, les valeurs saisonnières du ratio le plus bas, démontrent un stress thermique élevé en été et un stress de froid modéré en hiver, ce qui donne une valeur moyenne à l'année.

Ces résultats confortent l'hypothèse que plus le ratio H/W est élevé, plus les conditions de confort thermique extérieur sont meilleures.

B. Impact de l'orientation sur le confort thermique :

Dans cette section, nous nous intéressons à l'impact de l'orientation des rues sur le confort thermique extérieur. En comparant les valeurs de l'indice de confort en fonction des orientations des rues étudiées, nous remarquons que l'orientation Ouest-Est est la plus défavorisée, et ce pour tous les tissus.

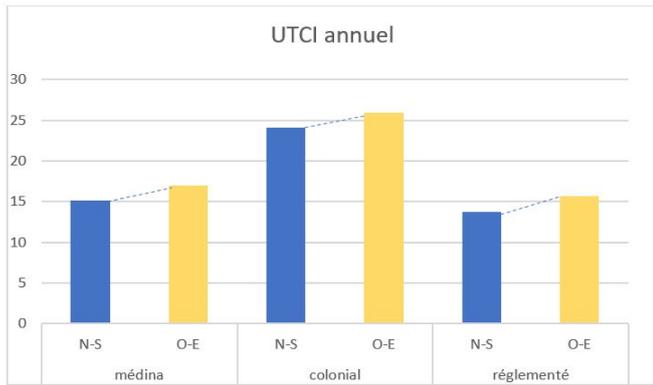


Fig. 6 Variations de l'UTCI annuel en fonction de l'orientation

Nous remarquons une différence d'environ 1.87°C en moyenne entre les orientations N-S et O-E.

Pour confirmer ces constats, nous analysons les résultats des scénarii fictifs selon différentes orientations.

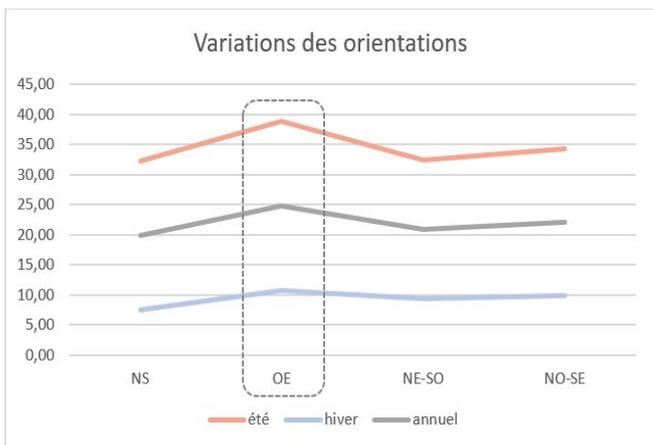


Fig. 7 Variation de l'UTCI en fonction de l'orientation

Nous notons un mauvais score pour l'orientation Ouest-Est qui présente les valeurs les moins confortables par rapport aux autres orientations qui semblent sensiblement similaires. En effet, il existe une différence de l'ordre de 3.57°C en moyenne entre les diverses orientations.

VI. DISCUSSION ET CONCLUSION

Cette étude concernant l'impact de la morphologie urbaine sur les conditions de confort thermique extérieur vient compléter d'autres recherches déjà réalisées [8], en y ajoutant les résultats de la saison hivernale. En effet, les résultats obtenus en été peuvent être contradictoires avec ceux de l'hiver. D'ailleurs, nous avons quelques différences notamment en ce qui concerne les valeurs moyennes du tissu colonial en saison hivernale qui semblent être meilleures que les autres tissus. Mais il s'agit de valeurs moyennes, en analysant de plus près les valeurs minimales et maximales, ainsi que les durées des zones de confort, nous relevons que le

tissu médinal reste malgré tout le meilleur d'un point de vue confort thermique extérieur.

En comparant les deux saisons hivernale et estivale, nous avons été en mesure de généraliser les résultats. En effet, nous avons démontré que pour un climat subtropical méditerranéen comme celui de la Tunisie, un haut ratio H/W pouvait présenter des meilleures conditions de confort thermique que cela soit en été comme en hiver. Autrement dit, plus le ratio H/W est haut, plus le confort augmente. En été, la différence entre les deux scénarii H/W=4 et H/W= 0.25, nous avons une différence de 8.48°C pour l'UTCI, ce qui fait changer l'espace de « stress thermique élevé » à « stress thermique modéré ». Ceci est dû essentiellement à l'ombrage provoqué par cette morphologie urbaine et qui par conséquent, expose moins de surfaces au soleil et de ce fait tend à atténuer les températures ambiantes. Par ailleurs, cette configuration permet d'éviter la pénétration des rayonnements solaires incidents à l'espace public et de surcroît de ne pas avoir de phénomène de piégeage radiatif. Ce qui est très important pour un tel climat qui présente plus de journées chaudes que tièdes et/ou froides.

En hiver, cette différence de l'UTCI est de l'ordre de 13.99°C en moyenne, et fait basculer l'espace de zone de « stress de froid modéré » à « zone de confort ». Il faut tout de même prévoir des zones assez dégagées afin de laisser les rayons solaires pénétrer et réchauffer les espaces, mais tout en respectant un ratio assez haut (voir PM – 1 et PM – 3).

Ces résultats sont en correspondance avec d'autres études effectués dans des climats semblables à celui de la ville de Tunis et qui préconisent les mêmes recommandations que celles de cette présente étude [9]. Il apparaît donc essentiel de prendre en considération les ratios H/W au niveau de la planification urbaine et de la réglementation qui y est associée. Il est temps que les concepteurs se rendent compte de l'importance d'une planification urbaine résiliente afin d'atténuer l'effet de l'ICU qui est la principale cause de l'augmentation de la consommation énergétique générée par les conditionnements d'air des bâtiments [10].

D'autre part, un autre point important à retenir est celui de l'orientation des rues qui, dans certains cas, s'avère être primordial. Prenons pour exemple, le cas le plus défavorable. Pour toutes les configurations de ratios H/W, le scénario correspondant au moins bon degré de confort est celui orienté O-E. Il nous apparaît alors que l'orientation des rues est tout aussi importante dans l'évaluation du confort thermique extérieur, et ce pour deux raisons. D'abord, l'orientation O-E permet aux rayons solaires de s'infiltrer durant une longue période de la journée surtout en saison estivale. Ensuite, la direction N-S, direction des vents dominants, offre l'avantage de laisser le vent pénétrer dans la rue et de ce fait permet de dissiper les éventuelles surchauffes survenues en cours de journée. Cependant, il est nécessaire que les rayons solaires pénétrant au niveau de la rue pour réchauffer l'air en saison hivernale, il semble donc que les orientations NE-SO et NO-SE soient plus clémentes en termes de confort thermique extérieur, et qu'elles représentent un bon compromis entre les deux saisons hivernale et estivale. Ces constats viennent

conforter des résultats d'autres études qui se sont intéressées à la même thématique [11] [12].

Cette étude a donc mis en évidence l'importance de la morphologie urbaine sur le confort thermique extérieur. Nous nous sommes intéressés à uniquement deux paramètres qui sont les ratios H/W et les orientations des rues. Cependant, d'autres paramètres entrent en jeu dans l'équation d'un urbanisme résilient. En effet, la densité ou encore la rugosité urbaine peuvent s'avérer être tout aussi importants. De même pour la végétation [13] qui peut jouer un rôle primordial dans le confort thermique extérieur et par conséquent sur la consommation énergétique. Ces paramètres méritent d'être approfondis dans des recherches ultérieures qui viendront compléter cette recherche.

Un autre axe qui devra être approfondi est celui de l'impact direct de la morphologie urbaine sur les consommations énergétiques des bâtiments, notamment dans le contexte du climat tunisien ; et ce afin de tracer des lignes directrices et éventuellement un outil d'aide à la décision en amont de la conception urbaine et architecturale en vue d'une planification urbaine durable et résiliente.

REFERENCES

- [1] Piselli, C., Castaldo, V.L., Pigliautile, I., Pisello, A.L., Cotana, F., Outdoor comfort conditions in urban areas: on citizens' perspective about microclimate mitigation of urban transit areas. *Sustain. Cities Soc.* 39, 16-36, 2018.
- [2] Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A.L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnefa, A., Wong, N.H., Zinzi, M., Local climate change and urban heat island mitigation techniques - the state of the art. *J. Civ. Eng. Manag.* 22, 1-16, 2016.
- [3] Abdollahzadeh, N., Bioria, N., 2 Outdoor thermal comfort: Analyzing the impact of urban configurations on the thermal performance of street canyons in the humid subtropical climate of Sydney, *Frontiers of Architectural Research*, <https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.11.006>, 2020.
- [4] Parsons, K. *Human thermal environment*. 2nd Edition: Taylor & Francis. London, 2003.
- [5] Auciliems A., Szokolay, S.V., *Thermal comfort PLEA (Passive and Low Energy Architecture) Notes*, PLEA ET department of architecture, the University of Queensland Brisbane, 1997.
- [6] Huttner, S., Bruse, M., Numerical Modeling of the urban climate – a preview on ENVI-met 4.0, the 7th international conference on urban climate, Japan. The IEEE website, 2009. [Online]. Available: <http://www.ieee.org/>
- [7] Brode, P., Blazejczyk, K., Fiala, D., Havenith, G., Holmer, I., Jendritzsky, G., Kuklane, K., Kampmann, B., The Universal Thermal Climate Index UTCI compared to ergonomics standards for assessing the thermal environment. *Industrial health*. 51, pp 16-24, 2013.
- [8] Safa Achour-Younsi, Fakher Kharrat, Outdoor Thermal Comfort: Impact of the Geometry of an Urban Street Canyon in a Mediterranean Subtropical Climate – Case Study Tunis, Tunisia, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 216, 2016, Pages 689-700, ISSN 1877-0428, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.062>.
- [9] Erik Johansson, Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco, *Building and Environment*, Volume 41, Issue 10, 2006, Pages 1326-1338, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.022>.
- [10] E.L. Krüger, F.O. Minella, F. Rasia, Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil, *Building and Environment* 46 (2011) 621e634, doi:10.1016/j.buildenv.2010.09.006
- [11] Fazia Ali-Toudert, Helmut Mayer, Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate, *Building and Environment*, Volume 41, Issue 2, 2006, Pages 94-108, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013>.
- [12] Ibrahim Rizk Hegazy, Thermal comfort of urban spaces using simulation tools exploring street orientation influence of on the outdoor thermal comfort: a case study of Jeddah, Saudi Arabia *International Journal of Low-Carbon Technologies* 2020, 00, 1–13, doi:10.1093/ijlct/ctaa028
- [13] S. K. Syed Othman Thani, N. H. Nik Mohamad & S. Norjihan Jamaludin, Outdoor thermal comfort: the effects of urban landscape morphology on microclimatic conditions in a hot-humid city, *The Sustainable City VIII*, Vol. 1, 651-662, 2013.